

EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FIBRA DE GUADUA ANGUSTIFOLIA
KUNTH DEL MUNICIPIO DE MEDINA, CUNDINAMARCA, COMO REFUERZO EN
MATERIALES CEMENTICIOS.



YOJAN DAVID MARTÍN BEJARANO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2026

EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FIBRA DE GUADUA ANGUSTIFOLIA
KUNTH DEL MUNICIPIO DE MEDINA, CUNDINAMARCA, COMO REFUERZO EN
MATERIALES CEMENTICIOS

YOJAN DAVID MARTÍN BEJARANO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil.

Asesor

Ing. Mg. JHONATAN AUGUSTO FORERO PABON

Ingeniero Civil

Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Gerencia de la Construcción.

Magíster en Cálculo de obras Civiles.

Magíster en Ingeniería – Estructuras

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD INGENIERÍA CIVIL

VILLAVICENCIO

2026

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O. P.

Rector General

P. Adrián Mauricio GARCÍA PEÑARANDA, O. P.

Vicerrector Académico General

P. Luis Antonio ALFONSO VARGAS, O.P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Juan Francisco CORREA HIGUERA, O. P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN

Secretaria General Seccional Villavicencio

Mg. Luis Fernando DÍAZ CRUZ

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento, en primer lugar, a mis padres, Ana Yojana Bejarano y Marco Antonio Martín, quienes han sido mi motivación constante y un apoyo incondicional en cada paso de este camino. Asimismo, a mi hermano Andrés, por su respaldo permanente a lo largo de mi vida y por ser un pilar fundamental en mi crecimiento.

De igual manera, agradezco de manera especial al ingeniero Jhonathan Forero por su valioso tiempo, dedicación y acertadas orientaciones, las cuales fueron cruciales para culminar con éxito esta investigación.

Finalmente, extendiendo mi gratitud a la Universidad Santo Tomás, Seccional Villavicencio, y a su Facultad de Ingeniería Civil, por brindarme una formación profesional y humana integral durante mi pregrado. De la misma forma, agradezco al equipo de laboratorios de la universidad por su permanente disponibilidad, asesoría y valioso acompañamiento durante todo el desarrollo de este proyecto.

Contenido

	Pág.
Resumen	15
Abstract.....	16
Introducción.....	17
1. Formulación del problema.....	19
1.1. Descripción del problema	19
1.2. Formulación del problema	19
2. Objetivos	20
2.1. Objetivo general.....	20
2.2. Objetivos Específicos.....	20
3. Justificación.....	21
4. Estado del arte	23
4.1. Métodos de Extracción	23
4.1.1 Extracción mecánica.....	24
4.1.2 Extracción química (Chemical extraction)	28
4.1.3 Métodos combinados (Methods combined).....	30
4.2. Comparativa general de los métodos de extracción más representativos	33
4.3. Adición de fibra de guadua en materiales compuestos cementicios.....	37
4.3.1 Artículo de investigación: Uso de las fibras de guadua Angustifolia Kunth como refuerzo del concreto. 37	
4.3.2 Artículo de investigación: Caracterización mecánica de microconcreto fibro-reforzado con fibras de guadua y fibras de fique.....	38
4.3.3 Artículo de revisión: Natural fibers as reinforcement of mortar and concrete: A systematic review from Central and South American regions.	39
4.3.4 Artículo de investigación: Physical and Mechanical Performance of Coir Fiber-Reinforced Rendering Mortars.....	41
4.3.5 Artículo de investigación: Mechanical Properties and Flexural Behavior of Sustainable Bamboo Fiber-Reinforced Mortar.....	41

7.2.	Caracterización física.....	101
7.2.1	Selección y corte de culmos para extracción de fibra	101
7.2.2	Ensayo de contenido de humedad	102
7.2.3	Trabajabilidad de la mezcla.....	106
7.3.	Caracterización mecánica	108
7.3.1	Resistencia a la compresión del concreto	108
7.3.2	Módulo de Elasticidad del concreto	110
7.3.3	Relación de Poisson del concreto.....	114
7.3.4	Resistencia a la flexión del concreto.	116
7.3.5	Ensayo de tracción diagonal (Cortante) en muretes de mampostería.	118
	Conclusiones.....	123
	Referencias bibliográficas	127
	Anexos.....	132

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Condiciones de cocción y concentraciones de licor blanco para la extracción de haces de fibra.	29
Tabla 2 Composición química y propiedades mecánicas del haz de fibras de bambú	33
Tabla 3 Propiedades mecánicas del haz de fibras de bambú en función de la concentración de NaOH	34
Tabla 4 Composición química y propiedades mecánicas del haz de fibras de bambú	34
Tabla 5 Propiedades mecánicas del microconcreto con fibra de fique (FRC-1) y fibra de guadua (FRC-2)	39
Tabla 6 Distribución altitudinal de las especies de bambúes prioritarias en Colombia.....	45
Tabla 7 Normas Técnicas.....	51
Tabla 8 Campos y Valores de dominio.....	55
Tabla 9 Muestras de entrenudos según partes del culmo.....	59
Tabla 10 Características físicas de los entrenudos de guadua según posición en el culmo	60
Tabla 11 Cantidades de probetas y especímenes para cada ensayo	70
Tabla 12 Cantidades totales de materiales para la ejecución de los ensayos	70
Tabla 13 Resumen cantidades de Fibra de Guadua Angustifolia Kunth para cada mezcla.....	71
Tabla 14 Caracterización Agregado para dosificación de concreto.....	71
Tabla 15 Granulometría Arena para mortero	72
Tabla 16 Dosificación para mortero.....	73
Tabla 17 Cantidad de material para cada muestra (Control 0%, Fibra 0.5% y Fibra 1%).....	74
Tabla 18 Pasos para ensayo de resistencia a la tracción diagonal (Cortante)	75
Tabla 19 Dosificación estándar para mezclas de concreto	79
Tabla 20 Cantidades de material requeridas para cada mezcla de concreto.	79
Tabla 21 <i>Granulometría ideal para la mezcla de concreto por muestra</i>	80
Tabla 22 Valores críticos del criterio de Chauvenet.....	83
Tabla 23 Cronograma de ensayo de los especímenes según su edad de curado.....	87
Tabla 24 Resultados del ensayo de Contenido de humedad – Parte Inferior del culmo.....	103

Tabla 25 Resultados del ensayo de Contenido de humedad – Parte superior del culmo.	103
Tabla 26 Relación Masa/Longitud según partes del culmo	106
Tabla 27 Evaluación de la trabajabilidad de la mezcla de Concreto	107
Tabla 28 Evaluación cualitativa de la trabajabilidad de la mezcla de mortero.....	107
Tabla 29 Resultados individuales de esfuerzo máximo a compresión.	108
Tabla 30 Esfuerzo máximo promedio a compresión (MPa)	109
Tabla 31 Parámetros de los especímenes para el cálculo del módulo de elasticidad () y Relación de Poisson (ν).....	111
Tabla 32 Valores de módulo de elasticidad y relación de Poisson de las muestras de concreto a los 28 días.	111
Tabla 33 Verificación estadística del módulo de elasticidad mediante el Criterio de Chauvenet	111
Tabla 34 Verificación estadística de la Relación de Poisson mediante el Criterio de Chauvenet.	114
Tabla 35 Resultados de carga y Módulo de rotura máximo.	117
Tabla 36 Crecimiento del módulo de rotura máximo promedio (MPa).....	117
Tabla 37 Verificación estadística y esfuerzo cortante máximo promedio ($\tau_{\max}$)	119
Tabla 38 Verificación estadística y deformación máxima por cortante promedio ($\gamma_{\max}$)	120
Tabla 39 Verificación estadística y módulo de rigidez promedio (G).....	122
Tabla 40 Verificación estadística del MR a los 7 días mediante el Criterio de Chauvenet.	151
Tabla 41 Verificación estadística del MR a los 14 días mediante el Criterio de Chauvenet.	151
Tabla 42 Verificación estadística del MR a los 28 días mediante el Criterio de Chauvenet.	151

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Clasificación de los métodos de extracción de fibras de bambú.....	24
Figura 2 Fuente de vapor utilizada en el proceso de explosión súbita de vapor.....	25
Figura 3 Reactor del sistema de explosión súbita de vapor.....	26
Figura 4 Tanque receptor del sistema de explosión súbita de vapor.	27
Figura 5 Método combinado químico – mecánico Rollet mil Crushing Machine + Crushing.....	32
Figura 6 Máquina trituradora utilizada para obtener las fibras de guadua	33
Figura 7 Esquema del proceso de recuperación de residuos.	35
Figura 8 Imágenes SEM de la sección longitudinal y transversal de fibras de bambú: (a) fibra sin tratar, (b) fibra tratada alcalinamente y (c) fibra tratada por explosión de vapor.	36
Figura 9 Proceso de ensayo a tracción indirecta.....	38
Figura 10 Efecto de la incorporación de fibras naturales en la trabajabilidad de morteros.....	40
Figura 11 Fibras de bambú Dendrocalamus asper en diferentes etapas de procesamiento	42
Figura 12 Esquema de clasificación universal de los materiales compuestos.	43
Figura 13 Esquema de las partes anatómicas del culmo de guadua.	47
Figura 14 Orientación de los haces vasculares en el culmo de Guadua angustifolia: disposición transversal en el nodo.....	47
Figura 15 Orientación de los haces vasculares en el culmo de Guadua angustifolia: disposición axial en el internodo.....	47
Figura 16 Partes de una planta de bambú	48
Figura 17 Clasificación de fibras para concreto: macrofibras y microfibras sintéticas.....	49
Figura 18 Plano de ubicación, ortofoto y vistas panorámicas de la finca Campo Alegre.	52
Figura 19 Flujograma de la metodología de investigación.....	53
Figura 20 Herramienta Conmutar edición y dividir objetos espaciales.....	55
Figura 21 Valores de dominio y diligenciamiento de la capa de polígonos.	57
Figura 22 Liqueños (manchas blancas).....	58
Figura 23 Vista en planta del culmo de guadua.....	58
Figura 24 Vista en planta de las muestras de entrenudos para la extracción.....	59

Figura 25 Recipiente PEAD con entrenudos sumergidos.....	61
Figura 26 Soluto de NaOH.	61
Figura 27 Entrenudos sumergidos en NaOH por 5 días.	62
Figura 28 Retiro de la epidermis con unas tenazas.....	62
Figura 29 Fibras de los entrenudos tras la remoción de la epidermis externa.	63
Figura 30 Secciones de la fibra axial del entrenudo	64
Figura 31 Cortador de secciones de guadua	64
Figura 32 Método CMT con maquina universal.....	65
Figura 33 Secciones de fibra amarradas para utilizar el cortador de secciones.....	66
Figura 34 Secciones de fibra de guadua para sumergir en NaOH 1%.....	66
Figura 35 Fibras de las secciones de guadua para desfibrar	67
Figura 36 Fibra extraída de las secciones de guadua.....	67
Figura 37 Enjuague y remojo de fibras.....	68
Figura 38 Escurrido y secado de las fibras	68
Figura 39 Solución dosificada con vinagre.....	69
Figura 40 Muestra de arena para tamizar y realizar la granulometría	72
Figura 41 Curva granulométrica Arena para Mortero, Ensayo NTC 174.,	73
Figura 42 Bloque macizo Tolete.....	74
Figura 43 Cubrimiento de los muretes con plástico vinipel	76
Figura 44 Almacenamiento de muretes en el laboratorio	76
Figura 45 Construcción de los Muretes de la muestra de control 0%	77
Figura 46 Dosificación de Fibra al 0.5%	77
Figura 47 Murete con adición de fibra al 0,5 %	78
Figura 48 Preparación de la mezcla de mortero con adición de fibra al 1 %	78
Figura 49 Pesaje de agregado según tamaño requerido	80
Figura 50 Pesaje del refuerzo de fibra de 5cm de longitud	81
Figura 51 Adición de fibra a mezcla de 0.5%.....	81
Figura 52 Curado de especímenes cilíndricos y vigas de concreto por inmersión.	82
Figura 53 Esquema de los modelos de fractura típicos	84
Figura 54 Rotulado de probetas.	85
Figura 55 Horno de secado.	86

Figura 56 Máquina universal ALFA UTM-001/LCD de 2000 kN con accesorio de tercios medios	88
Figura 57 Máquina Matest Automatic C025A equipada con accesorio extensómetro C133	88
Figura 58 Adaptación de los soportes de carga para el ensayo de muretes según la NTC 4925..	89
Figura 59 Vista esquemática del método de carga en los tercios medios.....	91
Figura 60 Medición de una cara de la viga para el trazado del tercio central	92
Figura 61 Muretes tras 28 días de curado listos para el ensayo.....	93
Figura 62 Mapa caracterización estructural en el Municipio de Medina, Cundinamarca.	97
Figura 63 Cantidad de edificaciones por sistema constructivo en el municipio de Medina.....	98
Figura 64 Cantidad de edificaciones por tipo de cubierta en el municipio de Medina.....	99
Figura 65 Cantidad de edificaciones según número de pisos en el municipio de Medina.	99
Figura 66 Cantidad de edificaciones de mampostería simple según barrio en el municipio de Medina.	100
Figura 67 Grafica de índice de vulnerabilidad por barrio.....	101
Figura 68 Mapa Índice de vulnerabilidad por barrio.	101
Figura 69 Comparativo %CH en la parte inferior y superior del culmo.....	105
Figura 70 Esfuerzo en función de los días, modelo hiperbólico ACI.....	110
Figura 71 Modulo de elasticidad muestra de control 0%, fibra 0.5% y fibra 1%.....	112
Figura 72 Graficas curva esfuerzo – Deformación Unitaria longitudinal	113
Figura 73 Relación de Poisson promedio a los 28 días por tipo de mezcla.....	116
Figura 74 Evolución del módulo de rotura máximo a flexión.....	118
Figura 75 Grafica de esfuerzo cortante máximo de muestra control 0%, fibra 0.5% y fibra 1%.	120
Figura 76 Deformación máxima promedio por muestra (mm/mm)	121
Figura 77 Modulo de rigidez promedio por muestra	122
Figura 78 Grafica esfuerzo – deformación muestra control 0%.....	148
Figura 79 Grafica deformación unitaria longitudinal – transversal muestra control 0%.....	148
Figura 80 Grafica esfuerzo – deformación muestra fibra 0.5%.....	149
Figura 81 Grafica deformación unitaria longitudinal – transversal muestra fibra 0.5%	149
Figura 82 Grafica esfuerzo – deformación muestra fibra 1%.....	150
Figura 83 Grafica deformación unitaria longitudinal – transversal muestra fibra 1%	150

Figura 84 Grafica esfuerzo cortante vs deformación por cortante MU1-1-28	153
Figura 85 Grafica esfuerzo cortante vs deformación por cortante MU1-2-28	153
Figura 86 Grafica esfuerzo cortante vs deformación por cortante MU1-3-28	154
Figura 87 Grafica esfuerzo cortante vs deformación por cortante MU2-1-28	154
Figura 88 Grafica esfuerzo cortante vs deformación por cortante MU2-2-28	155
Figura 89 Grafica esfuerzo cortante vs deformación por cortante MU2-3-28	155
Figura 90 Grafica esfuerzo cortante vs deformación por cortante MU3-1-28	156
Figura 91 Grafica esfuerzo cortante vs deformación por cortante MU3-2-28	156
Figura 92 Grafica esfuerzo cortante vs deformación por cortante MU3-3-28	157

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo A Registro fotográfico de espécimen a compresión de la muestra de control 0%.....	132
Anexo B Registro fotográfico de espécimen a compresión de la muestra de fibra 0.5%.....	135
Anexo C Registro fotográfico de espécimen a compresión de la muestra de Fibra 1%.....	138
Anexo D Registro fotográfico de espécimen a flexión de la muestra de control 0%	142
Anexo E Registro fotográfico de espécimen a flexión de la muestra de control 0.5%.....	143
Anexo F Registro fotográfico de espécimen a flexión de la muestra de control 1%.....	144
Anexo G Registro fotográfico de muretes a cortante de la muestra de control 0%.....	145
Anexo H Registro fotográfico de muretes a cortante de la muestra de fibra 0.5%.....	146
Anexo I Registro fotográfico de muretes a cortante de la muestra de fibra 1%	147
Anexo J Graficas Esfuerzo – Deformación Longitudinal, lateral.....	148
Anexo K Criterio de Chauvenet de Módulos de Rotura.	151
Anexo L Graficas esfuerzo cortante en función de la deformación por cortante.	153

Resumen

Esta investigación evalúa la viabilidad técnica de emplear macrofibras extraídas del culmo de la *Guadua angustifolia* Kunth como refuerzo en materiales compuestos cementicios (concreto y mortero), analizando su potencial como una alternativa local, ecológica y de bajo costo para mejorar el desempeño de las mezclas. Metodológicamente, se estandarizó un proceso de extracción químico-mecánico modificado y se elaboraron mezclas con adiciones de fibra del 0.5 % y 1.0 %, sometiéndolas a ensayos normalizados de compresión (NTC 673), flexión (NTC 2871) y tracción diagonal en muretes (NTC 4925). Los datos obtenidos fueron validados estadísticamente mediante el Criterio de Chauvenet para garantizar la confiabilidad y representatividad de los resultados. Los hallazgos demuestran que la dosificación del 0.5 % es la óptima, logrando incrementos de hasta un 37.3 % en la resistencia al cortante (3.240 MPa) y una mejora significativa en la tenacidad mediante el mecanismo de puenteo de fisuras. Se concluye que el material compuesto transforma la naturaleza frágil de la mampostería tradicional en un comportamiento progresivo de mayor absorción de energía y ductilidad ante las deformaciones.

Palabras Clave: *Guadua angustifolia* Kunth, extracción, macrofibras, mortero, concreto.

Abstract

This research evaluates the technical viability of using macrofibers extracted from the culm of *Guadua angustifolia* Kunth as reinforcement in cementitious composite materials (concrete and mortar), analyzing their potential as a local, ecological, and low-cost alternative for improving mixture performance. Methodologically, a modified chemical-mechanical extraction process was standardized, and mixtures with fiber additions of 0.5% and 1.0% were prepared and subjected to standardized compression (NTC 673), flexure (NTC 2871), and diagonal tension in masonry wallets (NTC 4925) tests. The data were statistically validated using the Chauvenet Criterion to ensure result reliability and representativeness. Findings show that the 0.5% dosage is optimal, achieving increases of up to 37.3% in shear strength (3.240 MPa) and a significant improvement in toughness through the crack-bridging mechanism. It is concluded that the composite material transforms the brittle nature of traditional masonry into a progressive behavior with greater energy absorption and ductility under deformation.

Keywords: *Guadua angustifolia* Kunth, extraction, macrofibers, mortar, concrete.

Introducción

La búsqueda de materiales de construcción sostenibles y eficientes se ha convertido en un imperativo para la ingeniería civil contemporánea. En este contexto, el presente trabajo investigativo explora el potencial de las fibras extraídas del culmo de la *Guadua angustifolia* Kunth, una especie que se destaca a nivel estructural por sus excepcionales propiedades mecánicas. Sin embargo, se observa que el aprovechamiento industrial actual se concentra predominantemente en las secciones inferiores del culmo, mientras que la parte superior, denominada "varillón", suele ser desechada debido a su pequeña sección transversal. Este desecho genera un desperdicio significativo de biomasa que posee un alto potencial técnico para ser procesado como macro fibra de refuerzo en materiales compuestos.

La pertinencia de esta investigación se manifiesta en su fase diagnóstica, la cual consistió en la caracterización de las edificaciones del municipio de Medina (Cundinamarca) mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), con el fin de responder a una necesidad social latente. Este estudio previo permitió identificar una problemática crítica: la prevalencia de viviendas de mampostería simple, las cuales representan un alto riesgo de colapso ante eventos sísmicos. Ante este panorama, se propone el uso de macrofibras de guadua como una alternativa local, ecológica y de bajo costo para mejorar el desempeño de las mezclas cementicias.

El propósito central de este proyecto es la extracción y caracterización de la fibra de guadua para su integración como refuerzo en mezclas o matrices de concreto y mortero. El alcance comprende desde la estandarización de un método de obtención que preserve la integridad estructural de la celulosa, hasta la evaluación física y mecánica de los materiales compuestos. Para constatar la incidencia de la fibra en la tenacidad, el control de retracciones y sus propiedades mecánicas, se ejecutaron ensayos normalizados de compresión, módulo de elasticidad, relación de Poisson y resistencia a la flexión en el concreto, así como ensayos de tracción diagonal (cortante) en muretes de mampostería para el caso del mortero de pega.

Para fundamentar científicamente el estudio, se realizó una exhaustiva investigación del estado del arte, analizando métodos de extracción aplicados en contextos diversos, con especial énfasis en los avances desarrollados en Asia, América del Sur y en especial Colombia. El objetivo principal es determinar el comportamiento físico y mecánico de estas matrices reforzadas en comparación con una muestra de control (0 % de fibra), buscando proporcionar las bases técnicas

necesarias para dar viabilidad al uso de fibras naturales en aplicaciones de mezclas de concreto y de mampostería.

Finalmente, el documento se estructura de manera lógica para guiar al lector a través de la investigación. Inicialmente, se expone el marco teórico y el estado del arte sobre los métodos de extracción. Posteriormente, se detalla la metodología experimental, que abarca el procesamiento de datos y la elaboración de especímenes. La sección central presenta el análisis de resultados de los diferentes ensayos físicos y mecánicos, validando el aporte del refuerzo de la fibra de *Guadua angustifolia* Kunth. Al terminar, se presentan las conclusiones que demuestran el alcance de los objetivos de esta investigación, emitiendo un concepto técnico definitivo sobre la viabilidad del uso de la fibra de guadua como refuerzo en el concreto y el mortero.

1. Formulación del problema

1.1. Descripción del problema

En el municipio de Medina (Cundinamarca), la alta vulnerabilidad de las infraestructuras residenciales ante eventos sísmicos representa una preocupación latente. Mediante un diagnóstico de viviendas realizado con Sistemas de Información Geográfica (SIG) como parte de la presente investigación, se identificó que el 17,2 % de las edificaciones del municipio corresponde al sistema de mampostería simple, dato que se desarrolla en detalle en la sección de resultados. Este sistema constructivo se caracteriza por presentar un comportamiento sísmico deficiente frente a las fuerzas dinámicas, lo que incrementa el riesgo de colapso y pone en peligro la vida de los habitantes. Por otro lado, a nivel medioambiental, en la región crece de manera natural y se cultiva la *Guadua angustifolia Kunth*, un recurso natural, renovable y sostenible. Sin embargo, durante su aprovechamiento, la sección superior del culmo, conocida como "varillón", suele ser desechada debido a que no cuenta con las dimensiones ni las propiedades requeridas para un uso estructural directo. Esta situación genera un desperdicio significativo de biomasa que podría ser aprovechado. En este contexto, surge la necesidad de buscar alternativas constructivas accesibles y sostenibles que permitan mejorar las propiedades mecánicas de los compuestos cementicios. En la práctica, se busca que esto contribuya a la reducción de la retracción y al aumento de la tenacidad ante movimientos sísmicos, aprovechando los residuos locales de la guadua como un posible refuerzo secundario en mezclas de concreto y morteros de pañete aplicados a las viviendas.

1.2. Formulación del problema

Considerando la necesidad de optimizar el comportamiento sísmico de las viviendas en mampostería simple y la oportunidad de aprovechar los residuos de la guadua en la región, la presente investigación plantea la siguiente pregunta fundamental: ¿De qué manera la adición de fibras naturales extraídas del culmo de *Guadua angustifolia Kunth*, provenientes del municipio de Medina Cundinamarca, incide en el comportamiento mecánico a compresión y flexión del concreto, en la resistencia a la tracción diagonal (cortante) en muretes de mampostería, y en el control práctico de la retracción y el aumento de la tenacidad de los compuestos cementicios?

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Extraer y caracterizar las fibras de *Guadua angustifolia* Kunth mediante un tratamiento combinado químico-mecánico, y evaluar su desempeño como material de refuerzo en matrices cementicias de concreto y mortero para aplicaciones en mampostería, mediante el análisis comparativo de las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión, flexión y tracción diagonal, frente a muestras de control sin refuerzo.

2.2. Objetivos Específicos

- Aplicar el proceso de extracción de las fibras de *Guadua angustifolia* Kunth, garantizando la correcta separación de la lignina sin comprometer las propiedades de resistencia a la tracción de la celulosa o fibra.
- Caracterizar las propiedades físicas del culmo de guadua y de las fibras extraídas, así como determinar su comportamiento al integrarse en las matrices de concreto y mortero durante su elaboración.
- Determinar el comportamiento mecánico del concreto y del mortero reforzados con la fibra, mediante la ejecución de ensayos de laboratorio normalizados de compresión (NTC 673, NTC 4025), flexión (NTC 2871) y tracción diagonal en muretes de mampostería (NTC 4925).
- Analizar comparativamente los resultados mecánicos cuantitativos obtenidos y los patrones de fisuración evaluados de manera cualitativa tras la falla, contrastando las muestras reforzadas frente a las de control (sin refuerzo), con el fin de determinar la eficiencia y el aporte estructural de la fibra en los materiales compuestos cementicios.

3. Justificación

La presente investigación resulta altamente conveniente en el contexto actual de la Ingeniería Civil ya que permite evaluar de forma rigurosa las propiedades de la fibra natural de guadua angustifolia Kunth como refuerzo en materiales cementicios. Ante un escenario hipotético de escasez o altos costos de las fibras sintéticas comerciales, este estudio evalúa la viabilidad de utilizar esta fibra natural con la suficiencia técnica, promoviendo el uso de materiales renovables y sostenibles.

A nivel social, los resultados beneficiarán directamente a las comunidades vulnerables del municipio de Medina (Cundinamarca), al proporcionar una alternativa económica y accesible para el refuerzo de concreto y morteros, se mitiga el mal comportamiento sísmico que caracteriza a las viviendas de mampostería simple, protegiendo la integridad de sus habitantes. Desde el punto de vista económico y ambiental, la investigación impulsa el aprovechamiento integral del culmo de la guadua. Al utilizar el "varillón" una sección que tradicionalmente se desperdicia por no tener un uso estructural directo, se fomenta la generación de empleo mediante la creación de procesos operativos para la extracción de la fibra.

En el ámbito práctico, el proyecto aportaría como fundamento para la decisión del uso de la fibra para el control de retracciones y tenacidad ante movimientos en elementos como el pañete de mampostería que aplica este proyecto investigativo, sin embargo también podría ser usado en elementos estructurales secundarios como placas o losas (aún si éstas solo se diseñen con carga muerta contribuyen a la flexión) y como refuerzo secundario en elementos de concreto. En el mercado actual, estos problemas se solucionan con mallas electrosoldadas o macrofibras sintéticas, lo cual representa un costo económico que muchas construcciones de bajos recursos no pueden asumir. La fibra de guadua se proyecta como una alternativa de refuerzo efectiva, siempre que la mezcla cementicia sea diseñada y dosificada adecuadamente para preservar las propiedades de la fibra y garantizar su durabilidad a largo plazo.

Finalmente, en el ámbito académico y metodológico, el proyecto enriquece el estado del arte sobre el comportamiento de la *Guadua angustifolia* Kunth en la región, sirviendo como línea base para futuras investigaciones e impulsando el desarrollo de proyectos industriales basados en fibras naturales de refuerzo. Este aporte se consolida mediante la creación de un "método combinado modificado" para la extracción de la fibra, estructurado a partir de la revisión y

adaptación de las técnicas existentes. De esta manera, el nuevo procedimiento y los datos obtenidos proporcionarán un soporte teórico sólido para el uso de estas fibras en compuestos cementicios, amparados bajo la normatividad vigente. Al respecto, el Título C del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010) otorga libertad investigativa al establecer textualmente que se permite el uso de agregados que hayan demostrado, a través de ensayos o experiencias prácticas, que producen un concreto con niveles de resistencia y durabilidad adecuados.

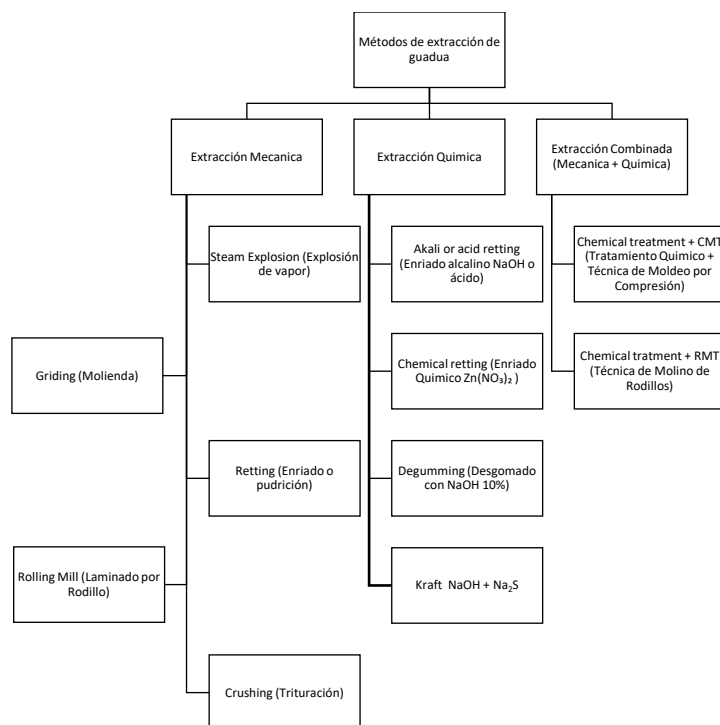
4. Estado del arte

4.1. Métodos de Extracción

Según Porras y Maraño (2012), las fibras naturales, como las provenientes del bambú y sus diferentes especies, poseen cualidades destacadas para la industria, tales como su ligereza (baja densidad), buena resistencia específica, biodegradabilidad, renovabilidad y un costo menor en comparación con las fibras sintéticas tradicionales.

Según las conclusiones de Zakikhani, Zahari, Sultan y Majid (2014), la parte más importante en la producción de fibras de bambú es conocer la microestructura de su culmo, que consiste en haces vasculares y tejido parenquimático. La lignina y la hemicelulosa en las nanofibrillas de las hebras de fibra son principalmente responsables de las propiedades mecánicas de las fibras de bambú.

Para la extracción de la fibra de guadua y otras especies de bambú existen diferentes métodos desarrollados. Según la revisión realizada por Zakikhani et al. (2014), estos procedimientos se pueden clasificar principalmente en mecánicos, químicos y una combinación de ambos. Tras su análisis, los autores concluyen que, entre los diversos procedimientos, algunos métodos de extracción presentan beneficios sobre otros dependiendo de la aplicación final y la integridad microestructural deseada para la fibra. Estas ventajas comparativas se mencionan al final de esta sección; primeramente, se describen los métodos identificados que están resumidos en la Figura 1.

Figura 1 Clasificación de los métodos de extracción de fibras de bambú.

Nota. Figura adaptada de Bamboo fibre extraction methods, por Zakikhani et al. (2014), Materials & Design, 63, 820–828. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.058>

4.1.1 Extracción mecánica

El método de extracción mecánica abarca diversas técnicas, tales como la explosión por vapor, el enriado, la trituración, la molienda y la laminación con molino. Todos estos procedimientos se utilizan para obtener fibra de bambú destinada a la fabricación de compuestos reforzados. La principal ventaja de esta extracción mecánica frente a los procesos químicos radica en su menor impacto ambiental (Zakikhani et al., 2014).

Método de explosión de vapor (Steam explosión). Es un tratamiento fisicoquímico de materiales vegetales que implica una descarga instantánea de materiales bajo vapor a alta presión en un recipiente sellado. El proceso fue inventado por Mason en 1926 como una alternativa a los procesos de fabricación de pulpa quimiomecánicos y quimiotermodomecánicos (Mason 1926). Uno de los hallazgos más importantes es que la porción de lignina puede exudar fácilmente desde la

pared celular a la superficie de la fibra durante el tratamiento de explosión de vapor. (Tanahashi et al. 1983)

Agregar que Quintanar Olguin, Suárez Patlán y Sandoval García (2018) explican que el Método o proceso del Steam Explosion es un proceso termo-mecánico capaz de fraccionar la estructura del material lignocelulósico mediante la acción hidrolítica del vapor a presión y altas temperaturas” (p. 212). También describe que está conformado por tres componentes principales: la fuente de vapor, el reactor y el tanque receptor, los cuales operan de manera integrada para llevar a cabo el proceso termo-mecánico de fraccionamiento del material lignocelulósico.

La fuente de vapor consiste en un tanque diseñado bajo principios de caldera, el cual permite la generación, transmisión y liberación controlada de presión y temperatura. Este componente opera de forma automática y cuenta con un sistema de combustión conformado por un quemador completamente automatizado y una recámara de combustión revestida con refractarios monolíticos.

Los gases producto de la combustión son conducidos hacia una chimenea de condensación, garantizando el control térmico del sistema (Quintanar Olguín et al., 2018). (Figura 2)

Figura 2 Fuente de vapor utilizada en el proceso de explosión súbita de vapor.



Nota. Figura adaptada de *Uso de la explosión súbita de vapor como pretratamiento para fraccionar biomasa*, por Quintanar Olguín et al. (2018, pp. 216–217).

El reactor corresponde a un tanque de acero inoxidable con geometría cónica, diseñado de tal forma que el diámetro de entrada del vapor es menor que el diámetro de salida del material procesado. Este elemento permite el contacto directo del vapor con el material lignocelulósico y debe contar con una brida diseñada para soportar presión, así como una válvula de liberación tipo

esfera que facilita la descarga rápida del producto tratado, condición necesaria para la generación del efecto de explosión súbita (Quintanar Olguín et al., 2018). (Figura3)

Figura 3 *Reactor del sistema de explosión súbita de vapor.*



Nota. Figura adaptada de Quintanar Olguín et al. (2018).

Finalmente, el tanque receptor tiene como función principal el depósito del material procesado después de la despresurización. Este componente dispone de una boquilla de entrada para el producto, una boquilla destinada a la instalación de un indicador y liberador de presión, una brida que permite labores de mantenimiento y limpieza, y una válvula de esfera para la salida del producto final. El diseño del tanque receptor permite contener de manera segura el material una vez finalizada la etapa de explosión (Quintanar Olguín et al., 2018).(Figura 4)

Figura 4 *Tanque receptor del sistema de explosión súbita de vapor.*



Figura 2 Reactor de explosión súbita de vapor.

Nota. Figura adaptada de Quintanar Olgún et al. (2018).

Pudrición (Retting). Este procedimiento consiste en retirar la corteza de bambú pelando y obteniendo así tiras. Las tiras se mantuvieron durante tres días en el agua. A continuación, para separar las fibras, se golpeaban las tiras mojadas, se raspaban con un cuchillo afilado y se peinaban. (Rao, Rao, 2007, 77 p. 28-299).

En otro estudio no se utilizó el desguace o pelado, sino que se limitó a cortar el bambú en bruto en varias partes longitudinales sin eliminar el nudo y la epidermis. Antes de hacer la pudrición, las tiras de bambú se limpiaban con agua corriente. Los culmos de bambú se fermentaron en agua a temperatura ambiente durante 2 meses. Se utilizaron dos tipos diferentes de lengüeta, a saber, anaeróbica y aeróbica, y estas técnicas lograron separar los haces del culmo. Estos autores encontraron que cada haz de fibras extraídas consistía en una sola fibra, y que estas fibras podían adquirir una longitud dinámica. (Fu, Zhang, Yu, Guebitz, & Cavaco-paulo, 2012, p. 13-9).

Trituración (Crushing o Raw bamboo). De acuerdo con Phong, Fujii, Bui y Okubo (2012), la extracción de las fibras de bambú consiste en cortar inicialmente el material en trozos con una trituradora de rodillos, para luego rasparlo con un rodillo de pasadores obteniendo así una fibra más gruesa. Previo a su paso por el deshidratador, los autores indican que esta fibra debe ser hervida a 90 °C por 10 horas para desengrasarla y, posteriormente, secada de manera rotativa. Sin embargo, el principal inconveniente de este procedimiento es que tiende a producir fibras cortas, las cuales pueden desintegrarse o convertirse en polvo si se someten a un procesamiento mecánico excesivo (Ashimori, Katayama, Aoyama y Nagai, 2004).

Molienda (Grinding). El proceso de extracción inicia utilizando culmos de bambú libres de nudos, los cuales se cortan en tiras y se sumergen en agua durante 24 horas. Transcurrido este tiempo, el material húmedo se trocea manualmente. Las piezas más anchas se procesan mediante una extrusora, mientras que las tiras más largas se seccionan para obtener pequeñas astillas. A continuación, el material se somete a una molienda a alta velocidad durante 30 minutos para conseguir fibras cortas, las cuales se clasifican por tamaño utilizando tamices con diferentes aberturas. Por último, las fibras extraídas se secan en un horno a 105 °C durante un periodo de 72 horas (Thwe y Liao, 2002).

Laminado por rodillo (Rolling Mill). El proceso de extracción inicia seccionando el culmo de bambú desde los nudos para obtener piezas más pequeñas, las cuales se dividen en láminas de 1 mm de grosor. Para facilitar la separación de las fibras, este material se sumerge en agua durante una hora y, posteriormente, se procesa en un molino de rodillos operado a baja velocidad y con presión ligera. Las tiras resultantes se someten a un segundo remojo de 30 minutos, tras lo cual las fibras se extraen individualmente utilizando una cuchilla. Finalmente, el material obtenido, cuya longitud oscila entre 220 mm y 270 mm, se somete a un secado al sol durante dos semanas (Jindal, 1986).

4.1.2 Extracción química (Chemical extraction)

Los métodos químicos tienen como fin la reducción o eliminación del contenido de lignina de las fibras elementales. Esta extracción modifica la composición del bambú, lo que impacta también a otros componentes de su microestructura, como la hemicelulosa y la pectina (Zakikhani et al., 2014).

Desgomado (Degumming). El proceso de desgomado consiste en la eliminación de los materiales gomosos y la pectina. Como base para esta extracción química, se ha tomado el método diseñado originalmente por Gangstad et al. (como se citó en Maiti, 1997). Por lo general, este proceso produce aproximadamente un 33 % de fibra en relación con su peso. Sin embargo, Kim, Okubo, Fujii y Takemura (2013) indican que, al utilizar el método de desgomado establecido por Maiti el cual emplea una solución alcalina de NaOH en concentraciones de hasta el 10 %, procesaron un culmo de bambú de 5 kg y obtuvieron 2.8 kg de fibra tratada, lo cual representa un rendimiento del 56 %.

Enriado alcalino o ácido (Alkali or acid retting). Este método químico consiste en sumergir las tiras de bambú en un recipiente de acero inoxidable que contiene una solución de NaOH a 1.5 N, manteniéndolas a una temperatura de 70 °C durante 5 horas. Posteriormente, el material se extrae y se somete a compresión mediante una prensa. Para lograr la separación de las fibras, se emplea un clavo de acero. Finalmente, las fibras obtenidas se lavan con agua en repetidas ocasiones y se secan en un horno. Mediante este procedimiento, se logra un peso final de 3.5 kg de fibras de bambú (Kim et al., 2013).

Kraft. Es una variación del método alcalino, se utiliza hidróxido de sodio combinado con sulfuro de sodio (Na_2S). La presencia de este último reactivo es clave, ya que hace las veces de catalizador para acelerar la digestión y estabiliza la celulosa, protegiendo así a las fibras del ataque de un ambiente químico altamente corrosivo (Estrada Mejía, 2009, p. 34).

Para determinar el procedimiento de separación más eficiente, Estrada Mejía (2009) llevó a cabo digestiones químicas evaluando diferentes formulaciones de licor blanco, que es una solución química acuosa en las cuales varió los niveles de álcali efectivo “NaOH”, sulfidez “ Na_2S ” e hidromódulo “l/kg”, tal como se detalla en la Tabla 1. A partir de estos ensayos experimentales, el autor determinó que las propiedades mecánicas de las fibras de guadua dependen en gran medida de dicha formulación. En consecuencia, concluyó que la mezcla óptima para extraer las fibras de *Guadua angustifolia*, minimizando el daño a la celulosa, consiste en un hidromódulo de 3 l/kg, un álcali efectivo del 15 % y una sulfidez del 20 % (Estrada Mejía, 2009, p. 71)

Tabla 1 Condiciones de cocción y concentraciones de licor blanco para la extracción de haces de fibra.

Digestión	AE (%)	S (%)	HM (l/kg)	kappa (κ)	Micrografías
F-01	15	0	4	17.6	
F-02	15	0	15	18.7	
F-03	15	15	4	12.1	
F-04	15	15	15	10.8	
F-05	20	20	4	24.9	
F-06	20	20	3	19.5	

Digestión	AE (%)	S (%)	HM (l/kg)	kappa (κ)	Micrografías
F-07	20	50	4	23.6	
F-08	20	50	3	19.6	

Nota. Kappa representa directamente la cantidad de lignina restante en la pulpa que se ha extraído, es adimensional. Adaptado de Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (*Guadua angustifolia*) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos (p. 36), por M. Estrada Mejía, 2009, Tesis de maestría, Universidad de los Andes.

Enriado químico (Chemical retting). En un estudio comparativo sobre técnicas de enriado, se evaluó un procedimiento basado en nitrato de zinc, en el cual las fibras separadas manualmente fueron sumergidas en soluciones de $Zn(NO_3)_2$ al 1 %, 2 % y 3 % (sobre el peso de la fibra), empleando una relación material/líquido de 1:20. El tratamiento se llevó a cabo a 40 °C, con un pH neutro, durante 116 horas en una incubadora tipo BOD, seguido de una etapa de ebullición en agua por una hora. Los resultados indicaron que este método permitió una mayor remoción de lignina en comparación con los tratamientos ácido y alcalino; sin embargo, las fibras tratadas presentaron un contenido de humedad elevado. Por tal motivo, los autores concluyen que el enriado alcalino ofrece un mejor balance entre la eliminación de componentes no celulósicos y la conservación de las propiedades mecánicas, lo que evidencia una menor pérdida de resistencia frente a los demás métodos evaluados (Kaur, Chattopadhyay y Kaur, 2013).

4.1.3 Métodos combinados (*Methods combined*)

Los métodos combinados como su nombre indica es la suma de los métodos químicos y mecánicos, lo mejor de dos metodologías las cuales son condensadas en dos líneas de extracción:

The compresión moulding technique (CTM). Como su nombre indica se ejerce una presión a compresión, este por medio de dos placas; en un estudio que comparte Zakikhani et al. (2014) Se presionó una cama de tiras de bambú tratadas con alcalinos entre dos placas planas bajo una carga de 10 toneladas Fuerza.

Rollet mill technique (RMT). Como su nombre lo indica, el procedimiento de laminado por rodillos (rolling mill) consiste en forzar el paso de la materia prima entre dos rodillos de acero, uno fijo y otro giratorio. Generalmente, este paso mecánico se realiza después de un pretratamiento

químico alcalino, sumergiendo las tiras de bambú en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) a una concentración recomendada con el fin de ablandar la lignina y facilitar la separación fibrilar.

Respecto a este tipo de tratamientos, Phong et al. (2012) determinaron que las fibras tratadas con una solución de NaOH al 1 % exhiben mejores propiedades mecánicas en comparación con el uso de concentraciones mayores empleando posteriormente rodillos para extraer las fibras de las láminas tratadas. Adicionalmente, en el mismo estudio, los autores exploraron una variación de extracción de tipo puramente mecánica. En este procedimiento alternativo, el bambú se dividió longitudinalmente en pequeñas láminas mediante una trituradora de rodillos y luego se utilizó un rodillo de púas para desmenuzarlas y obtener fibras gruesas. Para eliminar la grasa natural del material, estas fibras se sometieron a ebullición en una caldera a 90 °C durante 10 horas, tras lo cual se introdujeron en un deshidratador y, finalmente, culminaron su proceso de secado en una secadora rotativa.

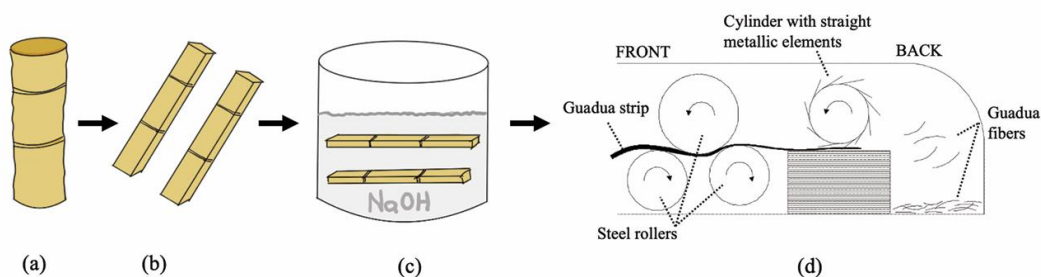
Rollet mil Crushing Machine + Crushing. Este método, desarrollado por Luna y Lizarazo-Marriaga (2025), presenta y evalúa una metodología combinada de tipo químico-mecánico. En este procedimiento, se utiliza una solución química óptima determinada a partir de la evaluación empírica de diferentes concentraciones, con el fin de lograr un equilibrio preciso entre remover la lignina y la hemicelulosa para facilitar la separación de las fibras y el no daño de la estructura de la celulosa que les otorga su resistencia mecánica. De acuerdo con los autores, si se remueve demasiado material no celulósico, la fibra pierde fuerza; por el contrario, si se remueve muy poco, no logrará adherirse adecuadamente a las matrices de los biocompuestos. Para lograr este propósito, los investigadores diseñaron un proceso químico-mecánico (Figura 5), el cual, para fines de la presente investigación, ha sido denominado como “*Rollet Mill Crushing Machine + Crushing*”. A continuación, se detalla esta metodología:

1. **Preparación y pulido:** Se seleccionaron culmos de guadua con una edad comprendida entre los tres y seis años, los cuales fueron cortados en tiras longitudinales de aproximadamente 0,025 m de ancho y 0,60 m de largo. Para su preparación, estas tiras se pulieron mecánicamente con el propósito de eliminar la capa protectora externa y las protuberancias de los nudos.
2. **Ablandamiento químico:** Las tiras pulidas fueron sumergidas en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 2,5 % y calentadas a una temperatura de 80 °C durante un periodo de tres horas para su ablandamiento.

3. **Lavado y neutralización:** Posteriormente, las tiras se enjuagaron exhaustivamente con agua del grifo y se dejaron en remojo en agua corriente limpia durante un día completo. Para garantizar la eliminación de todo rastro de NaOH, se realizó una prueba sumergiendo una muestra de 2 g en agua destilada; al constatar que el pH marcaba un rango neutral de $7,0 \pm 0,5$, se dio por terminado el lavado y las fibras se dejaron secar a temperatura ambiente.
4. **Separación mecánica (trituración):** Finalmente, las tiras ablandadas fueron procesadas mediante una máquina trituradora de diseño propio. Este equipo empleó tres rodillos de acero en su parte frontal, encargados de aplastar y comprimir la tira. En la parte posterior, un cilindro provisto de elementos metálicos rectos giró a alta velocidad para "cepillar" la tira triturada, logrando así la separación de las fibras individuales. En el caso de las tiras de mayor grosor, estas se pasaron reiteradas veces por la máquina, ajustando gradualmente la separación entre los rodillos (Figura 6)

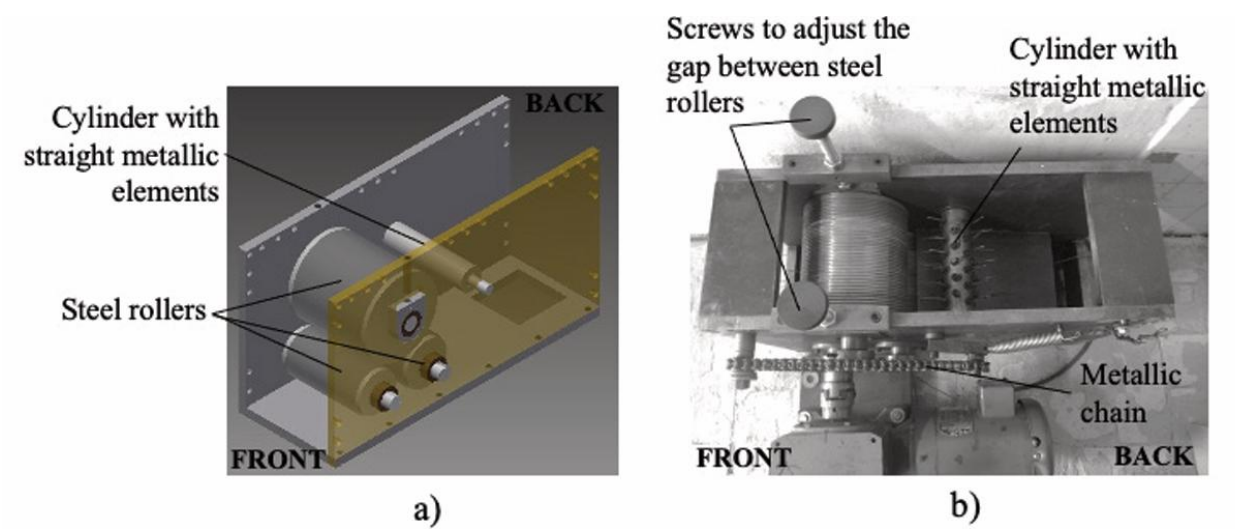
Figura 5 Método combinado químico – mecánico Rollet mil Crushing Machine + Crushing.

(a) culmo de guadua; (b) tiras longitudinales pulidas; (c) tiras sumergidas en solución de NaOH bajo diferentes condiciones; (d) esquema de la máquina trituradora



Nota. Tomado de "Transforming bamboo-guadua: Fiber extraction and characterization for biocomposite materials" (p. 5), por P. Luna y J. Lizarazo-Marriaga, 2025, *Materiales de Construcción*, 75(358).

Figura 6 Máquina trituradora utilizada para obtener las fibras de guadua



Nota. Tomado de "Transforming bamboo-guadua: Fiber extraction and characterization for biocomposite materials" (p. 5), por P. Luna y J. Lizarazo-Marriaga, 2025, *Materiales de Construcción*, 75(358).

4.2. omparativa general de los métodos de extracción más representativos

Los autores Phong et al. (2012) comparte una matriz de los resultados de los experimentos realizados respecto el método mecánico y la concentración del método químico alcalino:

Tabla 2 Composición química y propiedades mecánicas del haz de fibras de bambú

Método	Costo del equipo	Consumo de energía	Área de instalación	Impacto ambiental	Relación de aspecto de la fibra	Control de propiedades	Edad y especie del bambú
Extracción mecánica	Razonablemente costoso	Relativamente bajo	Pequeña	No	Baja	Aceptable	Joven (2–8 meses)
Tratamiento alcalino	Económico (sin incluir tratamiento de aguas residuales)	Medio	Grande	Sí	Alta	Buena	Fibra fina: ~12 meses; Fibra media: 1–2 años; Fibra gruesa: ≥3 años

Método	Costo del equipo	Consumo de energía	Área de instalación	Impacto ambiental	Relación de aspecto de la fibra	Control de propiedades	Edad y especie del bambú
Explosión por vapor	Costoso	Alto	Grande	No	Alta	Buena	Preferible: <2 años; Fibra gruesa: ~5 años

Nota. Tabla adaptada de Phong et al. (2012).

Tabla 3 Propiedades mecánicas del haz de fibras de bambú en función de la concentración de NaOH

Tratamiento	Diámetro de fibra (μm)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformación máxima (%)
NaOH 1%	230 ± 180	395 ± 155	26.1 ± 14.5	2.82 ± 1.3
NaOH 2%	218 ± 175	360 ± 170	25.2 ± 13.3	2.62 ± 1.2
NaOH 3%	209 ± 180	324 ± 170	23.7 ± 12.5	2.54 ± 1.2

Nota. Tabla adaptada de Phong et al. (2012).

Tabla 4 Composición química y propiedades mecánicas del haz de fibras de bambú

Tratamiento	Diámetro (μm)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformación máxima (%)	Lignina (%)	Hemicelulosa (%)	Celulosa (%)
Sin tratar	262 ± 160	420 ± 170	38.2 ± 16.0	9.8 ± 2.5	24.4	25.2	48.5
Tratamiento alcalino	230 ± 180	395 ± 155	26.1 ± 14.5	2.82 ± 1.3	22.6	16.4	48.8
Explosión por vapor	195 ± 150	308 ± 185	25.7 ± 14.0	2.51 ± 1.2	23.3	7.4	47.4

Nota. Tabla adaptada de Phong et al. (2012).

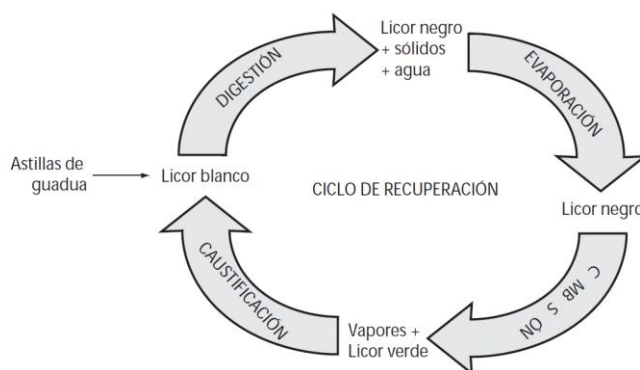
Con base en la información anterior, se realizan dos análisis principales. En primer lugar, a partir de los datos presentados en la Tabla 3 y Tabla 4, se evidencia que la disminución del contenido de lignina y hemicelulosa en las fibras de bambú se encuentra asociada a una reducción progresiva del módulo de Young y de la resistencia mecánica. La lignina cumple la función estructural de mantener cohesionados los haces y fibras individuales de la guadua, mientras que la hemicelulosa actúa como una matriz de protección y enlace entre la celulosa, principal componente

fibroso responsable de la resistencia mecánica. En consecuencia, la remoción excesiva de estos componentes no celulósicos, aunque facilite la separación de las fibras, compromete su capacidad de resistir deformaciones elásticas y esfuerzos mecánicos.

En segundo lugar, con base en los datos de la Tabla 2 y a pesar de las ventajas del tratamiento alcalino, Phong et al. (2012) advierten en su matriz comparativa que este es el único método de extracción que genera un impacto ambiental negativo. Esta problemática es abordada por Estrada Mejía (2009), quien explica que el subproducto resultante de la digestión química, denominado "licor negro", es considerado un residuo peligroso por su alta concentración de reactivos químicos, lignina, hemicelulosa, celulosa y resinas. No obstante, para mitigar la contaminación y evitar daños a la salud humana y a los ecosistemas, este efluente puede ser tratado. El mismo autor detalla que el licor negro se somete a un ciclo de recuperación compuesto por tres procesos principales: la evaporación del líquido para concentrar los sólidos, la combustión de estos últimos en una caldera u horno de recuperación a altas temperaturas y, finalmente, la caustificación.

Esta última etapa permite estabilizar el residuo e, incluso, recuperar reactivos para convertirlos nuevamente en licor blanco (pp. 13-14), tal como se ilustra en la Figura 7

Figura 7 Esquema del proceso de recuperación de residuos.



Nota. Tomado de *Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (Guadua angustifolia) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos* (p. 14), por M. Estrada, 2009, Tesis de maestría, Universidad de los Andes.

En la Figura 8, Phong et al. (2012) señalan que la unión entre las fibras individuales sometidas al tratamiento **por explosión súbita de vapor se ve relativamente debilitada,**

evidenciando una pérdida de cohesión estructural entre los haces fibrosos. Las imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido muestran que este tratamiento provoca una separación excesiva de las fibras elementales, acompañada por la aparición de cavidades y microfisuras en la pared celular.

Desde un punto de vista microestructural, esta degradación visual indica que la fibra unitaria es fragmentada más allá del nivel óptimo requerido para su aprovechamiento como elemento de refuerzo. La presencia de fisuras internas y discontinuidades dentro de la propia fibra sugiere un daño estructural que compromete su integridad mecánica.

También Phong et al. (2012) concluyen que los resultados obtenidos son consistentes con investigaciones previas, en las cuales se afirma que la lignina y las hemicelulosas desempeñan un papel fundamental como matriz en las fibras naturales individuales, contribuyendo a la cohesión estructural y al comportamiento mecánico del material fibroso.

Figura 8 Imágenes SEM de la sección longitudinal y transversal de fibras de bambú: (a) fibra sin tratar, (b) fibra tratada alcalinamente y (c) fibra tratada por explosión de vapor.

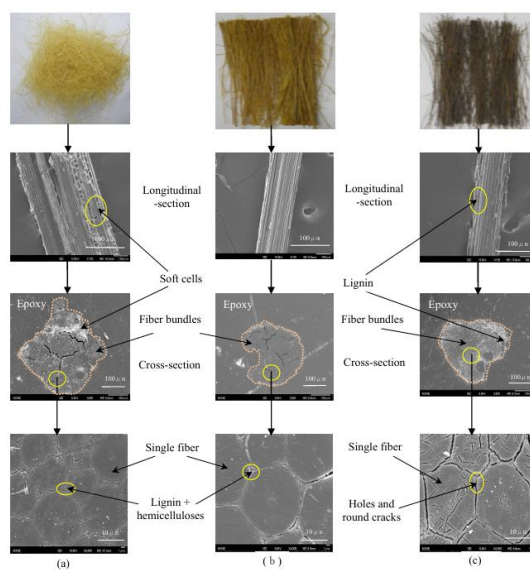


Figure 1. SEM images for side-view and cross-section surfaces of bamboo fiber
(a) Untreated fiber, (b) Alkaline treated fiber, (c) Steam exploded fiber

Nota. Figura reproducida de Phong et al. (2012).

A manera comparativa, Zakikhani et al. (2014) concluye que los métodos mecánicos por explosión de vapor (steam explosion) y los métodos químicos son capaces de remover lignina de

las fibras de bambú, modificando su microestructura; sin embargo, las fibras obtenidas mediante estos procedimientos presentan, en general, longitudes reducidas, lo que limita su aplicación en sistemas que requieren refuerzos continuos o de mayor esbeltez.

Así, dentro de los métodos de extracción química, los autores destacan que el **tratamiento alcalino** permite remover parcialmente la lignina y, al mismo tiempo, **mejorar la adherencia interfacial entre la fibra y la matriz en materiales compuestos**. Sin embargo, concluyen en la necesidad de un **equilibrio entre el grado de extracción y la conservación** de la integridad estructural de la fibra (Zakikhani et al., 2014). Haciendo énfasis a los Métodos combinados (Mecanico + Químico) como el Chemical treatment + Combining alkaline treatment with compression moulding technique CTM y Chemical treatment + Roller Mill Technique RMT.

Finalmente, como señala Estrada Mejía (2009), "no es fácil extraer los haces vasculares sin deteriorar las propiedades mecánicas de las fibras; al retirar la lignina de la planta se afecta también la celulosa, lo que aumenta la fragilidad de las fibras y reduce su resistencia mecánica. Por lo tanto, la utilización masiva de fibras de bambú para reforzar compuestos debe venir de la mano con la estandarización de un proceso óptimo de extracción de fibras o haces vasculares" (p. 7).

4.3. Adición de fibra de guadua en materiales compuestos cementicios.

A continuación se relata diferentes aportes sobre adición de fibra:

4.3.1 *Artículo de investigación: Uso de las fibras de guadua Angustifolia Kunth como refuerzo del concreto.*

En un artículo de investigación presentado por Vanegas, Poveda y Martínez (2019) evalúa el comportamiento mecánico de mezclas de concreto reforzadas con fibras de *Guadua angustifolia* Kunth cortadas a 3 cm de longitud y tratadas con Cal durante 12 horas y luego lavadas y secadas por 48 horas. Para el estudio, se elaboraron cilindros de concreto con una adición de fibra del 1 % con respecto al peso total de la mezcla y se compararon mediante ensayos de tracción indirecta a los 7, 14 y 28 días contra muestras de concreto convencional (sin fibras) y concreto con 1 % de fibras de vidrio (Figura 9) Al final las conclusiones arrojo que el concreto con fibra con las proporciones y dimensiones fue la adecuada y que se obtuvo una **buena adherencia** y dimensiones

de fibra adecuadas. Aunque su resistencia **fue ligeramente menor a la del concreto convencional**, destacó por reducir significativamente el índice de fisuración de las probetas.

Figura 9 *Proceso de ensayo a tracción indirecta.*



Nota. Tomado de "Uso de las fibras de Guadua angustifolia Kunth como refuerzo del concreto", por O. L. Vanegas Alfonso, J. A. Poveda Jaramillo y J. S. Martínez Morales, 2019, *Revista Ingenieros Militares*, 14, p. 6.

4.3.2 Artículo de investigación: Caracterización mecánica de microconcreto fibro-reforzado con fibras de guadua y fibras de fique.

De acuerdo con Palacios Pabón, Capacho Carvajal y Sánchez-Molina (2023), el estudio analiza la adición de fibras naturales de guadua en mezclas de microconcreto utilizando proporciones del 1%, 2% y 3% en volumen.

Los resultados muestran que entre las mezclas al 1% y 2%, la primera alcanzó la mejor resistencia a la compresión dentro de las muestras de guadua. Por otro lado, en la mezcla al 3% disminuyó drásticamente la resistencia a la compresión y arrojó un módulo de elasticidad (rigidez) muy por debajo de lo esperado, como se observa en la Tabla 5. (Palacios Pabón et al., 2023).

Tabla 5 *Propiedades mecánicas del microconcreto con fibra de fique (FRC-1) y fibra de guadua (FRC-2)*

Muestra		MOR [MPa]	Rc [MPa]	Ec [GPa]	Densidad [g/cm ³]
MRC		4.52	43.40	20.46	1.98
GRC		13.79	34.05	26.58	2.07
FRC-1	1%	10.66	36.12	25.38	2.06
	2%	11.21	32.73	21.57	2.08
	3%	11.88	24.74	21.45	2.14
FRC-2	1%	4.99	38.92	14.06	2.06
	2%	5.74	29.05	14.58	2.12
	3%	9.70	18.21	18.23	2.15

Nota. Adaptado de "Caracterización mecánica de microconcreto fibro-reforzado con fibras de guadua y fibras de fique" (p. 90), por J. D. Palacios Pabón, M. A. Capacho Carvajal y J. Sánchez-Molina, 2023, *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(42).

Al respecto de este comportamiento, los autores concluyen que:

Si se contrasta la resistencia a la compresión, se observa que la mejor mezcla es la de FRC-2 con 1% de fibras de guadua, ya que la resistencia alcanza un 14% más que la de GRC y el 90% de la resistencia de la MRC. (Palacios Pabón et al., 2023, p. 90)

4.3.3 Artículo de revisión: Natural fibers as reinforcement of mortar and concrete: A systematic review from Central and South American regions.

García, Cabrera, Rolón, Pichardo y Thomas (2024) realizan una exhaustiva revisión de literatura sobre compuestos cementicios reforzados con fibras naturales (NFRM y NFRM, por sus siglas en inglés). A través de un análisis de múltiples investigaciones desarrolladas en la región, desde México hasta Argentina, los autores documentaron el uso de una gran variedad de fibras como refuerzo en mortero y concreto; dentro de los hallazgos, destacaron estudios en países como Brasil (131), México (31) y Colombia (23).

Como primera conclusión de la revisión, se establece que la resistencia a la flexión y a la compresión, tanto en concretos como en morteros reforzados, tiende a incrementar cuando se utilizan adiciones bajas, típicamente de hasta un 0,5 % en volumen. Superar este umbral suele generar un efecto negativo en las propiedades mecánicas, debido a que una alta concentración de

fibras impide la correcta homogeneización de la mezcla, generando vacíos y zonas de baja resistencia (García et al., 2024).

En segundo lugar, el estudio determinó que la trabajabilidad (asentamiento) de las mezclas cementicias disminuye proporcionalmente a medida que se incrementa el porcentaje de fibra natural adicionada, Como se evidencia en la Figura 10. Para contrarrestar esta pérdida de manejabilidad sin alterar la relación agua/cemento, los investigadores sugieren la incorporación de aditivos superplastificantes. Asimismo, se advierte que la adición excesiva de fibras incrementa la porosidad general y la conectividad entre los poros de la matriz, lo cual intensifica los problemas de retracción por secado en lugar de mitigarlos (García et al., 2024).

Figura 10 Efecto de la incorporación de fibras naturales en la trabajabilidad de morteros

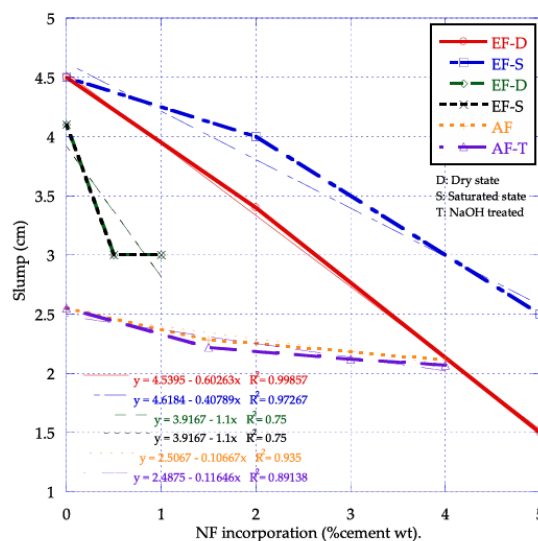


Fig. 3. Effect of the incorporation of NF in mortars workability according to different authors.

Nota. Tomado de "Natural fibers as reinforcement of mortar and concrete: A systematic review from Central and South American regions", por G. García, R. Cabrera, J. Rolón, R. Pichardo y C. Thomas, 2024, *Journal of Building Engineering*, 98, 111267 (<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111267>). Licencia CC BY-NC 4.0

Finalmente, los análisis microestructurales revisados por García et al. (2024) revelan que la adherencia entre la fibra y el cemento es el factor crítico para la transferencia de esfuerzos. Debido a que las fibras naturales absorben agua durante el mezclado, a medida que el concreto se seca estas

experimentan una reducción volumétrica. Este fenómeno de contracción puede crear defectos de adherencia o vacíos en la interfaz, disminuyendo drásticamente la resistencia final del material compuesto.

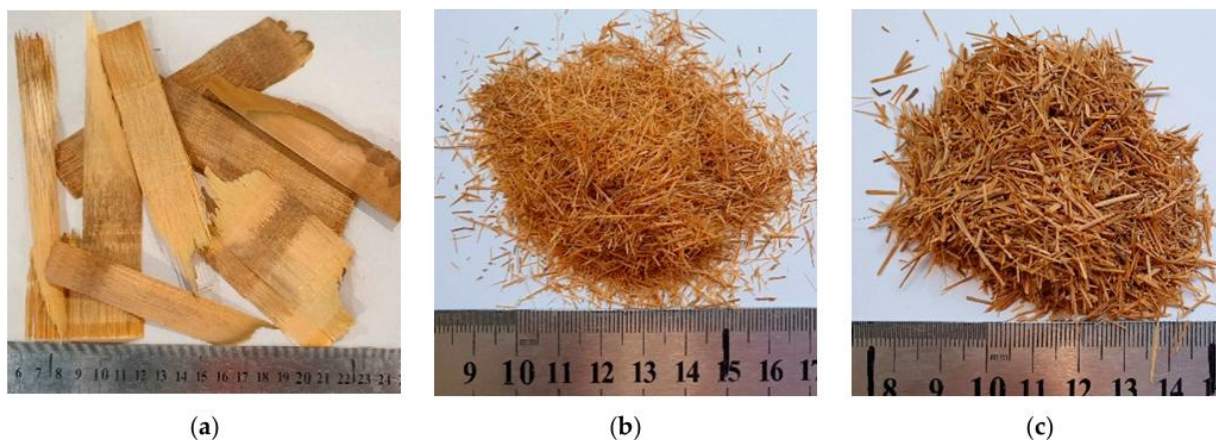
4.3.4 Artículo de investigación: Physical and Mechanical Performance of Coir Fiber-Reinforced Rendering Mortars

Maia Pederneiras, Veiga y de Brito (2021) evaluaron el comportamiento físico y mecánico de morteros de pañete reforzados con fibras naturales de coco (*coir*). Para ello, elaboraron dos tipos de mezclas: una muestra de control en dosificación 1:4 (cemento, arena y agua) y una mezcla 1:1:6 (cemento, cal aérea y agregados), en proporciones volumétricas de fibra del 10 % y 20 % respecto al volumen total del mortero; en ambos casos se varió la longitud de la fibra entre 1,5 cm y 3 cm.

Los resultados evidenciaron que la incorporación de fibras incrementó la porosidad del mortero, lo que ocasionó una reducción del módulo de elasticidad de hasta un 21 % a los 365 días, lo que indica que los morteros modificados presentan un comportamiento más deformable que los de control. No obstante, el aporte más significativo de la fibra como refuerzo fue su tenacidad a la fractura: los especímenes ensayados demostraron un excelente comportamiento post-pico, evidenciando una falla de tipo dúctil, fenómeno directamente atribuible al mecanismo de puente de fisura ejercido por las fibras.

4.3.5 Artículo de investigación: Mechanical Properties and Flexural Behavior of Sustainable Bamboo Fiber-Reinforced Mortar

En este estudio Maia Pederneiras, Veiga y de Brito (2021) desarrollaron una mezcla de mortero sostenible a base de cenizas volantes, incorporando fibras de bambú (*Dendrocalamus asper*) obtenidas como residuo del proceso de fabricación de materiales compuestos. Las fibras fueron trituradas y tamizadas en dos diámetros nominales: 300 μm y 500 μm (Figura 11) e incorporadas en proporciones del 4 %, 6 % y 8 % del volumen de la mezcla. Para mejorar la adherencia y la durabilidad de la fibra en la matriz cementicia, se aplicaron dos tratamientos previos: un tratamiento térmico en agua a 85 °C, orientado a la remoción parcial de la lignina, y un tratamiento alcalino con hidróxido de calcio.

Figura 11 *Fibras de bambú Dendrocalamus asper en diferentes etapas de procesamiento*

Nota. (a) Material de desecho crudo; (b) fibras de 300 μm de diámetro tras molienda y tamizado; y (c) fibras de 500 μm de diámetro tras molienda y tamizado. Tomado de "Mechanical Properties and Flexural Behavior of Sustainable Bamboo Fiber-Reinforced Mortar" (p. 3), por Maier et al., 2020, *Applied Sciences*, 10(6587)

Los resultados arrojaron tres hallazgos principales. Primero, la resistencia a la compresión disminuyó de forma proporcional al incremento del contenido de fibra, con reducciones entre el 7,8 % y el 27 % respecto a la mezcla de control; el comportamiento a tracción fue similar, con reducciones entre el 6,9 % y el 31,9 %. Segundo, las mezclas reforzadas con bambú presentaron un comportamiento de ablandamiento por deformación el cual el autor llama *strain-softening*, en el que las fibras lograron puentear eficazmente las grietas, mejorando la tenacidad del compuesto. Tercero, las fibras de 300 μm demostraron un desempeño mecánico superior frente a las fibras de 500 μm , lo que sugiere que una mayor finura favorece la distribución homogénea dentro de la matriz y optimiza el mecanismo de transferencia de esfuerzos.

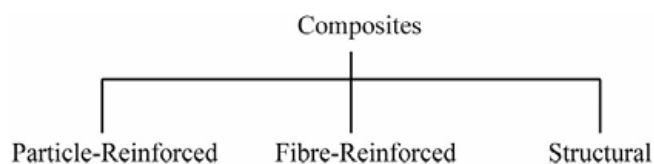
5. Marco de referencia

5.1. Marco teórico

La norma sismorresistente colombiana en el título C, brinda una libertad investigativa en la cual en materia de agregado textualmente señala que se permite el uso de agregados que han demostrado a través de ensayos o por experiencias prácticas que producen concreto de resistencia y durabilidad adecuadas, siempre y cuando sean aprobados por el Supervisor Técnico. (NSR-10, 2010, Título C, C.3.3.1, p. C-42). Ahora, tanto el concreto y el mortero son materiales compuestos; Según Chawla (2012):

“La mayoría de los materiales que aparecen en la naturaleza obtienen sus magníficas propiedades de una combinación de dos o más componentes que pueden distinguirse prontamente cuando se examinan con microscopios ópticos o electrónicos. Así, por ejemplo, muchos tejidos del cuerpo, que tienen una alta resistencia combinada con una enorme flexibilidad, están hechos de fibras resistentes tales como el colágeno, embebidas en una matriz de menos rigidez. [...] De forma semejante el examen microscópico de la madera y el bambú revela una acusada estructura fibrilar, que es muy evidente en el bambú cuando se rompe. [...] La mayor parte de los materiales de ingeniería son también combinaciones de dos o más fases dispersas en escala microscópica para obtener propiedades óptimas” (pp. 2-3).

Asimismo, Egbo (2021) señala que “los materiales compuestos son materiales diseñados que consisten en dos o más componentes con grandes diferencias en sus propiedades físicas, químicas y mecánicas” (p. 557). A partir de ello, el autor propone una clasificación universal que agrupa estos materiales en tres categorías principales: compuestos reforzados con partículas, compuestos reforzados con fibras y compuestos estructurales. Esta organización responde a las diferencias en la geometría de las fases dispersas y a las funciones específicas que cada tipo puede cumplir según su diseño, lo que permite adaptar sus propiedades a diversas aplicaciones en ingeniería (Figura 12)

Figura 12 Esquema de clasificación universal de los materiales compuestos.**Fig. 4.** Universal classification scheme for composites.

Nota. Tomado de "A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering", por M. K. Egbo, 2021, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 33(8), p. 560.

Sin embargo, cada material tiene un ser de estar ahí, Estrada Mejía (2009) explica en el marco teórico que:

“Un material compuesto se compone de dos o más materiales llamados *fases*; la fase que proporciona la forma del elemento se denomina *matriz* y lo que se encuentra embebido en ella se llama *refuerzo*. Los materiales que son reforzados con *fibras largas* suelen tener las mejores propiedades mecánicas, a la vez que presentan un comportamiento fuertemente anisotrópico y requieren tecnologías de fabricación complejas y sofisticadas. Por el contrario, los materiales reforzados con partículas y fibras cortas suelen acercarse a un material isótropo, proporcionan un aumento de las propiedades más moderado y se fabrican con tecnologías semejantes a las empleadas en los materiales convencionales” (pp. 1–2).

Esta materia prima como lo es la *Guadua Angustifolia Kunth* es una especie de la familia del Bambú, científicamente llamada *Bambusoideae*; Guerrero (1997) sostiene que el bambú, es denominado “oro verde del siglo XXI”, representa una alternativa frente a los efectos del cambio climático. Además, resalta que se trata de una planta autosostenible, de rápido crecimiento y con capacidad de trabajar en red, lo cual le permite ser vista como una opción para enfrentar diversos problemas ambientales, sociales y económicos que afectan a comunidades y regiones (pp. 154–157).

Londoño (2011) señala que en Colombia se distinguen cinco regiones geográficas que abarcan desde las tierras bajas amazónicas hasta las cumbres andinas a más de 6.500 m s. n. m., y desde los bosques húmedos del Pacífico hasta las sabanas de los Llanos Orientales. En este marco de diversidad, resalta que la *Guadua angustifolia Kunth* es la especie de bambú más utilizada y con

mayor proyección en el país (p. 144). Asimismo, en la Tabla 6, la autora presenta la “Distribución altitudinal de las especies de bambúes prioritarias en Colombia” (p. 145).

Tabla 6 *Distribución altitudinal de las especies de bambúes prioritarias en Colombia.*

ALTITUD (msnm)	ESPECIES	HABITAT
0-500	Guadua amplexifolia, G. macrospiculata, G. angustifolia, Rhipidocladum racemiflorum	Bosque seco tropical a orilla de ríos y quebradas; bosque de galería; bosque montano y montano bajo; valle interandino y selva amazónica.
500-1500	G. angustifolia, R. racemiflorum, Otatea fimbriata	Bosque montano y montano bajo; valle interandino húmedo y seco.
1500-2000	G. angustifolia	Bosque montano, a orilla de ríos y quebradas; valle interandino.
2000-2500	R. harmonicum, R. geminatum, Chusquea antioquiensis, C. subulata	Bosque montano y montano alto.
2500-3000	Aulonemia queko, C. subulata, R. longispiculatum, R. geminatum	Bosque montano alto.

Nota. Tomado de "El bambú en Colombia" (p. 145), por X. Londoño, 2011, Biotecnología Vegetal, 11(3).

Se ha señalado que la fibra de bambú constituye una buena candidata como refuerzo en materiales compuestos, debido a que es un recurso natural abundante y posee excelentes propiedades mecánicas específicas. Además, entre las ventajas generales de las fibras naturales se destacan su **bajo costo, baja densidad (ligereza), resistencia específica aceptable, buenas propiedades de aislamiento térmico, biodegradabilidad y renovabilidad** (Porrás & Maraón, 2012, pp. 2782-2783).

5.1.1 Fibras naturales, clasificación de plantas naturales.

Las fibras vegetales pueden clasificarse en siete categorías: liber, hoja, semilla, fruto, madera, tallo y fibras de hierba (Jawaid y Abdul Khalil, 2011). Dentro de esta clasificación, el bambú pertenece a la familia de las gramíneas (Bambusoideae) y se comporta como un material compuesto natural, en el cual las fibras de celulosa actúan como refuerzo y la lignina como matriz, lo que explica su elevada relación resistencia–peso y su rigidez estructural (Jain et al., 1992; Lakkad y Patel, 1981).

5.1.2 Gramínea *Guadua angustifolia* Kunth

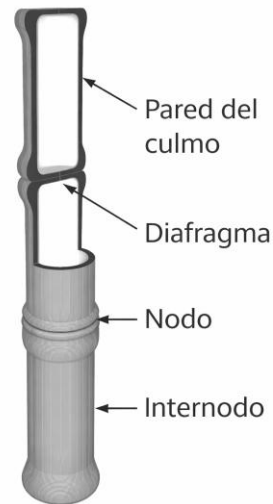
Según Takeuchi (2004), la guadua es el bambú nativo colombiano por excelencia y, a nivel mundial, es reconocida como una de las 20 mejores especies de bambúes. Físicamente, destaca por su gran tamaño, ya que puede alcanzar hasta 30 metros de altura y 22 cm de diámetro. Posee fibras longitudinales muy fuertes (que componen el 40 % de su tejido), una alta relación resistencia/peso y una gran flexibilidad, cualidades que la hacen un material ideal y competitivo para la industria de la construcción.

5.1.3 Estructura del Bambu

La estructura del bambú es principalmente el culmo; según Estrada Mejía (2009, p. 7), este consta de dos partes principales: los nodos y los internodos (Figura13) Las células de estas dos zonas de la guadua se comportan de manera diferente, sobre todo en su dirección, tamaño y cantidad. Así, los internodos contienen células orientadas axialmente, mientras que en los nodos se encuentran en sentido transversal (Figura 14 y Figura15). Según Londoño (2011), las células

orientadas axialmente conforman numerosos haces vasculares, los cuales contribuyen de manera significativa a la resistencia mecánica del tallo.

Figura 13 Esquema de las partes anatómicas del culmo de guadua.



Nota. Figura adaptada de *Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (Guadua angustifolia) para el refuerzo de materiales compuestos*, por Estrada Mejía (2009).

Figura 14 Orientación de los haces vasculares en el culmo de *Guadua angustifolia*: disposición transversal



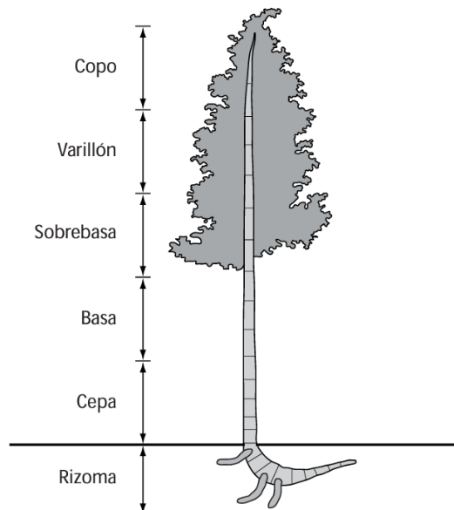
Figura 15 Orientación de los haces vasculares en el culmo de *Guadua angustifolia*: disposición axial en el internodo.



Otros autores como Jansson (2000) El espacio comprendido entre dos nodos consecutivos lo denomina entrenudo, y es desde esta zona donde se desarrollan las ramas. La distancia entre nodos varía en función de la especie de bambú.

Adicionalmente, Según Lo, Cui y Leung (2004), se evidencia que la densidad de la fibra de bambú aumenta a medida que disminuye el diámetro superior del culmo. En este sentido, los autores señalan que la sección basal presenta una menor resistencia mecánica, pero una mayor capacidad para soportar cargas en comparación con la sección superior del culmo. Esta relación es confirmada por Estrada Mejía (2009), quien señala que la parte superior de la guadua, conocida como varillón (Figura 16), se descarta actualmente para usos estructurales exigentes debido a su reducido diámetro, el cual limita la eficiencia de las conexiones mecánicas y genera mayores deformaciones. No obstante, esta sección presenta un mayor contenido de fibras y un menor porcentaje de lignina, lo que la hace favorable para procesos de extracción de fibras destinadas a refuerzo (p. 9).

Figura 16 *Partes de una planta de bambú*



Nota. Tomado de *Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (Guadua angustifolia) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos* (p. 6), por M. Estrada Mejía, 2009, Tesis de maestría, Universidad de los Andes.

5.1.4 *Fibras comerciales para materiales compuestos cementicios en el mercado colombiano.*

Sika.

En el mercado actual de la construcción, el uso de fibras como refuerzo de materiales cementicios se ha consolidado como una alternativa técnica y económicamente viable frente al refuerzo tradicional con acero. Empresas especializadas como Sika destacan que el concreto reforzado con fibras corresponde a un material compuesto en el que fibras de diferentes dimensiones y materiales se distribuyen de manera uniforme dentro de la matriz cementicia, conformando un sistema tridimensional de refuerzo que mejora el comportamiento frente al agrietamiento y la fractura. Según Sika, la inclusión de fibras permite incrementar propiedades como la ductilidad, la tenacidad, la resistencia al agrietamiento, la resistencia al impacto y a la fatiga, así como reducir la permeabilidad y el riesgo de desconchado explosivo, beneficios que se extienden no solo al concreto, sino también a morteros y revoques (Sika, 2024).

Asimismo, Sika señala que el desempeño del concreto reforzado con fibras no depende exclusivamente de una propiedad individual de la fibra, como la resistencia a la tracción, sino del comportamiento integral del material compuesto. En este sentido, variables como la calidad de la pasta de cemento, la dosificación de fibras, la relación de aspecto (longitud/diámetro) y el tipo de anclaje influyen de manera conjunta en el rendimiento del sistema, por lo que el criterio de selección debe considerar la interacción fibra–matriz y el objetivo funcional de la aplicación (Sika, 2024).

Dentro de las soluciones disponibles en el mercado, Sika clasifica sus productos en macrofibras sintéticas y microfibras sintéticas (Figura 17), cada una con funciones específicas, así:

Figura 17 *Clasificación de fibras para concreto: macrofibras y microfibras sintéticas.*



Nota. Figura adaptada de Fibras para concreto y mortero, por Sika (2024).

Macrofibras: se caracterizan por proporcionar un refuerzo estructural efectivo con bajas dosis, gracias a su elevada relación de aspecto y a sistemas de anclaje diseñados para mejorar la transferencia de esfuerzos dentro de la matriz de concreto. Estas fibras contribuyen significativamente al control de la fisuración, al incremento de la absorción de energía, a la durabilidad y a la tenacidad del material, sin presentar los riesgos de corrosión asociados al refuerzo de acero. (Sika, 2024).

Un ejemplo comercial de este producto es SikaFiber-540 Twist, una macrofibra sintética de polipropileno diseñada para utilizarse como una alternativa a las fibras de acero, las mallas de alambre soldadas y las barras de refuerzo convencionales en diversas aplicaciones de refuerzo secundario. Al integrarse en el concreto, esta fibra disminuye las grietas por contracción plástica y mejora considerablemente la resistencia al impacto, la rotura, la abrasión y la fatiga, aumentando la tenacidad y el desempeño estructural del material a largo plazo (Sika Colombia, 2025b).

También, SikaFiber Force-60 destaca en esta categoría como una macrofibra sintética de poliolefina de 60 mm de longitud, diseñada específicamente para su aplicación en concreto convencional y concreto proyectado. Esta fibra funciona como un sustituto efectivo del refuerzo de acero no estructural, ya que incrementa significativamente la ductilidad, la tenacidad y la capacidad de absorción de energía de la matriz cementicia, a la par que disipa tensiones y reduce la permeabilidad y el agrietamiento estructural; desde el punto de vista físico y químico, ofrece la ventaja de no sufrir corrosión, ser altamente resistente a los álcalis y distribuirse de manera homogénea en la mezcla gracias a su tecnología de empaque en *pucks* (hebras agrupadas en bolsas solubles), lo cual previene la formación de "erizos" o aglomeraciones indeseadas durante el mezclado (Sika Colombia, 2025c)

Microfibras sintéticas: se definen por presentar diámetros inferiores a 0,3 mm y longitudes típicas entre 6 y 19 mm, pudiendo encontrarse en forma de monofilamento o fibras fibriladas. Su función principal se orienta al control de la contracción plástica y a la reducción de la fisuración temprana durante las primeras etapas del curado, especialmente en las primeras 24 horas. Adicionalmente, estas fibras contribuyen a mejorar la resistencia al impacto y a mitigar el desconchado explosivo (*spalling*) en situaciones de incendio. Aunque las microfibras no sustituyen el refuerzo estructural, durante el estado plástico del concreto forman una red tridimensional que estabiliza los agregados, mejora la cohesión de la mezcla y promueve una exudación más uniforme (Sika, 2024). Un claro ejemplo comercial de este material es SikaFiber, una microfibra

monofilamento de polipropileno modificada para concreto y mortero. Al distribuirse aleatoriamente dentro de la masa, esta fibra refuerza dicha red tridimensional, incrementando la capacidad de deformación del concreto, lo que reduce significativamente la fisuración plástica y le otorga una mayor resistencia a los impactos, los golpes y la abrasión (Sika Colombia, 2025)

Toxement. En su portafolio, Toxement tiene a Maxten, el cual es una macrofibra sintética compuesta por una mezcla virgen de copolímeros. Su función principal es actuar como un refuerzo para sustituir el uso de mallas electrosoldadas y fibras metálicas en la construcción de placas, pisos, andenes y elementos prefabricados de concreto con resistencias a la compresión de hasta 21 MPa. Al integrarse en la mezcla, esta fibra proporciona un refuerzo tridimensional que reduce significativamente las fisuras por contracción plástica e incrementa la tenacidad, la resistencia a la fatiga, al impacto y a la abrasión del material. Además de ser químicamente inerte, elimina por completo los riesgos de corrosión. (Euclid Chemical Toxement, 2021).

5.2. Marco normativo

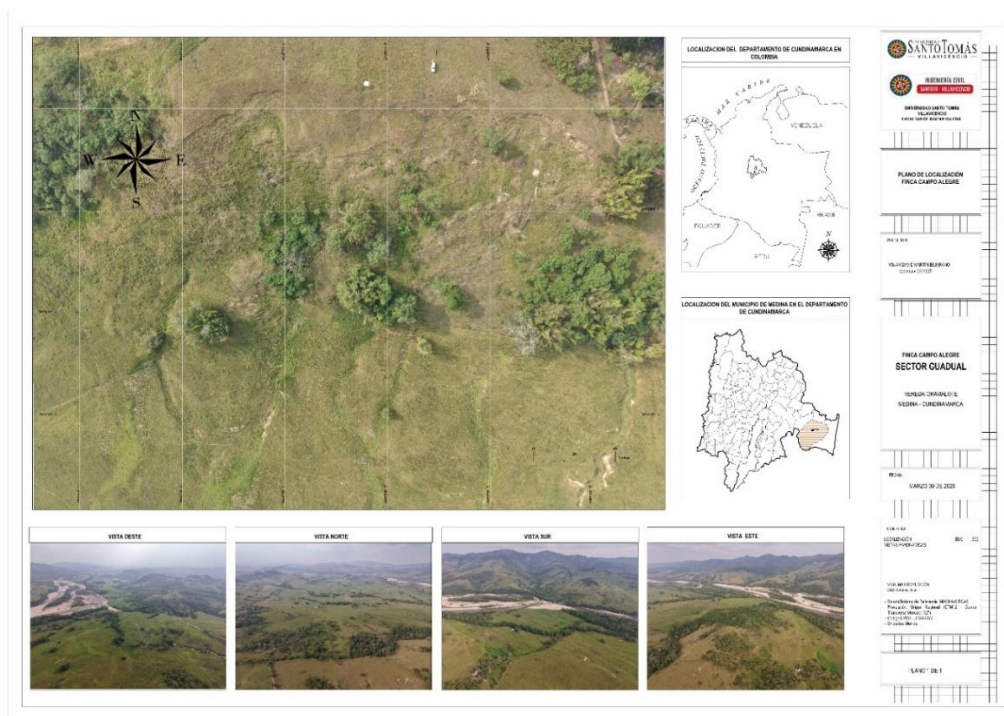
Tabla 7 Normas Técnicas

Norma	Descripción	Vigencia
NTC 673	Concretos. Método de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.	SI
NTC 1377	Ingeniería civil y arquitectura. elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio	SI
NTC 206-1	Maderas. Determinación del contenido de humedad para ensayos físicos y mecánicos.	SI.
NTC 1522	Ensayo para determinar la granulometría por tamizado.	SI
NTC 2240	Agregado para mortero de mampostería.	SI
NTC 174	Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto.	SI
NTC 2871	Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión (utilizando una viga simple con carga en los tercios medios).	SI
NTC 4925	Método de ensayo para determinar la resistencia a la tracción diagonal (cortante) en muretes de mampostería.	SI
NTC 4025	Método De Ensayo Para Determinar El Módulo De Elasticidad Estático Y La Relación De Poisson En Concreto A Compresión	SI

5.3. Marco geográfico

La *Guadua angustifolia* Kunth utilizada en el marco de la presente investigación fue aprovechada y extraída de la finca Campo Alegre, localizada en la vereda Gramalote del municipio de Medina, Cundinamarca. Este predio se encuentra situado a una altitud que oscila entre los 350 y 360 m s. n. m. La finca abarca una extensión aproximada de 52 hectáreas de pasto y su actividad económica principal es la ganadería, complementada con actividades agrícolas secundarias como el cultivo de plátano y yuca. A lo largo de su topografía, el terreno cuenta con una importante variedad de guaduales distribuidos de manera natural en diferentes puntos de su extensión. Para contextualizar geográficamente la zona de extracción, en la Figura 18 se anexa el plano de ubicación detallado, acompañado de una ortofoto y vistas panorámicas del predio.

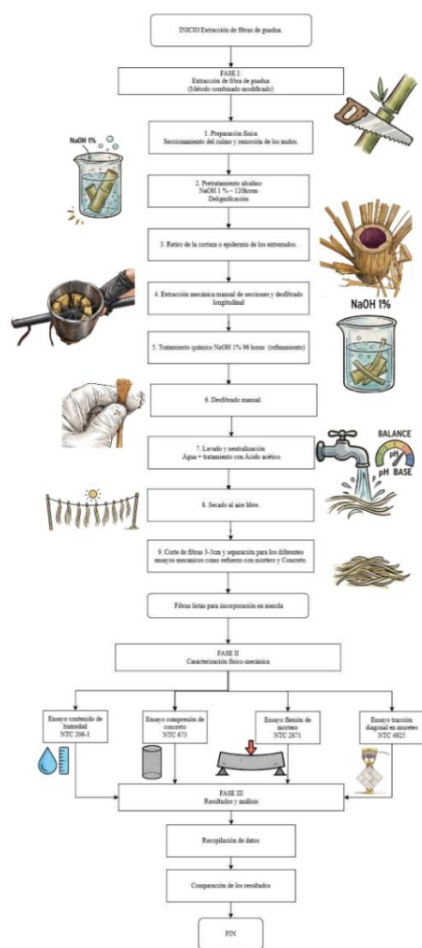
Figura 18 Plano de ubicación, ortofoto y vistas panorámicas de la finca Campo Alegre.



6. Metodología

La presente metodología es el desarrollo de la investigación la cual se fundó luego de un exhaustivo análisis del estado del arte y toda la normativa para esta investigación, a continuación se presenta el flujo de trabajo para la extracción y caracterización de la fibra de Guadua Angustifolia Kunth como refuerzo en materiales compuestos cementicios (Figura19) Sin embargo, la caracterización de viviendas de Medina no se incluyó pero se presenta en la primera sección de este apartado de la metodología, esto debido a que solo cumple una función de contextualización y justificación empírica del problema, Como parte del diagnóstico previo que motivó la investigación.

Figura 19 *Flujograma de la metodología de investigación*



6.1. Caracterización de edificaciones y viviendas en Medina Cundinamarca

Con el propósito de de obtener información básica y precisa sobre el estado actual de las estructuras en el municipio de Medina, se llevó a cabo un levantamiento de datos mediante el uso de QGIS, un software libre y de código abierto para Sistemas de Información Geográfica (SIG).

6.1.1 *Recopilación de información geoespacial*

En la fase inicial, se recopiló la cartografía base a través de la plataforma oficial *Colombia en Mapas*. La información extraída consistió en la geometría de las construcciones, las cuales se encontraban agrupadas en polígonos que representaban manzanas o estructuras contiguas.

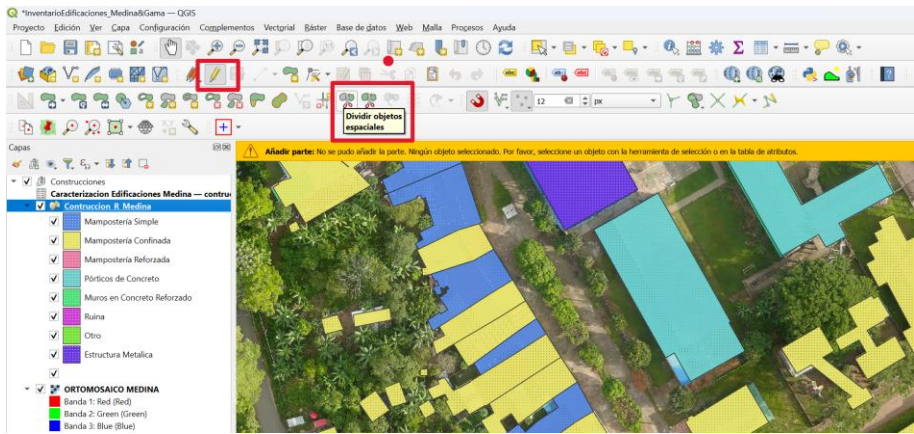
Seguidamente, se requirió una ortofoto del municipio; sin embargo, el portal geoespacial solo disponía de imágenes actualizadas hasta el año 2021. Por consiguiente, fue necesario adquirir y procesar una nueva ortofoto del casco urbano correspondiente al año 2025. Esta actualización fue fundamental para obtener una imagen precisa de la zona y poder identificar las estructuras que quedaron en estado de ruina tras el sismo del 8 de junio de 2025. De acuerdo con el diario El Tiempo (2025), este evento telúrico tuvo una magnitud de 6,5, con epicentro en los municipios de Paratebueno y Medina (Cundinamarca), generando graves consecuencias en la región y dejando un saldo de 4000 personas damnificadas, 665 viviendas afectadas y 23 escuelas rurales destruidas.

6.1.2 *Procesamiento de Información*

Una vez consolidada la información visual y cartográfica, se procedió al procesamiento de los datos en el entorno SIG mediante los siguientes pasos:

1. **Subdivisión de geometrías:** Se aislaron las estructuras individuales a partir de los polígonos de las manzanas, utilizando las funciones de *Conmutar edición* y *Dividir objetos espaciales* del software QGIS (Figura 20)

Figura 20 Herramienta Conmutar edición y dividir objetos espaciales.



2. **Estructuración de atributos:** Se creo una base de datos para la caracterización mediante la creación de campos y dominios específicos (Tabla 8). Esto se hace para que no exista incoherencias, en si los dominios se crean para controlar y estandarizar la información que se ingresa en los atributos de las capas. La idea es evitar errores y asegurar coherencia en los datos.

Tabla 8 Campos y Valores de dominio

Campo	Valores y Dominio	
Barrio	1	URB Villa Diana
	2	URB San Nicolas
	3	URB Bethel Etapa 1
	4	Barrio Centro
	5	URB San Agustin
	6	URB Villa Mayor Etapa 1
	7	Barrio La manguita
	8	Barrio San Jorge
	9	URB Portal del Saman
	10	URB Villa Yoli
	11	Barrio La Experanza
	12	Etapa 2 Villa Mayor
	13	URB Condominio Villa Conchita
	14	Sector La Granja
	15	URB San Carlos
	16	Barrio La Cruz
	17	Barrio Santa Barbara
	18	Barrio Olimpico
	19	URB Bethel etapa 2
Uso Actual	1	Residencial
	2	Lote
	3	Comercio
	4	Público

Campo	Valores y Dominio	
Tipo de Construcción	1	Mampostería Simple
	2	Mampostería Confinada
	3	Mampostería Reforzada
	4	Pórticos de Concreto
	5	Muros en Concreto Reforzado
	6	Lote
	7	Bahareque
	8	Ruina
	9	Otro
	10	Estructura Metalica
Clase de construcción	1	Vivienda
	2	Bodega
	3	Edificio
	4	No construido
	5	En construcción
	6	Escuela
Numero de pisos	Editable	
Tipo de cubierta	1	Tejas plásticas
	2	Tejas metálicas
	3	Tejas de barro
	4	Concreto
	5	Asbesto
	6	No tiene
Estado del edificio	1	Muy bueno
	2	bueno
	3	regular
	4	malo
	5	Muy malo
Daños	True o False	

3. **Asignación de datos:** Finalmente, se diligenció la información de cada polígono o estructura existente en el municipio, asignando los valores correspondientes de acuerdo con los dominios previamente establecidos (Figura 21)

Figura 21 Valores de dominio y diligenciamiento de la capa de polígonos.

Contrucción_R_Medina— Objetos Totales: 1829, Filtrados: 1829, Seleccionados: 0

Barrio	Uso_actual	Clas_Const	Tipo_Const	Num_Pisos	Tp_Cubiert	EstadoEdif	Dafios
1477 URB Villa Diana	Residencial	Vivienda	Mampostería Reforzada	1	Asbesto	bueno	falso
1478 URB Villa Diana	Residencial	Vivienda	Mampostería Reforzada	1	Asbesto	bueno	falso
1479 URB Villa Diana	Residencial	Vivienda	Mampostería Reforzada	1	Asbesto	bueno	falso
1480 URB Villa Diana	Residencial	Vivienda	Mampostería Reforzada	1	Asbesto	bueno	falso
1481 (NUELA)	Público	Bodega	Mampostería Simple	1	Tejas metálicas	malas	falso
1482 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Mampostería Simple	1	Tejas metálicas	bueno	falso
1483 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Mampostería Confinada	1	Asbesto	bueno	falso
1484 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Mampostería Reforzada	1	Tejas metálicas	bueno	falso
1485 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Pórticos de Concreto	2	Tejas metálicas	bueno	falso
1486 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Muros en Concreto Reforzado	1	Tejas metálicas	bueno	falso
1487 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Lote	1	Tejas metálicas	bueno	falso
1488 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Bahareque	1	Tejas metálicas	bueno	falso
1489 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Ruina	1	Tejas metálicas	bueno	falso
1490 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Otro	1	Tejas metálicas	bueno	falso
1491 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Estructura Metálica	1	Tejas metálicas	bueno	falso
1492 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Mampostería Simple	1	Tejas metálicas	bueno	falso
1493 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Mampostería Simple	1	Asbesto	bueno	falso
1494 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Mampostería Simple	1	Tejas metálicas	bueno	falso
1495 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Mampostería Simple	1	Asbesto	bueno	falso
1496 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Mampostería Simple	1	Tejas metálicas	bueno	falso
1497 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Mampostería Simple	1	Asbesto	bueno	falso
1498 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Mampostería Simple	1	Asbesto	bueno	falso
1499 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Mampostería Simple	1	Asbesto	bueno	falso
1500 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Mampostería Simple	1	Asbesto	bueno	falso
1501 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Mampostería Simple	1	Asbesto	bueno	falso
1502 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Mampostería Simple	1	Tejas metálicas	bueno	falso
1503 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Mampostería Simple	1	Tejas metálicas	bueno	falso
1504 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Mampostería Simple	1	Tejas metálicas	bueno	falso
1505 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Mampostería Simple	1	Tejas metálicas	bueno	falso
1506 Barrio Centro	Residencial	Vivienda	Mampostería Simple	1	Tejas metálicas	bueno	falso

6.2. Selección, caracterización y transporte de los culmos de guadua.

Para el desarrollo de la investigación, se seleccionaron culmos de guadua con una edad comprendida entre los tres y cinco años, estado de maduración conocido coloquialmente como "guadua jecha". En esta etapa, la planta alcanza sus propiedades de adulta, completando su ciclo de maduración y adquiriendo una alta resistencia mecánica. Físicamente, esta fase se identifica por la presencia de manchas blancas o líquenes en su superficie (Figura 22) y por la caída de sus hojas caulinares (Figura 23)

Figura 22 *Liquenes (manchas blancas).*



Figura 23 *Vista en planta del culmo de guadua.*



Una vez identificados los culmos adecuados, se procedió a realizar el corte en la base, específicamente sobre el segundo nudo, con el propósito de dejar un excedente que permitiera el retoño de nuevas plantas. Posteriormente, la guadua se trozó en longitudes de varios entrenudos para facilitar su descenso cuidadoso al suelo. A continuación, se rotularon los entrenudos en orden ascendente desde la parte inferior, asignando la nomenclatura desde C1 hasta C21, de acuerdo con la sección correspondiente del culmo (cepa, basa, sobrebasa y varillón), tal como se detalla en la Tabla 9 y se ilustra en la vista en planta de la Figura 24

Tabla 9 *Muestras de entrenudos según partes del culmo*

Muestra	Parte del culmo
Parte Inferior	
C1	Cepa
C2	Cepa
C3	Cepa
C4	Cepa
C5	Cepa
C6	Cepa
C7	Cepa
C8	Basa
C9	Basa
C10	Basa
C11	Basa
C12	Sobrebasa
C13	Sobrebasa
C14	Sobrebasa
C15	Sobrebasa
C16	Sobrebasa
C17	Varillón
C18	Varillón
C19	Varillón
C20	Varillón
C21	Varillón
Parte superior	

Figura 24 *Vista en planta de las muestras de entrenudos para la extracción*

Concluido el rotulado, las secciones del culmo se transportaron en un vehículo hasta un lugar de acopio temporal, donde se almacenaron durante una noche bajo condiciones frescas. Al día siguiente, se extrajeron los nodos ubicados entre los entrenudos para aislar y obtener únicamente la fibra axial del culmo. Finalmente, el material se trasladó a los laboratorios de la Universidad Santo Tomás, donde fue almacenado adecuadamente para proceder con la medición de sus masas y longitudes, completando así la caracterización física de los entrenudos (Tabla 10).

Tabla 10 Características físicas de los entrenudos de guadua según posición en el culmo

Muestra	Parte del culmo	Masa (g)	Longitud (cm)
Parte Inferior			
C1	Cepa	1186	16
C2	Cepa	1268	18
C3	Cepa	1238.5	17
C4	Cepa	1018	17
C5	Cepa	996.9	17.5
C6	Cepa	944.4	17
C7	Cepa	750	15.5
C8	Basa	837.8	20
C9	Basa	598	18
C10	Basa	774.7	21
C11	Basa	678.7	21
C12	Sobrebasa	696	24
C13	Sobrebasa	513.7	24
C14	Sobrebasa	435.5	22
C15	Sobrebasa	417.6	22
C16	Sobrebasa	277.1	17
C17	Varillón	395.53	25
C18	Varillón	421.13	27.5
C19	Varillón	427.5	29
C20	Varillón	388.4	28
C21	Varillón	409.7	29.5
Parte superior			

6.3. Extracción de fibra por el método combinado Químico mecánico modificado.

Una vez obtenidos los entrenudos, se procedió a realizar el primer pretratamiento mediante un método químico alcalino utilizando hidróxido de sodio (NaOH), comúnmente conocido como soda cáustica, a una concentración del 1 %. El objetivo de este proceso fue debilitar la celulosa de la epidermis externa para facilitar su posterior retiro. Para ello, se sumergió cada entrenudo en un recipiente de polietileno de alta densidad (PEAD). En cada recipiente se determinó la masa del agua (solvente) necesaria para cubrir la totalidad de los entrenudos, permitiendo así calcular la cantidad exacta en gramos de NaOH (solute) requerida para la solución. A modo de ejemplo, en uno de los recipientes (Figura 25), una vez tarada la báscula, se registró una masa de agua de 12,81 kg, lo que determinó una necesidad de 128 g de NaOH (Figura 26). Con todas las probetas sumergidas, los recipientes se dejaron en reposo durante un período de cinco días (Figura 27)

Figura 25 Recipiente PEAD con entrenudos sumergidos

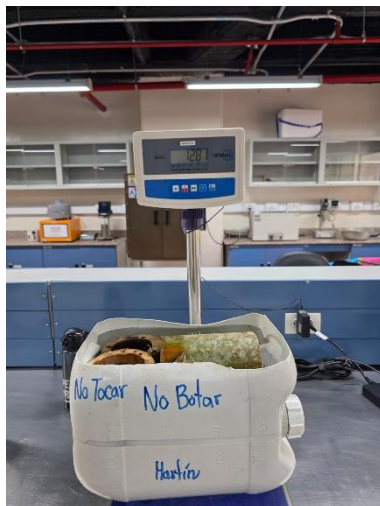


Figura 26 Soluto de NaOH.



Figura 27 *Entrenudos sumergidos en NaOH por 5 días.*



Transcurrido este tiempo, y con la ayuda de unas tenazas, se retiró la epidermis o copa externa de cada entrenudo extrayéndola en forma de tiras (Figura 28) Dado que esta parte superficial del culmo de la guadua carece de propiedades físicas de adherencia, su remoción es un paso fundamental para aislar y conservar únicamente la fibra estructural (Figura 29).

Figura 28 *Retiro de la epidermis con unas tenazas.*

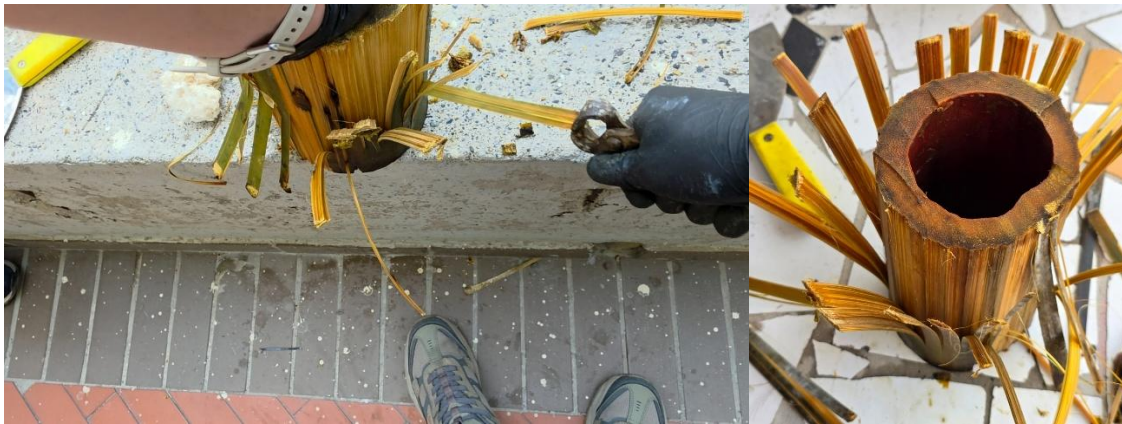


Figura 29 Fibras de los entrenudos tras la remoción de la epidermis externa.



Posteriormente, se realizó la seccionización de estos entrenudos en partes más pequeñas e individuales (Figura 30) Para este propósito, se utilizó una herramienta mecánica construida a partir de un tubo de acero al carbono de 8 pulgadas, la cual cuenta con un conjunto de cuchillas de guadaña o cortacésped soldadas internamente mediante soldadura de electrodo (Figura31). Se optó por esta herramienta debido a que permite realizar la división de secciones de forma más rápida y eficiente.

Figura 30 Secciones de la fibra axial del entrenudo**Figura 31** Cortador de secciones de guadua

Si bien existen otros métodos, como el RMT (que consiste en pasar los entrenudos entre dos rodillos de acero, uno fijo y otro giratorio) o el CMT (que implica colocar los entrenudos entre dos placas planas y ejercer una fuerte carga de compresión), estos presentaban limitaciones

prácticas. La infraestructura necesaria para el RMT es de escala industrial, mientras que para el CMT se utilizó la máquina universal del laboratorio de concretos (Figura 32); sin embargo, este último proceso demandaba un tiempo considerable, ya que la máquina solo tenía capacidad para un entrenudo a la vez y requería subir y bajar la placa repetidamente. Por consiguiente, se ingenió la construcción de este cortador de guadua, con el único requerimiento de que, tras cada corte, las secciones debían amarrarse para ser procesadas nuevamente hasta obtener las dimensiones mínimas posibles (Figura 33). Se decidió iniciar el proceso con los entrenudos de la parte superior, correspondientes al varillón, debido a que, de acuerdo con Estrada Mejía (2009), esta sección presenta un mayor contenido de fibras y un menor porcentaje de lignina. Luego, se continuó con las partes inferiores de basa y sobrebasa.

Figura 32 Método CMT con maquina universal.



Figura 33 Secciones de fibra amarradas para utilizar el cortador de secciones.



Una vez obtenida la fibra necesaria, se procedió a sumergirla nuevamente en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) a una concentración del 1 % durante un periodo de cuatro días (Figura 34).

Figura 34 Secciones de fibra de guadua para sumergir en NaOH 1%



A continuación, se llevó a cabo la etapa manual, consistente en desmenuzar estas secciones para extraer la fibra (Figura 35). En este punto, el material se encontraba en un estado flexible o de delignificación, puesto que había perdido la lignina su aglutinante natural, lo que permitía separar las fibras entre sí. Este proceso tuvo una duración de seis horas y se realizó utilizando las manos y un alicate como herramienta de apoyo (Figura 36).

Figura 35 *Fibras de las secciones de guadua para desfibrar*



Figura 36 *Fibra extraída de las secciones de guadua.*



Seguidamente, las fibras se enjuagaron y se dejaron en remojo en agua (Figura 37) durante cuatro horas, con el fin de que el NaOH residual se aflojara o se disolviera. Este remojo se mantuvo hasta que el agua adquirió el color oscuro característico del licor negro. Después, las fibras se dejaron escurrir por un tiempo de 24 horas para evacuar parcialmente este residuo (Figura 38).

Figura 37 *Enjuague y remojo de fibras.***Figura 38** *Escurrido y secado de las fibras*

Por último, fue necesario realizar un tratamiento de neutralización a estas fibras naturales de *Guadua angustifolia* Kunth, ya que la presencia de estos residuos, por mínimos que sean, podría afectar la fibra o la propia mezcla de concreto. Dado que la soda cáustica (NaOH) eliminó la lignina, si no se removía completamente, se podría provocar una excesiva delignificación que degradaría la

fibra; además, la reacción química del NaOH podría mantenerse activa y afectar el fraguado del cemento alrededor de la fibra, impidiendo una correcta adherencia. Es por ello que se utilizó ácido acético (CH_3COOH), presente comercialmente en el vinagre, empleando una dosificación del 5 % en agua; se realiza una mezcla de 20 tazas de agua por 1 taza de vinagre (Figura 39). Este compuesto, de acuerdo con JAM Group Co. (s.f.), se define como un ácido carboxílico simple que se caracteriza por ser un líquido claro e incoloro con un olor fuerte y penetrante. Gracias a su naturaleza ácida suave, en comparación con otros ácidos fuertes como el sulfúrico o el clorhídrico, cuenta con aplicaciones versátiles tanto a nivel doméstico como industrial, destacándose como una opción ideal y segura para procesos de neutralización en situaciones donde se requiere un enfoque menos agresivo.

Figura 39 Solución dosificada con vinagre



De esta manera, se obtuvieron finalmente las fibras de *Guadua angustifolia* Kunth en condiciones óptimas para ser integradas como refuerzo en matrices cementicias, tales como el concreto y el mortero.

6.4. Preparación y caracterización de materiales

Con el propósito de evaluar la viabilidad técnica del uso de la fibra de *Guadua angustifolia* Kunth como refuerzo en materiales compuestos cementicios, se realizó la preparación de diversos especímenes y probetas de laboratorio con diferentes dosificaciones. Las mezclas de estudio se clasificaron de la siguiente manera:

- Muestra de control (sin refuerzo 0% Fibra)
- Muestra 0.5% de Fibra.
- Muestra 1% de Fibra.

En la Tabla 11 se relacionan las probetas y los especímenes que fueron elaborados, indicando las cantidades específicas requeridas para la ejecución de cada ensayo.

Tabla 11 *Cantidades de probetas y especímenes para cada ensayo*

Ensayo	Especimen/día	0% Fibra	0.5% Fibra	1% Fibra	Vol. Mortero/Concreto + Desp. (m³)
Compresión	6	18	18	18	0.0933
Flexión	3	9	9	9	0.3904
Muretes	3	3	3	3	0.0551

Asimismo, con el fin de determinar la cantidad de material necesario para la ejecución del proyecto, se estableció una dosificación para cada componente según el tipo de ensayo y resistencia esperada, tal como se detalla en la Tabla 12.

Tabla 12 *Cantidades totales de materiales para la ejecución de los ensayos*

Componente	Dosificación	Volumen (m³)	Cemento (kg)	Arena (m³)	Grava (m³)	Agua (L)	Bultos Cemento (50 kg)
Probetas Cilindro (Compresión)	2500 PSI	0.0933	27.99	0.0448	0.0896	15.86	1
Vigas (Flexión)	2500 PSI	0.3904	117.11	0.1874	0.3748	66.36	2
Pega (Muretes)	Mortero (1:2)	0.0263	16.03	0.0255	0.0000	6.57	0
Pañete (Muretes)	Mortero (1:3)	0.0288	13.08	0.0317	0.0000	7.20	0
TOTAL		0.5027	154.71	0.2523	0.4643	86.99 L	3
PEDIDO (redondeado)			3.00 Bultos 50kg	0.26 m³	0.5000 m³		3.00 Bultos 50kg

Finalmente, para simplificar los requerimientos individuales de cada tipo de muestra, en la Tabla 13 se presenta el resumen de la cantidad total de fibra de Guadua angustifolia Kunth necesaria para cada mezcla.

Tabla 13 *Resumen cantidades de Fibra de Guadua Angustifolia Kunth para cada mezcla.*

Ensayo	# Especímenes	Volumen (m ³)	Peso (kg)	Sin refuerzo 0%	Fibra 0.5%	Fibra 1%	Total
Compresión	18	0.03	67.86	0.00	0.34	0.68	1.02
Flexión	9	0.12	283.91	0.00	1.42	2.84	4.26
Muros	3	0.02	42.00	0.00	0.21	0.42	0.63
TOTAL	30	0.17	393.77	0.00	1.97	3.94	5.91 kg

A continuación, se detallan los diferentes materiales y elementos utilizados para la construcción de los especímenes destinados a las pruebas mecánicas:

6.4.1 Agregado

El agregado granular utilizado para fabricar el concreto fue adquirido en Agregados Guayuriba, la cual es una empresa dedicada a la extracción, trituración, lavado y comercialización de materiales pétreos. Se adquirió gravilla de $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{8}$ y arena de trituración; para su dosificación se realizó la siguiente caracterización:

Tabla 14 *Caracterización Agregado para dosificación de concreto.*

Agregado	Volumen del molde (m ³)	Masa del agregado (kg)	Densidad aparente (kg/m ³)
Grueso	0.00604	7.70	1,274.43
Fino	0.00190	2.30	1,210.10

Además se adquirió arena aluvial de río para la elaboración del mortero, a la cual se le realizó el respectivo análisis granulométrico (Tabla 15) conforme a los lineamientos de la norma NTC 2240. Dicha norma establece los requisitos técnicos que deben cumplir los agregados empleados en morteros de mampostería, exigiendo que el material evaluado se encuentre dentro de

los límites inferiores y superiores permitidos (Figura 41). Para verificar este cumplimiento, se tomó una muestra de la arena, la cual fue procesada a través de los diferentes tamices reglamentarios (Figura 40).

Figura 40 Muestra de arena para tamizar y realizar la granulometría

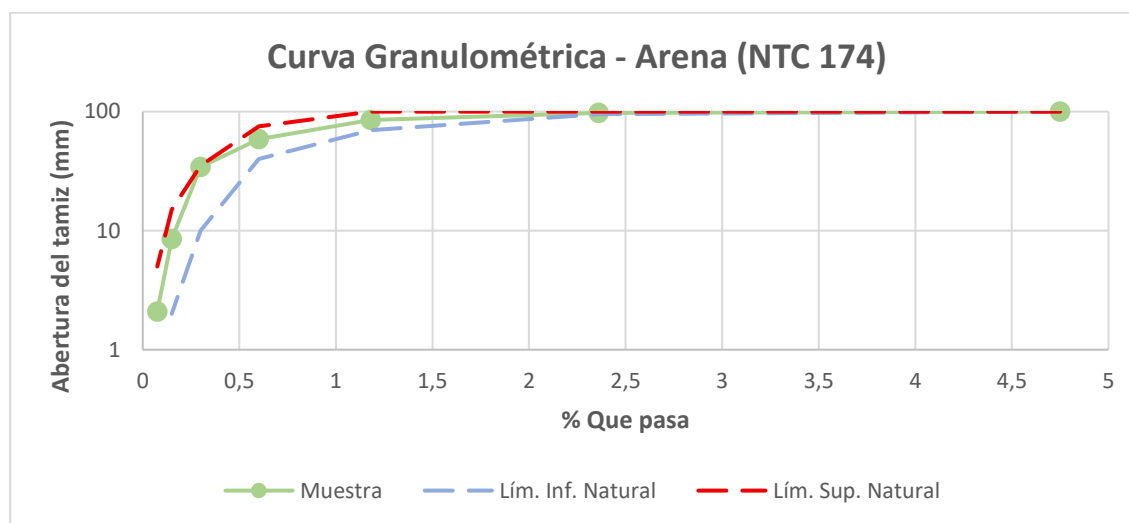


Tabla 15 Granulometría Arena para mortero

Tamiz NTC	Porcentaje que pasa: Arena natural	Porcentaje que pasa: Arena triturada	Masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa
4,75 mm (No. 4)	100	100	1.60	0.67	0.67	99.33
2,36 mm (No. 8)	95 a 100	95 a 100	3.90	1.63	2.30	97.70
1,18 mm (No. 16)	70 a 100	70 a 100	75.00	31.33	33.63	66.37
600 μ m (No. 30)	40 a 75	40 a 75	18.70	7.81	41.44	58.56
300 μ m (No. 50)	10 a 35	20 a 40	58.00	24.23	65.66	34.34
150 μ m (No. 100)	2 a 15	10 a 25	35.00	14.62	80.28	19.72
75 μ m (No. 200)	0 a 5	0 a 10	42.20	17.63	97.91	2.09
Fondo (Pasa)	-	-	5.00	2.09	-	-

Tamiz NTC	Porcentaje que pasa: Arena natural	Porcentaje que pasa: Arena triturada	Masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa
No. 200)						
Masa total (g)			239.40	100.00		
Módulo de finura	2.24					

Figura 41 Curva granulométrica Arena para Mortero, Ensayo NTC 174.



6.4.2 Mortero

Para el mortero de pega se realizó una dosificación estándar de 1:2 y para mortero de pega una dosificación de 1:3 (Tabla 16) las cantidades para la elaboración de cada muestra se presentan en la Tabla 17.

Tabla 16 Dosificación para mortero

DOSIFICACION MORTERO (m³)			
Tipo	Cemento (kg)	Arena (m³)	Agua (L)
(1:2)	610	0.97	250
(1:3)	454	1.10	250
(1:4)	364	1.16	240
(1:5)	302	1.20	240
(1:6)	261	1.20	235

Tabla 17 Cantidad de material para cada muestra (Control 0%, Fibra 0.5% y Fibra 1%)

MATERIAL	PEGA (1:2)	PAÑETE (1:3)	Vol.Total (m ³)	Peso Mortero
CEMENTO (kg)	4.0	0.0	4.1 kg	4.1 kg
ARENA (m ³)	0.0064	0.0001	0.0065 m ³	11.7 kg
Grava (m ³)	-	-	0.0 m ³	
AGUA (L)	1.6	0.0240	1.7 L	1.6 kg
Fibra 0.5%				0.210 kg
Fibra 1%				0.420 kg

6.4.3 Unidades de Mampostería

Las unidades de mampostería seleccionadas para el ensayo, conforme a los lineamientos de la NTC 4205, correspondieron a bloques de mampostería macizos (Figura 42) Estas unidades presentan unas dimensiones de 10 cm de ancho, 20 cm de largo y 6 cm de alto.

Figura 42 Bloque macizo Tolete

Nota. Tomado de *Tolete Macizo No 5 20X10X6*, por Metropolis Center, s.f.

De acuerdo con la norma NTC 4925, la cual indica el método de ensayo para determinar la resistencia a la tracción diagonal (cortante) en muretes de mampostería, se ejecutaron los procedimientos detallados en Tabla 18 para su respectiva fabricación y ensayo.

Tabla 18 Pasos para ensayo de resistencia a la tracción diagonal (Cortante)

Paso	Descripción
Paso 1	Se deben construir por lo menos tres especímenes similares (muretes) con un tamaño nominal de 1,2 m x 1,2 m.
Paso 2	Por cada batchada de mortero utilizada, se deben elaborar tres cubos de 50 mm de lado para evaluar su resistencia a la compresión, los cuales se ensayarán el mismo día que su respectivo murete.
Paso 3	Curado: los muretes no se deben mover durante al menos 7 días después de su construcción. Posteriormente, se deben almacenar en el laboratorio durante al menos 28 días a una temperatura de $24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 8\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una humedad relativa entre 25 % y 75 %, y libres de corrientes de aire.
Paso 4	Posicionamiento del murete en la máquina de ensayo.
Paso 5	Aplicación de la carga: la carga debe ser aplicada por la máquina de manera continua y sin impacto. El método varía según la instrumentación.
Paso 6	Con instrumentación: la carga se aplica en incrementos para obtener al menos 10 lecturas de deformación o esfuerzo a medida que avanza el ensayo. Cuando el murete muestre signos de que puede fallar abruptamente, se retiran los instrumentos para evitar que se dañen y se continúa aplicando la carga continuamente hasta determinar la carga máxima.

Tal como se evidenció en Tabla 11 se elaboraron tres muretes por cada muestra (control 0 %, adición del 0,5 % y adición del 1 %). Cada murete se conformó por tres bloques macizos y presentó un espesor de pega entre bloques de 1,5 cm y un espesor de pañete de 2 cm. Para las muestras con adición del 0,5 % y 1 %, se emplearon fibras con una longitud de 3 cm. Es pertinente destacar que la NTC 4925, en su nota 1, menciona que se puede utilizar un espécimen de tamaño más pequeño si el equipo de ensayo carece de la capacidad para contener el espécimen cuadrado estándar de 1,2 m de lado. Sin embargo, la misma norma advierte que existe una carencia de información experimental que permita evaluar el efecto del tamaño de la muestra en la resistencia al cortante, o que permita correlacionar los resultados de los ensayos en especímenes a pequeña escala con especímenes más grandes.

Adicionalmente, los cubos de mortero de 50 mm de lado requeridos por la norma no fueron elaborados debido a la falta de disponibilidad de los moldes reglamentarios para el ensayo. Esta omisión se justifica en que la evaluación de la resistencia a la compresión para esta investigación se llevó a cabo directamente sobre el concreto mediante probetas cilíndricas.

Tras la construcción de los muretes, estos se sometieron a un proceso de curado durante 28 días, envueltos en plástico vinipel. Este material actuó como una barrera de vapor, reteniendo el agua de la mezcla y evitando la pérdida de la humedad interna (Figura 43). Se omitió el reposo inicial de siete días solicitado por la norma, cuyo fin original es evitar movimientos que puedan

generar microfisuras internas o desarmar el espécimen antes de que el mortero alcance su resistencia. En este caso, al ser las muestras de un tamaño considerablemente menor, fue posible trasladarlas inmediatamente al laboratorio hacia un entorno controlado y libre de corrientes de aire para su almacenamiento seguro (Figura 44).

Figura 43 Cubrimiento de los muretes con plástico vinipel



Figura 44 Almacenamiento de muretes en el laboratorio



A continuación, se detalla el comportamiento durante la construcción de los tres muretes correspondientes a cada muestra evaluada:

Muestra control 0%. Esta muestra se caracterizó por presentar una óptima maleabilidad natural, atribuida a la ausencia de refuerzo de fibra. Por consiguiente, su proceso de construcción se desarrolló de manera ágil y sencilla (Figura45).

Figura 45 Construcción de los Muretes de la muestra de control 0%



Muestra 0.5% de Fibra. Se realizó la respectiva dosificación estándar de mortero incorporando una adición de fibra equivalente al 0,5 % del peso total de la mezcla (Figura 46), Se evidenció que la maleabilidad se mantuvo en un nivel aceptable, con una consistencia equiparable a la de la mezcla de control. Asimismo, al momento de pañetar los muretes, la mezcla presentó una adherencia adecuada y permitió un acabado estético satisfactorio (Figura 47).

Figura 46 Dosificación de Fibra al 0.5%



Figura 47 *Murete con adición de fibra al 0,5 %*



Muestra 1% de Fibra. Durante la construcción de los tres muretes correspondientes a esta dosificación, se evidenció una pérdida significativa de la maleabilidad en la mezcla. Este comportamiento se atribuye directamente al incremento en el porcentaje de adición de fibra (1 %), lo cual generó mayor fricción y dificultad durante su aplicación (Figura 48).

Figura 48 *Preparación de la mezcla de mortero con adición de fibra al 1 %*



6.4.4 Concreto

Para la elaboración de los especímenes, se diseñó una mezcla de concreto con una resistencia esperada de 2500 PSI, utilizando una dosificación estándar como referencia base, tal como se detalla en la Tabla 19.

Tabla 19 Dosificación estándar para mezclas de concreto

Resistencia (PSI)	Cemento (kg/m³)	Arena (m³/m³)	Grava (m³/m³)	Agua (L/m³)
3,500 PSI	420	0.67	0.67	220
3,000 PSI	350	0.56	0.84	180
2,500 PSI	300	0.48	0.96	170
2,000 PSI	260	0.63	0.83	170

A partir de este diseño, se determinaron las proporciones específicas en volumen y masa requeridas para la elaboración de las muestras de control y las muestras con adición de fibra. Las cantidades totales calculadas para la fundición de los cilindros y las vigas de concreto se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20 Cantidades de material requeridas para cada mezcla de concreto.

MATERIA L	Probetas cilindros	Vigas	Vol. Total (m³)	Aporte en el Concreto
	2500 PSI	2500 PSI		
CEMENTO (kg)	8.48	35.49	43.97 kg	43.97 kg
ARENA (m³)	0.06	0.06	0.11 m³	137.42 kg
Grava (m³)	0.03	0.11	0.14 m³	179.32 kg
AGUA (L)	4.81	20.11	24.92 L	18.21 L
			Subtotal Agregado	316.7 kg
			Total concreto	378.9 kg

Una vez establecidas las cantidades, se procedió a realizar el pesaje de los materiales en el laboratorio, clasificando los agregados según su tamaño nominal (Figura 49). Este proceso se fundamentó en la curva granulométrica ideal para la mezcla de concreto, cuyos valores detallados de porcentajes pasantes y retenidos se especifican en la Tabla 21.

Figura 49 Pesaje de agregado según tamaño requerido**Tabla 21** Granulometría ideal para la mezcla de concreto por muestra

Agregado	Tamiz	% Pasa	% Retenido	Volumen Retenido (m ³)	Peso (kg)
Grueso	1"	100.0%			
	¾"	83.5%	16.5%	0.0420	53.47
	½"	73.5%	10.0%	0.0254	32.41
	3/8"	54.5%	19.0%	0.0483	61.57
	#4	40.0%	14.5%	0.0369	44.62
	Subtotal Grueso		60.0%	0.1526	192.06
Fino	#8 (Arena)	30.0%	10.0%	0.0254	30.77
	#16 (Arena)	22.5%	7.5%	0.0191	23.08
	#30 (Arena)	16.5%	6.0%	0.0153	18.46
	#50 (Arena)	12.5%	4.0%	0.0102	12.31
	#100 (Arena)	9.5%	3.0%	0.0076	9.23
	Fondo		9.5%	0.0242	29.23
	Subtotal Fino		40.0%	0.1017	123.08
TOTAL			100.0%	0.2543	315.14

Posteriormente, los materiales se incorporaron en la mezcladora mecánica, integrando inicialmente los agregados, el cemento y el agua para conformar y fundir la mezcla de control (0 % de fibra). Para las muestras con fibra, se pesó la fibra de guadua previamente extraída y cortada a una longitud de 5 cm, medida comercial estándar para macrofibras de refuerzo en concreto (Figura 50) La adición de estas fibras a la matriz cementicia se realizó de forma gradual y uniforme

mientras la mezcladora se encontraba en rotación, garantizando una correcta homogeneización para las dosificaciones del 0,5 % y 1 % establecidas (Figura 51)

Figura 50 Pesaje del refuerzo de fibra de 5cm de longitud



Figura 51 *Adición de fibra a mezcla de 0.5%*



Finalmente, la mezcla fresca se vertió en los moldes cilíndricos y prismáticos (vigas). Transcurridas 24 ± 8 horas desde su fundición, los especímenes fueron desencofrados y trasladados a la piscina de curado por inmersión. Allí permanecieron bajo condiciones óptimas de humedad hasta alcanzar sus respectivas edades de ensayo a los 7, 14 y 28 días (Figura 52).

Figura 52 Curado de especímenes cilíndricos y vigas de concreto por inmersión.



6.5. Técnica de análisis de datos y procesamiento de información

El criterio de Chauvenet es un método estadístico empleado para determinar si un dato experimental (considerado como "dato dudoso") representa un valor atípico o anomalía dentro de un conjunto de mediciones. De acuerdo con Bobbitt (2022), este método parte del supuesto fundamental de que los valores del conjunto de datos analizado siguen una distribución normal. El procedimiento consiste en calcular, en primera instancia, la media y la desviación estándar de la muestra. Posteriormente, se determina la desviación de cada valor individual mediante el cálculo de la diferencia absoluta entre el dato dudoso y la media, dividiendo este resultado entre la desviación estándar (Véase la Ecuación 1)

Ecuación 1

$$\tau = \frac{x - \bar{x}}{s}$$

Donde:

τ = Desviación de cada valor individual.

x = Es el valor de cada dato del conjunto de datos.

$\bar{x}$ = Es el promedio del conjunto de los datos.

s = Es la desviación estándar del conjunto de datos.

Seguidamente, se define el valor crítico del criterio de Chauvenet (véase la Tabla 22), el cual depende del número n de datos. Una vez conocido este límite, los valores individuales cuya desviación sea mayor que la indicada en la tabla se declaran como valores atípicos (*outliers*) (Bobbitt, 2022).

Tabla 22 *Valores críticos del criterio de Chauvenet*

n	Critical Value
2	1.15
3	1.383
4	1.534
5	1.645
6	1.732
7	1.803
8	1.863
9	1.915
10	1.96
11	2
12	2.037
13	2.07
14	2.1
15	2.128
16	2.154
17	2.178
18	2.2
19	2.222
20	2.241
21	2.26
22	2.278
23	2.295
24	2.311
25	2.326
26	2.341
27	2.355

n	Critical Value
28	2.369
29	2.382
30	2.394
31	2.406
32	2.418
33	2.429
34	2.44
35	2.45

Nota. Tomado de Chauvenet's Criterion: Definition & Example, por Z. Bobbitt, 2022, Statology.

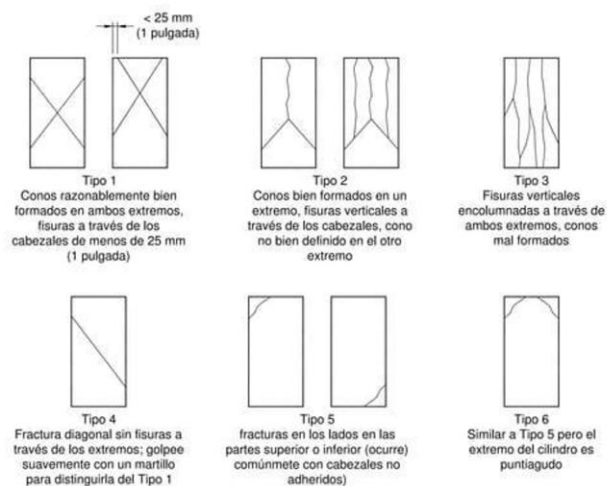
6.6. Caracterización física

6.6.1 Caracterización fisuras de probetas de concreto

En la presente investigación y a la hora de realizar el ensayo de compresión se tomaron fotografías frontales y laterales las cuales permitieron determinar el tipo de fisura o fractura.

Para esta caracterización se basó en la NTC 673 en su sección 7.6 donde evidencia un esquema de los modelos de fractura típicos al realizar el ensayo de compresión (Figura 53).

Figura 53 Esquema de los modelos de fractura típicos



Nota. Tomado de la Norma Técnica Colombiana NTC 673 (p. 9), por Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2010.

6.6.2 Ensayo de contenido de humedad

Inicialmente, se extrajeron secciones prismáticas del entrenudo para ser utilizadas como probetas en la determinación del contenido de humedad del culmo de guadua. Estas probetas presentaron dimensiones promedio de 2 cm de largo y ancho por 2.5 cm de espesor. Posteriormente, se almacenaron en bolsas de cierre hermético (Ziploc) para garantizar que su contenido de humedad permaneciera inalterado antes del ensayo. En el laboratorio, las probetas fueron rotuladas bajo la nomenclatura CHIXX y CHSXX, donde "CHI" indica el contenido de humedad de la parte inferior del culmo, "CHS" el contenido de humedad de la parte superior, y "XX" corresponde al número de identificación de cada probeta (Figura 54).

Figura 54 Rotulado de probetas.



A continuación, se determinó la masa de cada sección utilizando una balanza con una exactitud de $\pm 0,01$ g. Seguidamente, las probetas se introdujeron en un horno de secado a una temperatura de $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (véase la Figura 4).

Figura 55 *Horno de secado.*

Se registró la masa transcurridas 6 horas desde su secado inicial, ya luego dadas las condiciones de acceso al laboratorio, se realizaron mediciones adicionales a las 24 y 30 horas. Este procedimiento se repitió hasta alcanzar una masa constante, es decir, hasta que la diferencia entre dos determinaciones de masa sucesivas no excediera los 0,01 g. Luego, siguiendo NTC 206-1 de los lineamientos del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC, 2005), se determinó el contenido de humedad a partir de la Ecuación 2:

Ecuación 2

$$\%CH = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100$$

En donde:

m = masa de la probeta antes del sacado, en g.

m₀ = masa de la probeta después del secado, en g.

Finalmente, se calculó la media aritmética de los resultados obtenidos para las probetas individuales, registrando este valor como el promedio del contenido de humedad de las probetas (ICONTEC, 2005, p. 3).

6.7. Caracterización Mecánica

La metodología empleada para llevar a cabo la caracterización mecánica del concreto (ensayos de compresión y flexión) y de los muretes de mampostería (ensayo de tracción diagonal o cortante) se ejecutó en estricto cumplimiento con las especificaciones de la NTC detalladas previamente en el Marco normativo. Cada uno de los especímenes fue ensayado a las edades de curado correspondientes, tal como se detalla en el cronograma de la Tabla 23.

Tabla 23 *Cronograma de ensayo de los especímenes según su edad de curado*

Ensayo / Días	7	14	28
Compresión	21-abr	28-abr	12-may
Flexión	21-abr	28-abr	12-may
Muretes (Cortante)	-	-	7-may

Para la ejecución de las pruebas físicas se utilizó una máquina universal de ensayos ALFA UTM-001/LCD con una capacidad de carga de 2000 kN. En este equipo se llevaron a cabo los ensayos de compresión, empleando accesorios de neopreno como sistema de distribución de esfuerzos, y los ensayos de flexión, mediante la instalación del montaje de tercios medios (Figura 56).

Adicionalmente, se hizo uso de una máquina de compresión Matest Automatic modelo C025A, equipada con un extensómetro y compresómetro modelo C133 (Figura 57). Esta instrumentación permitió medir con alta precisión las deformaciones longitudinales y transversales de los cilindros de concreto bajo esfuerzo, datos fundamentales para la determinación del módulo de elasticidad y la relación de Poisson del material. No obstante, debido a restricciones operativas asociadas al mantenimiento del equipo, la medición instrumentada de estas propiedades se limitó a los especímenes con edad de curado de 28 días. Por consiguiente, el lote de seis probetas correspondiente a dicha edad se dividió en dos grupos de análisis: tres cilindros se fallaron en la máquina universal para el registro estándar de la resistencia a la compresión, y los tres cilindros restantes se ensayaron en la máquina Matest instrumentada con el extensómetro.

Finalmente, para ejecutar la prueba de cortante en los muretes de mampostería, se fabricaron e instalaron accesorios de soporte metálicos adaptados específicamente a los requerimientos geométricos y de aplicación de carga diagonal establecidos en la norma NTC 4925 (Figura 58).

Figura 56 *Máquina universal ALFA UTM-001/LCD de 2000 kN con accesorio de tercios medios*



Figura 57 *Máquina Matest Automatic C025A equipada con accesorio extensómetro C133*



Figura 58 Adaptación de los soportes de carga para el ensayo de muretes según la NTC 4925

6.7.1 Ensayo de Resistencia a la compresión del concreto

Para evaluar la resistencia a la compresión se ensayaron probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura (4" x 8"). Los ensayos se ejecutaron a edades de curado de 7, 14 y 28 días, fallando un total de seis probetas diarias por cada tipo de mezcla (control del 0 %, adición del 0,5 % y adición del 1 % de fibra). Para la ejecución de la prueba, cada cilindro fue posicionado en la máquina universal de ensayos, alineando rigurosamente su eje central con el centro de empuje del bloque de apoyo superior.

Posteriormente, se aplicó la carga de compresión de manera continua, automática y sin impactos. Esta carga se mantuvo de forma ininterrumpida hasta que el indicador de fuerza evidenció un decrecimiento constante, lo cual indicó que el espécimen había alcanzado su capacidad máxima de carga y presentaba un patrón de fractura bien definido.

Esfuerzo ultimo a la compresión. Para determinar el esfuerzo máximo, la resistencia a la compresión de cada probeta se calculó dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo por el área promedio de la sección transversal del cilindro, tal como se expresa en la Ecuación 3. Adicionalmente, se documentó la fractura que presentó cada espécimen al fallar.

Ecuación 3

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

Donde:

σ = Esfuerzo máximo [MPa].

P = Carga máxima aplicada [N].

A = Área de la sección transversal del cilindro [mm²].

Determinación del Módulo de Elasticidad y Relación de Poisson. A continuación, se detalla el procedimiento analítico empleado para determinar las propiedades de Módulo de Elasticidad y Relación de Poisson del concreto, siguiendo las indicaciones establecidas en la Norma Técnica Colombiana NTC 4025 (Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión).

Módulo de Elasticidad (E). Este parámetro se determinó evaluando la relación esfuerzo-deformación en el rango elástico del material. Se calculó utilizando el esfuerzo correspondiente al 40 % de la carga máxima y el esfuerzo asociado a una deformación longitudinal unitaria de 50 millonésimas (0.000050 mm/mm), aplicando la Ecuación 4.

Ecuación 4

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.000050}$$

Donde:

E = Modulo de elasticidad [MPa].

S₂ = Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga ultima [Mpa].

S₁ = Esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal ε_1 de las 50 millonésimas [Mpa].

ε_2 = Deformación longitudinal producida por el esfuerzo S₂ [mm/mm].

Relación de Poisson (v). La relación de Poisson se calculó como el cociente entre la diferencia de las deformaciones unitarias transversales y la diferencia de las deformaciones unitarias longitudinales, evaluadas en los mismos niveles de esfuerzo definidos para el módulo de elasticidad, tal como se expresa en la Ecuación 5.

Ecuación 5

$$v = \frac{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_2 - 0.000050}$$

Donde:

v = Relación de Poisson.

ε_{t2} = Deformación unitaria transversal producida por el esfuerzo S₂ [mm/mm].

ϵ_{t1} = Deformación unitaria transversal producida por el esfuerzo S_1 [mm/mm].

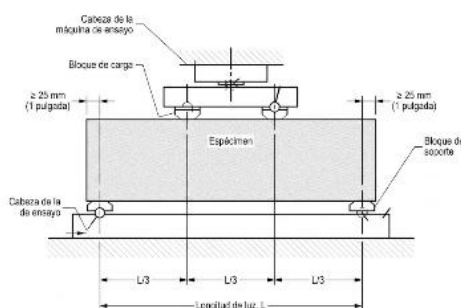
ϵ_2 = Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S_2 [mm/mm].

6.7.2 Ensayo de Resistencia a la flexión del concreto

Para el desarrollo de este ensayo, se utilizaron especímenes prismáticos (vigas) de concreto con dimensiones nominales de 155 mm de ancho, 155 mm de alto y 535 mm de longitud. Las vigas fueron falladas a los 7, 14 y 28 días de curado con el fin de obtener la carga máxima y la resistencia última, medida como el módulo de rotura en MPa [N/mm^2]. Para cada día de ensayo se falló un total de tres especímenes por muestra.

El posicionamiento del espécimen dentro del accesorio de tercios medios consistió en girar la viga de modo que la cara enrasada (cara superior de fundición) quedara orientada hacia la parte posterior. Seguidamente, se midió la longitud de la viga en sus tres caras lisas, seleccionando la de menor dimensión como referencia. Esta longitud se dividió en tres partes iguales, marcando con lápiz los límites del tercio central (Fiugra59 y Figura 60). El montaje final se dispuso garantizando una distancia entre apoyos (luz libre) de 495 mm.

Figura 59 Vista esquemática del método de carga en los tercios medios



Nota. Imagen adaptada de la NTC 2871.

Figura 60 Medición de una cara de la viga para el trazado del tercio central

Módulo de rotura. De acuerdo con los lineamientos establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 2871, el módulo de rotura se obtiene en función de la ubicación de la falla, evaluando las siguientes dos condiciones:

- a. **Condición 1:** Si la fractura se inicia en la superficie sometida a tensión *dentro* del tercio medio de la distancia entre apoyos, el módulo de rotura se calcula mediante la Ecuación 6:

Ecuación 6

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

Donde:

R = módulo de rotura [MPa].

P = carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensayo [N].

L = distancia entre apoyos, [mm].

b = ancho promedio del espécimen en la fractura [mm].

d = altura promedio del espécimen en el lugar de la fractura, mm (pulgadas).

- b. **Condición 2:** Si la fractura ocurre en la superficie sometida a tensión *por fuera* del tercio medio de la distancia entre apoyos, en no más de un 5 % de la luz libre, el módulo de rotura se calcula mediante la Ecuación 7:

Ecuación 7 Modulo de rotura condición 2.

$$R = \frac{3Pa}{bd^2}$$

de donde:

a = distancia promedio entre la línea de fractura y el soporte más cercano medido en la superficie de la viga sometida a tensión [mm].

6.7.3 *Ensayo de Resistencia a la tracción diagonal (cortante) en muretes de mampostería*

Tras culminar el período de curado de 28 días bajo condiciones controladas de laboratorio (Figura 61) los muretes fueron sometidos al ensayo de tracción diagonal conforme a los lineamientos de la Norma Técnica Colombiana NTC 4925 (ICONTEC, 2001). El propósito fundamental de este ensayo es determinar la resistencia a cortante de la mampostería, así como establecer su módulo de rigidez, el cual representa la resistencia del material a deformarse frente a dichas cargas.

Figura 61 Muretes tras 28 días de curado listos para el ensayo.



Nota. En la parte superior se observan los especímenes aún con el recubrimiento de plástico vinipel y en la parte inferior, los muretes descubiertos y dispuestos para la aplicación de carga.

Para el registro de los desplazamientos, las probetas se instrumentaron con comparadores de carátula, lo que permitió medir el acortamiento de la diagonal vertical y el alargamiento de la diagonal horizontal bajo la acción de la carga (Véase Figura 58). Durante el procedimiento, la carga se aplicó en incrementos apropiados para registrar de manera efectiva las deformaciones. Sin embargo, con el propósito de salvaguardar los instrumentos de medición ante una posible falla

abrupta, la instrumentación fue retirada al alcanzar aproximadamente la mitad de la carga máxima esperada, en estricto cumplimiento de las prevenciones del numeral 6.4.2 de la NTC 4925. Posteriormente, se continuó aplicando la carga de manera ininterrumpida y a velocidad constante hasta alcanzar la rotura del espécimen (ICONTEC, 2001).

Para garantizar el control y la correcta trazabilidad de los especímenes durante el procesamiento de datos, se estableció un sistema de nomenclatura alfanumérica para la identificación individual de cada murete. Dicho sistema está estructurado bajo el formato **MUX-YY-DD**, en donde cada componente obedece a los siguientes criterios:

- **MU**: Identifica el tipo de elemento ensayado Murete.
- **X**: Indica el tipo de mezcla o dosificación evaluada según el porcentaje de adición de fibra (1 = Control al 0 %, 2 = fibra al 0.5 %, 3 = fibra al 1 %).
- **YY**: Corresponde al número consecutivo de la réplica ensayada dentro de cada grupo (01, 02 o 03).
- **DD**: Especifica la edad de curado del espécimen al momento de ejecutar la prueba mecánica, dada en días (28).

Con la información obtenida durante la fase instrumentada, se desarrolló la curva esfuerzo-deformación para cada espécimen. El procesamiento de datos consistió en calcular, en primera instancia, el esfuerzo a cortante (Ecuación 8) sobre el área neta del murete, la cual fue determinada aplicando la Ecuación 9. A continuación, se calculó la deformación por cortante (Ecuación 10) empleando los registros de acortamiento vertical y alargamiento horizontal.

Finalmente, a partir de estos dos parámetros, se determinó el módulo de rigidez (G) de la mampostería evaluada (Ecuación 11), el cual representa teóricamente la relación directa entre el esfuerzo y la deformación al corte. Geométricamente, este valor se obtiene calculando la pendiente inicial de la gráfica esfuerzo cortante vs. deformación por cortante, medida estrictamente dentro de la zona elástica del material.

Si bien normativas estándar, como la NTC 4025 para el módulo de elasticidad del concreto, establecen que esta pendiente debe definirse entre una deformación unitaria de 50 millonésimas y el 40 % del esfuerzo máximo, aplicar rígidamente este umbral para el presente ensayo de tracción diagonal resulta inadecuado. Por un lado, la respuesta elástica de estos materiales compuestos suele finalizar en niveles de esfuerzo mucho menores. Por otro lado, la precisión micrométrica requerida

para registrar las 50 millonésimas iniciales escapa a la sensibilidad de la instrumentación análoga empleada (comparadores de caratula).

Al respecto, autores como Catalán-Quiroz, Moreno-Martínez, Arroyo Matus y Galván (2019) advierten que en la mampostería el módulo de rigidez debe determinarse analizando directamente la zona elástica de las gráficas de esfuerzo cortante frente a deformación angular “deformación por cortante”, la cual suele desarrollarse en umbrales muy inferiores a los de la norma (típicamente entre el 15 % y el 20 % de la carga máxima).

Considerando este precedente teórico, y teniendo en cuenta las particularidades de lectura de la deformación mediante comparadores de carátula analógicos, en la presente investigación el módulo de rigidez (G) se determinó mediante un análisis gráfico de cada curva de esfuerzo cortante – deformación por cortante, extrayendo la pendiente secante exactamente en la zona elástica observable, garantizando así la validez y precisión del resultado.

Ecuación 8

$$S_s = \frac{0.707 \times C}{A_n}$$

Donde:

S_s = Esfuerzo a cortante [Mpa]

C = Carga aplicada [N]

A_n = Area neta de la muestra [mm²]

Ecuación 9

$$A_n = \frac{(l + a)}{2} \times (e \times n)$$

Donde:

l = longitud del espécimen [mm]

a = altura del espécimen [mm]

e = espesor total del espécimen [mm]

N = Porcentaje del área bruta de la unidad que es sólida, expresada en decimal.

Ecuación 10

$$\gamma = \frac{V + H}{g}$$

Donde:

γ = Deformación por cortante [mm/mm]

V= Acortamiento vertical, [mm]

H= Alargamiento horizontal [mm]

g = Longitud sobre la cual se realiza la medición [mm]

Ecuación 11

$$G = \frac{S_s}{\gamma}$$

Donde:

G= módulo de rigidez [MPa]

S_s = Esfuerzo a cortante [MPa]

γ = Deformación por cortante [mm/mm]

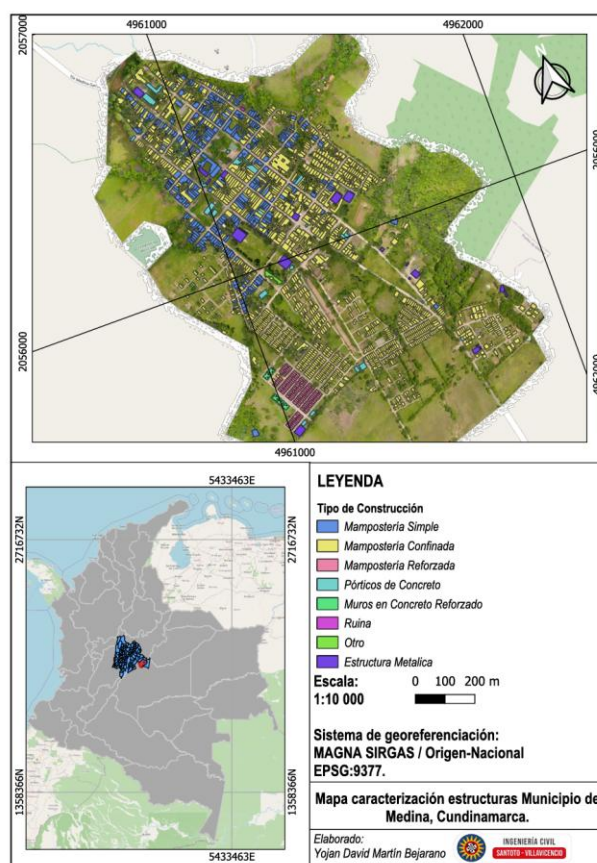
7. Resultados y análisis de datos

7.1. Caracterización de edificaciones y viviendas en Medina Cundinamarca

Como componente complementario y fase diagnóstica que motivó la justificación de esta investigación, se presenta una caracterización estructural de las edificaciones del municipio de Medina, Cundinamarca. Esta caracterización permite contextualizar la pertinencia del uso de las fibras de guadua como refuerzo en el concreto y el mortero, especialmente en los sistemas constructivos predominantes tanto en el casco urbano como en sus zonas aledañas.

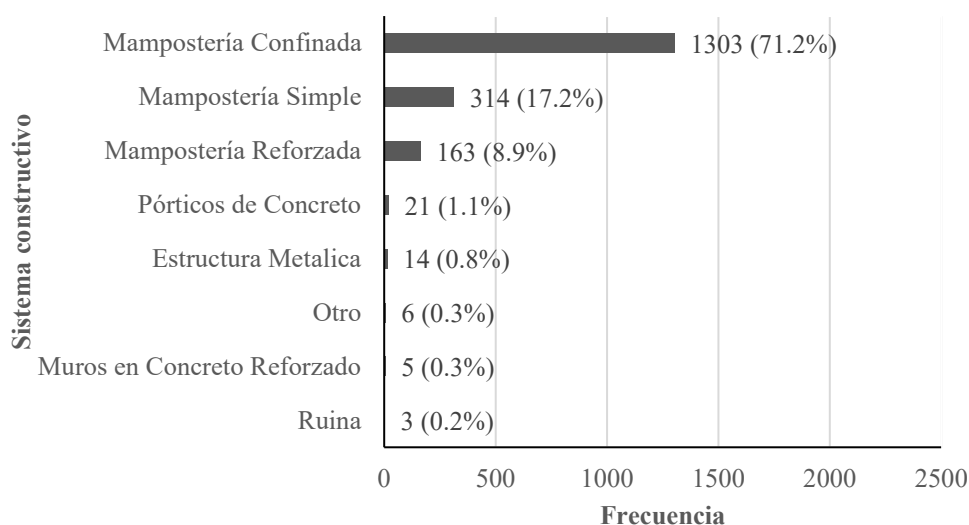
La información levantada en campo se georreferenció y consolidó en la donde se aprecia la distribución espacial de los tipos de construcciones en la zona urbana del municipio, contabilizando un total de 1829 edificaciones caracterizadas. (Figura 62).

Figura 62 Mapa caracterización estructural en el Municipio de Medina, Cundinamarca.



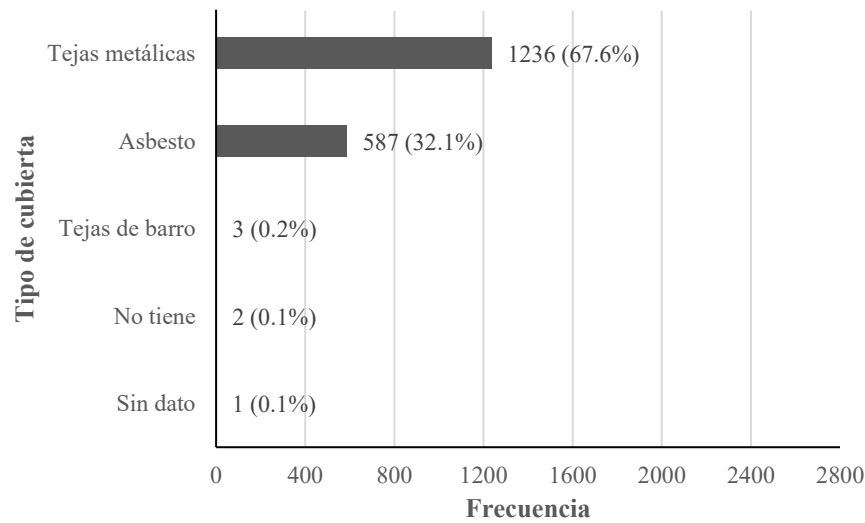
Según la Figura 63 el municipio de Medina presenta una mayoría de edificaciones levantadas bajo el sistema constructivo de mampostería, el cual representa el 97.3 % del total del inventario. Asimismo, aunque se evidencia una práctica constructiva extendida de mampostería confinada, resulta preocupante la presencia de 314 edificaciones de mampostería simple (17.2 % del total). Estas estructuras carecen de un sistema de refuerzo que las confine, dependiendo enteramente de la resistencia individual del bloque y del mortero de pega para soportar las cargas verticales y laterales, lo que las hace altamente vulnerables ante eventos sísmicos.

Figura 63 Cantidad de edificaciones por sistema constructivo en el municipio de Medina.



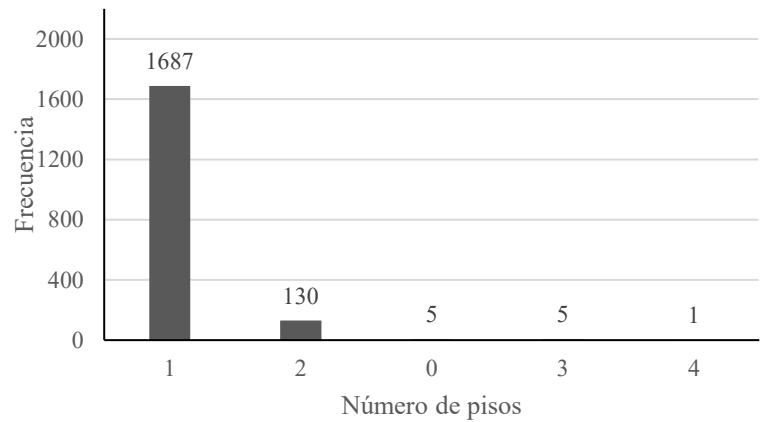
Por otra parte, cabe destacar que las cubiertas de las edificaciones se distribuyen principalmente entre tejas metálicas y de asbesto (Figura 64). La alta incidencia de este último constituye una problemática de salud pública, considerando que dicho material está clasificado como cancerígeno. Aunque la sustitución de cubiertas excede el alcance directo de este proyecto, es un hallazgo relevante, ya que las fibras naturales se perfilan en la industria de la construcción como un material sustituto idóneo para la fabricación de tejas ecológicas de fibrocemento. Por ende, este dato resulta fundamental para futuros estudios de mitigación integral de la vulnerabilidad en el municipio.

Figura 64 Cantidad de edificaciones por tipo de cubierta en el municipio de Medina.



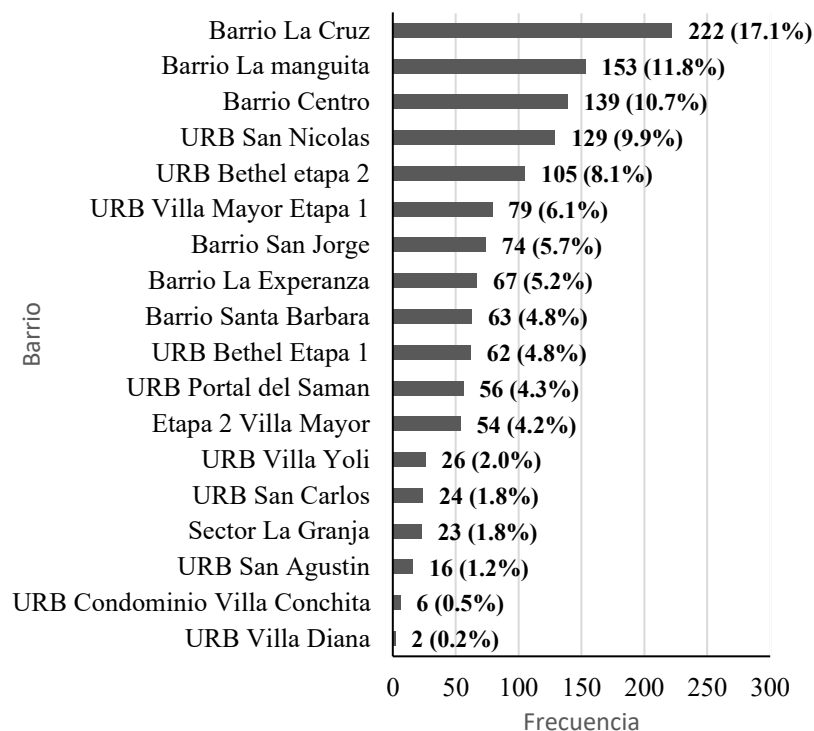
Respecto a la altura de las estructuras, la Figura 65 evidencia que la gran mayoría de las edificaciones constan de una sola planta, seguidas en una proporción mucho menor (menos del 7 %) por viviendas de dos plantas.

Figura 65 Cantidad de edificaciones según número de pisos en el municipio de Medina.



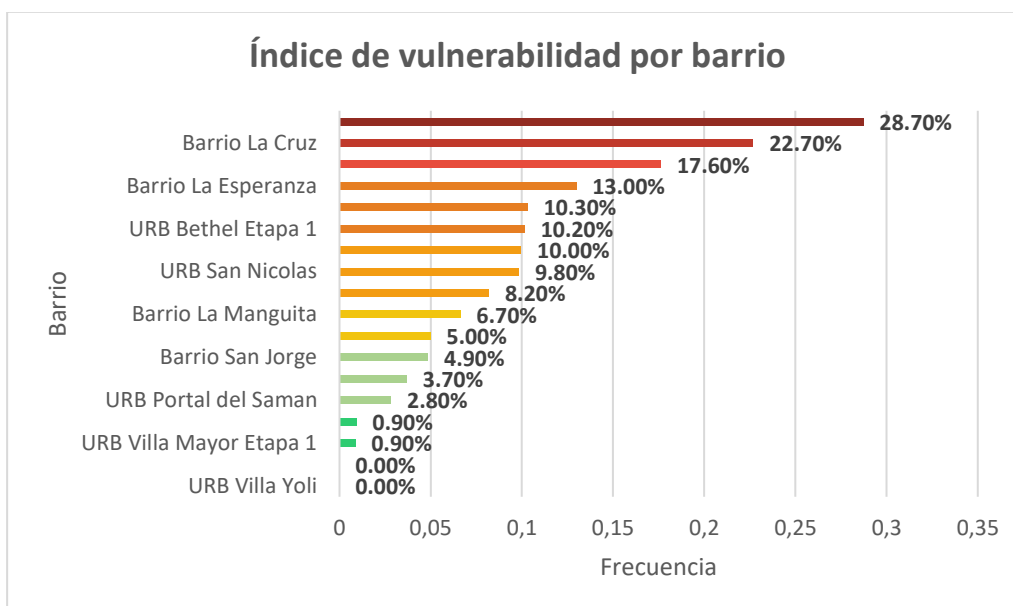
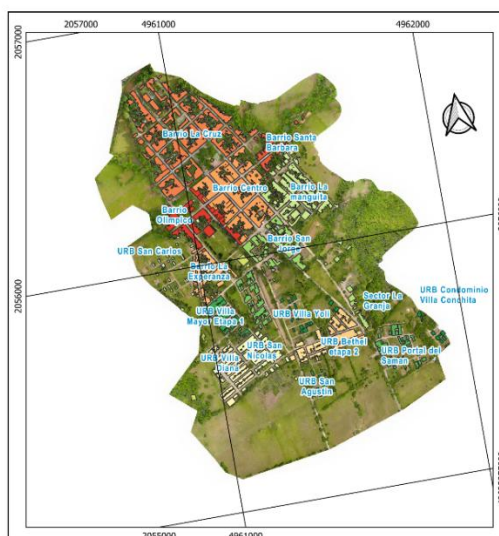
Al desglosar espacialmente la distribución de las viviendas de mampostería simple dentro del casco urbano, se evidencia que los barrios populares concentran el mayor número de estas construcciones sin refuerzo, liderados por los barrios La Cruz, La Manguita y Centro (Figura 66).

Figura 66 Cantidad de edificaciones de mampostería simple según barrio en el municipio de Medina.



Finalmente, a partir de las variables más representativas recolectadas en el inventario, se estructuró un índice de vulnerabilidad para categorizar el riesgo de cada barrio (Figura 67 y Figura 68). A cada variable se le asignó un peso ponderado de la siguiente manera: 50 % al porcentaje de edificaciones de mampostería simple, 25 % al porcentaje de edificaciones en estado de conservación regular o malo, 15 % al porcentaje de edificaciones con más de una planta y 10 % al porcentaje de edificaciones con cubiertas de asbesto.

El cálculo de este índice demostró que Santa Bárbara, La Cruz y Centro son los barrios con mayor vulnerabilidad estructural y habitacional en este estudio. Geográficamente, estos sectores se encuentran contiguos en la zona nororiental del municipio, conformando un área de intervención prioritaria para futuros planes de ordenamiento territorial.

Figura 67 Grafica de índice de vulnerabilidad por barrio.**Figura 68** Mapa Índice de vulnerabilidad por barrio.

7.2. Caracterización física

7.2.1 Selección y corte de culmos para extracción de fibra

Luego de toda la metodología aplicada, se puede constatar que para garantizar el máximo aprovechamiento de la guadua angustifolia Kunth, resulta fundamental realizar la selección de

culmos que se encuentren en un estado de maduración adulta entre los 3 a 5 años, etapa que físicamente se caracteriza por la caída de las hojas caulinares y la aparición de manchas blancas o líquenes sobre la superficie de la planta. Asimismo, durante la recolección, el corte de la guadua desde su base debe ejecutarse por encima del segundo nudo; esta práctica tiene el propósito de dejar un excedente basal que permita y estimule el retoño de nuevas plantas, garantizando así la sostenibilidad del guadua de Guadua Angustifolia Kunth.

Por otra parte, para el adecuado seccionamiento y aprovechamiento de los culmos, los cortes deben realizarse en las proximidades del entrenudo empleando una sierra circular. Por ello es importante que este procedimiento sea ejecutado por una persona capacitada, garantizando el uso de elementos de protección personal como lo son gafas de seguridad, mascarilla y ropa de trabajo ajustada para evitar riesgos y prevenir accidentes.

7.2.2 *Ensayo de contenido de humedad*

El porcentaje de contenido de humedad (%CH) se obtuvo a partir de la media aritmética de las diferentes muestras, tanto para la parte inferior (Tabla 24) como para la parte superior del culmo (Tabla 25), Tras aplicar el criterio de Chauvenet, se comprobó que todas las mediciones de contenido de humedad son válidas. Así, se encontró que el contenido de humedad promedio de la parte inferior es de 175,5 %, mientras que en la parte superior del culmo es de 86,1 % (Figura 69). Esto indica que, para un entrenudo de la parte inferior, el 36,29 % de su composición corresponde a masa seca (celulosa y hemicelulosa); en contraste, en la parte superior (varillón), el 53,73 % corresponde a masa seca. Este comportamiento se evidencia a través del despeje de la masa seca, como se detalla en la Ecuación 12

Ecuación 12

$$\%CH = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100$$

$$\frac{\%CH}{100} = \frac{m}{m_0} - 1$$

$$\frac{\%CH}{100} + 1 = \frac{m}{m_0}$$

$$m_0 = \frac{m}{\frac{\%CH}{100} + 1}$$

Donde:

$\%CH$ = porcentaje de contenido de humedad.

m = masa de la muestra húmeda.

m_0 = masa de la muestra seca.

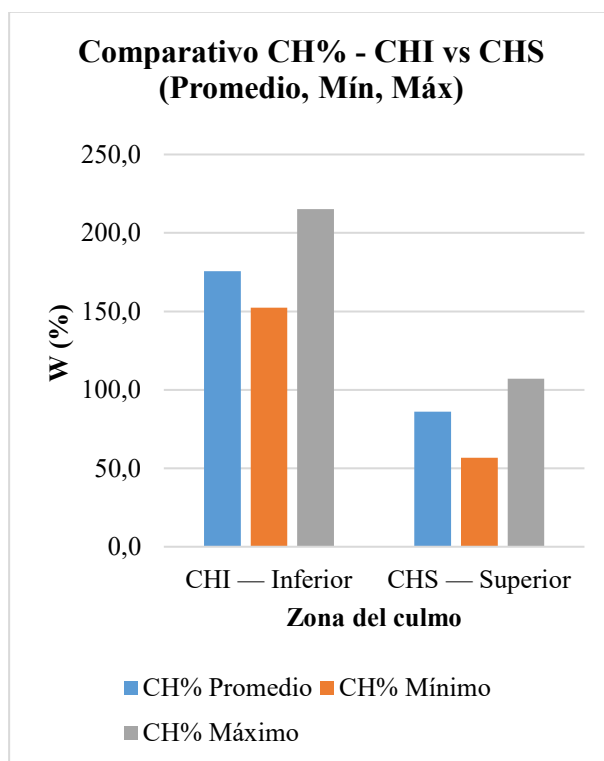
Tabla 24 Resultados del ensayo de Contenido de humedad – Parte Inferior del culmo.

N°	Probeta	m ₁ Húmeda (g)	M ₂ Seca 6 h (g)	M ₂ Seca 24 h (g)	M ₂ Seca 30 h (g)	CH (%)	xi - x̄ / s	Valor crítico (n=17)
1	CHI1	23.90	13.990	9.480	9.467	152.5	1.209	2.178
2	CHI2	25.54	16.410	8.900	8.872	187.9	0.634	
3	CHI3	22.70	14.480	7.220	7.204	215.1	2.050	
4	CHI4	24.28	16.560	9.560	9.531	154.7	1.091	
5	CHI5	27.19	17.960	9.390	9.389	189.6	0.724	
6	CHI6	28.21	18.910	10.820	10.787	161.5	0.738	
7	CHI7	25.52	15.590	9.550	9.526	167.9	0.406	
8	CHI8	23.99	15.320	9.280	9.258	159.1	0.863	
9	CHI9	28.02	19.590	10.460	10.430	168.7	0.366	
10	CHI10	22.79	15.200	8.260	8.225	177.1	0.072	
11	CHI11	23.81	15.200	7.680	7.658	210.9	1.834	
12	CHI12	24.03	16.570	9.540	9.500	153.0	1.183	
13	CHI13	25.80	15.850	9.540	9.498	171.6	0.212	
14	CHI14	26.49	13.810	9.090	9.071	192.0	0.851	
15	CHI15	27.91	14.740	10.790	10.785	158.8	0.880	
16	CHI16	24.32	13.850	8.550	8.539	184.8	0.475	
17	CHI17	26.17	14.660	9.320	9.293	181.6	0.308	

Tabla 25 Resultados del ensayo de Contenido de humedad – Parte superior del culmo.

N°	Probeta	m ₁ Húmeda (g)	m Seca 6 h (g)	m Seca 24 h (g)	m ₂ Seca 30 h (g)	CH (%)	xi - x̄ / s	Valor Crítico (n=30)
1	CHS1	6.02	2.980	2.940	2.928	105.6	1.326	2.394
2	CHS2	6.57	3.140	3.240	3.235	103.1	1.158	
3	CHS3	4.51	2.485	2.570	2.566	75.8	0.698	
4	CHS4	5.77	3.100	3.060	3.050	89.2	0.214	

Nº	Probeta	m1 Húmeda (g)	m Seca 6 h (g)	m Seca 24 h (g)	m2 Seca 30 h (g)	CH (%)	$ \bar{x}_i - \bar{x} / s$	Valor Crítico (n=30)
5	CHS5	6.09	3.330	3.310	3.299	84.6	0.099	
6	CHS6	5.67	2.760	2.740	2.737	107.1	1.431	
7	CHS7	7.93	4.270	4.170	4.158	90.7	0.318	
8	CHS8	5.72	3.550	3.550	3.534	61.9	1.644	
9	CHS9	5.32	2.790	2.830	2.824	88.4	0.157	
10	CHS10	5.06	2.850	2.880	2.879	75.7	0.702	
11	CHS11	4.87	2.370	2.760	2.753	76.9	0.623	
12	CHS12	5.18	2.590	2.580	2.576	101.0	1.018	
13	CHS13	4.46	2.790	2.790	2.787	60.0	1.768	
14	CHS14	6.87	3.870	3.990	3.985	72.4	0.930	
15	CHS15	3.95	2.060	2.020	2.018	95.7	0.656	
16	CHS16	8.55	4.190	4.220	4.210	103.1	1.156	
17	CHS17	5.49	2.840	2.900	2.893	89.8	0.252	
18	CHS18	6.27	3.020	3.090	3.082	103.5	1.182	
19	CHS19	5.99	3.720	3.760	3.756	59.5	1.805	
20	CHS20	5.60	3.460	3.590	3.575	56.6	1.999	
21	CHS21	6.28	3.260	3.360	3.355	87.2	0.078	
22	CHS22	5.65	2.870	3.080	3.071	84.0	0.140	
23	CHS23	5.75	2.950	2.970	2.966	93.9	0.530	
24	CHS24	4.40	2.450	2.550	2.538	73.4	0.863	
25	CHS25	4.35	2.270	2.430	2.426	79.3	0.460	
26	CHS26	4.39	2.140	2.220	2.211	98.6	0.849	
27	CHS27	8.16	4.110	4.060	4.055	101.2	1.031	
28	CHS28	3.90	2.050	2.030	2.027	92.4	0.429	
29	CHS29	9.33	4.910	4.790	4.777	95.3	0.628	
30	CHS30	6.38	3.590	3.640	3.624	76.0	0.681	

Figura 69 Comparativo %CH en la parte inferior y superior del culmo.

Al analizar estos resultados, se observa que la parte inferior retiene aproximadamente el doble de agua que la parte superior (2,04 veces más). Esto demuestra que la sección inferior posee una alta capacidad de retención de líquidos. De manera inversamente proporcional, la parte superior presenta menor retención de humedad, pero un porcentaje de masa seca mayor respecto a la masa total, lo cual representa una alta concentración de celulosa, hemicelulosa y de la epidermis del culmo. Por lo tanto, se obtiene una mayor cantidad de fibra por unidad de entrenudo en la parte superior (53,73 %) en comparación con la parte inferior (36,29 %). Este comportamiento concuerda con lo establecido por Lo et al. (2004), quienes señalan que la densidad de la fibra de bambú aumenta a medida que disminuye el diámetro superior del culmo.

Asimismo, la masa por centímetro de entrenudo es mayor en la parte inferior (74,1 g/cm) frente a la parte superior (13,9 g/cm), evidenciando que, aunque los entrenudos del varillón son más largos, su masa lineal es menor (Tabla 26). Esto es consistente con una estructura de paredes más delgadas pero altamente fibrosas. Dicho resultado concuerda con los hallazgos de Estrada Mejía (2009), quien descarta el uso estructural directo del varillón debido a su reducido diámetro, ya que este limita la eficiencia de las conexiones mecánicas y genera mayores deformaciones. Sin

embargo, su bajo contenido de humedad y su mayor densidad de fibras posicionan al varillón como una materia prima óptima para la extracción de fibras destinadas a refuerzo.

Tabla 26 *Relación Masa/Longitud según partes del culmo*

Muestra	Masa/longitud (g/cm)
C1 (Cepa)	74.1
C8 (Basa)	41.9
C12 (Sobrebasa)	29
C17 (Varillón)	15.8
C21 (Varillón)	13.9

En la práctica, se evidenció que el proceso de extracción presentó mayor dificultad en los entrenudos inferiores. Se determinó que un mayor contenido de humedad es directamente proporcional a una mayor resistencia al desfibrado y a un mayor contenido de lignina. Por consiguiente, la sección superior (varillón) facilitó notablemente el proceso de desfibrado mecánico manual y la extracción química, reafirmando su pertinencia y eficiencia como material de refuerzo.

7.2.3 *Trabajabilidad de la mezcla*

Dado que la presente investigación contempla un análisis de datos de carácter mixto, este apartado cualitativo describe el comportamiento físico de las mezclas durante su elaboración. Tal como se mencionó en la metodología, las fibras de Guadua angustifolia Kunth empleadas fueron cortadas en longitudes de 5 cm para el concreto y de 3 cm para el mortero, las cuales están categorizadas como macrofibras. Luego de haber realizado el proceso de fundición del concreto para las diferentes dosificaciones (control 0 %, adición del 0,5 % y adición del 1 %) y la respectiva elaboración de los muretes, se lograron establecer las siguientes apreciaciones (Tabla 27 y Tabla 28):

Tabla 27 Evaluación de la trabajabilidad de la mezcla de Concreto

Muestra	Ensayo	Asentamiento (cm)	Clasificación	Observaciones
Control (0 %)	1	55	Media	Mezcla estándar, la cual presentó una buena trabajabilidad natural por defecto.
Fibra 0,5 %	1	52	Media semi-seca	Mezcla homogénea. Su adecuada distribución en la mezcladora evitó la formación de aglomeraciones (nudos) de fibra. Una porción de la mezcla se adhirió a las espas, pero fue retirada con facilidad utilizando un palustre durante la descarga.
Fibra 1,0 %	1	49	Semi-seca	Mezcla con dificultad de manipulación. Parte de la fibra quedó retenida en las espas de la mezcladora. Durante el moldeo de los especímenes cilíndricos, el vibrado y apisonamiento resultó más arduo frente a las mezclas anteriores, requiriendo mayor esfuerzo físico bajo los mismos golpes de compactación.

Tabla 28 Evaluación cualitativa de la trabajabilidad de la mezcla de mortero.

Muestra	Observaciones
Control (0 %)	Mezcla estándar con gran facilidad de manejo. Los procesos de colocación del pañete, el revoque y el afinado final se ejecutaron de manera óptima y fluida.
Fibra 0.5 %	Mezcla con una fluidez levemente reducida. Al momento del revoque las fibras eran visibles; sin embargo, tras realizar el afinado con la llana, el acabado estético fue equiparable al de un pañete tradicional.
Fibra 1 %	Mezcla con fluidez disminuida y textura tosca. Las fibras fueron notablemente más evidentes y tendieron a formar aglomeraciones. Su maleabilidad durante el mezclado fue significativamente más difícil, por lo que requirió ser vertida en un recipiente de mayor área superficial para distribuir las fibras de una mejor manera.

7.3. Caracterización mecánica

A continuación, se detallan los resultados obtenidos de la caracterización mecánica de los especímenes, correspondientes a los diferentes ensayos definidos en la metodología. Cada uno de los datos presentados es el resultado de una verificación a través de la técnica de análisis de datos y procesamiento de información (Apartado 6.5) lo cual garantiza su validez estadística para su análisis.

7.3.1 Resistencia a la compresión del concreto

Los resultados de la resistencia a la compresión de las diferentes muestras evaluadas se consolidan en la Tabla 29. En esta se registran la fuerza máxima alcanzada (F), el esfuerzo máximo a compresión (σ) y la clasificación del patrón de fractura según los modelos típicos estipulados por la Norma Técnica Colombiana NTC 673 (Véase Figura 53). Asimismo, la evidencia fotográfica empleada para clasificar el tipo de falla de cada espécimen ensayado se encuentra detallada en los Anexos Anexo A, Anexo B, y Anexo C.

Tras la recolección de los datos, se procedió a la validación estadística mediante el Criterio de Chauvenet. Este análisis determinó que únicamente el espécimen M2-4-14 superó el valor crítico establecido para su grupo de datos, por lo que fue declarado un valor atípico y descartado.

Tabla 29 Resultados individuales de esfuerzo máximo a compresión.

Muestra	Espécimen Cilíndrico	Edad: 7 días			Edad: 14 días			Edad: 28 días		
		Fuerza máx F (kN)	Esfuerzo máx σ (MPa)	Tipo falla	Fuerza máx F (kN)	Esfuerzo máx σ (MPa)	Tipo falla	Fuerza máx F (kN)	Esfuerzo máx σ (MPa)	Tipo falla
Control (0% fibra)	M1-1	35.45	4.51	3	48.06	6.12	5/4	66.4	8.45	2
	M1-2	33.94	4.32	2	49.58	6.31	2	62.82	8.00	2
	M1-3	39.95	5.09	3	47.2	6.01	3	68.3	8.70	2
	M1-4	41.48	5.28	-	48.13	6.13	2	65.41	8.33	2
	M1-5	40.5	5.16	-	46.34	5.90	3	65.002	8.28	3
	M1-6	41.05	5.23	-	44.69	5.69	2	63.43	8.08	2
0.5% de fibra	M2-1	77.7	9.89	2	88.14	11.22	3	115.91	14.76	3
	M2-2	72.32	9.21	3	89.37	11.38	2	122.43	15.59	2
	M2-3	73.47	9.35	3	90.48	11.52	4	115.43	14.70	1

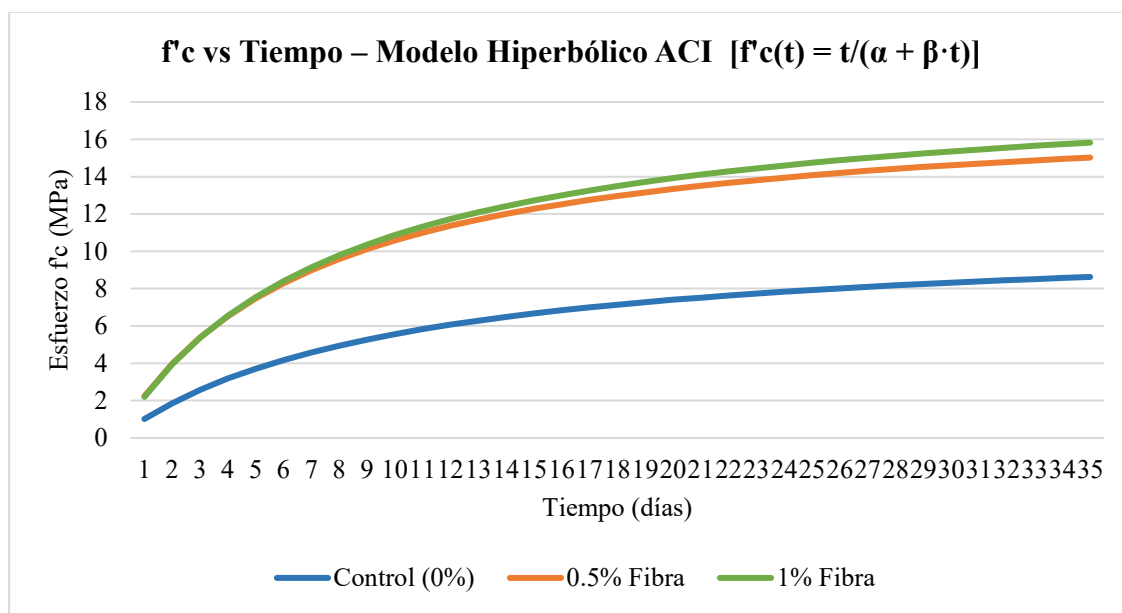
Muestra	Espécimen Cilíndrico	Edad: 7 días			Edad: 14 días			Edad: 28 días		
		Fuerza máx F (kN)	Esfuerzo máx σ (MPa)	Tipo falla	Fuerza máx F (kN)	Esfuerzo máx σ (MPa)	Tipo falla	Fuerza máx F (kN)	Esfuerzo máx σ (MPa)	Tipo falla
1% de fibra	M2-4	73.69	9.38	4	83.82	10.67	5/3	110.62	14.08	2
	M2-5	77.65	9.89	3	89.78	11.43	2	108.22	13.78	3
	M2-6	73.8	9.40	2	88.11	11.22	3	-	-	-
	M3-1	80.73	10.28	4	91.72	11.68	2	129.9	16.54	3
	M3-2	70.91	9.03	5	88.07	11.21	2	116.86	14.88	3
	M3-3	72.2	9.19	2	92.73	11.81	2	117.26	14.93	3
	M3-4	72.71	9.26	3	96.66	12.31	2	116.719	14.86	2
	M3-5	75.61	9.63	2	97.5	12.41	3	115.973	14.77	3
	M3-6	78.53	10.00	2	93.55	11.91	2	122.816	15.64	2

Al evaluar el desarrollo de la resistencia (Tabla 30), se evidencia que la adición de fibras de guadua incrementa notablemente la capacidad a compresión del concreto frente a la muestra de control en todas las edades de ensayo. El efecto de la fibra resulta altamente significativo a los 28 días, logrando prácticamente duplicar la resistencia respecto a la mezcla sin refuerzo (8.30 MPa). Específicamente, la mezcla con 0.5 % de fibra alcanzó un incremento del 75.6 % (14.58 MPa), mientras que la mezcla con 1.0 % de fibra reportó un aumento del 84.0 % (15.27 MPa).

Al comparar directamente las dosificaciones con fibra a los 28 días, se observa una diferencia de 0.69 MPa (4.7 %) a favor de la muestra con 1.0 %. Asimismo, se evidencia un crecimiento superior de resistencia entre los 14 y 28 días para los especímenes reforzados. Como se ilustra en el modelo hiperbólico del ACI (Figura 70), la inclusión de fibras de guadua actúa como un factor predominante en el aumento de la resistencia a compresión desde edades tempranas, manteniendo una tendencia de ganancia superior hasta la edad de referencia de 28 días.

Tabla 30 Esfuerzo máximo promedio a compresión (MPa)

Edad (días)	Control (0% fibra)	0.5% fibra	1.0% fibra
7	4.93	9.52	9.56
14	6.03	11.35	11.89
28	8.3	14.58	15.27

Figura 70 Esfuerzo en función de los días, modelo hiperbólico ACI.

7.3.2 Módulo de Elasticidad del concreto

Los resultados correspondientes al Módulo de Elasticidad Estático (E) de las distintas mezclas de concreto se consolidan en la Tabla 32, la cual incluye los parámetros experimentales requeridos para su cálculo. Para la determinación de esta propiedad mecánica, se establecieron las dimensiones y condiciones de medición de los especímenes siguiendo estrictamente los lineamientos de la Norma Técnica Colombiana NTC 4025, tal como se detalla en la (Tabla 31).

Durante la fase de instrumentación y ejecución del ensayo, el espécimen M2-6-28 fue descartado de la investigación debido a una falla técnica en los transductores de desplazamiento (extensómetros/compresómetro), los cuales no registraron la deformación de la muestra antes de que esta alcanzara su esfuerzo máximo. Los demás especímenes fueron sometidos a verificación estadística mediante el Criterio de Chauvenet (Tabla 33), lo que permitió validar y depurar los datos para el análisis de los promedios representativos.

Aunque las curvas individuales de esfuerzo-deformación para los nueve especímenes ensayados se encuentran documentadas en el Anexo J, en este apartado se presenta una gráfica consolidada (Figura 72) que ilustra el comportamiento promedio del esfuerzo frente a la deformación unitaria longitudinal para cada dosificación evaluada.

Tabla 31 *Parámetros de los especímenes para el cálculo del módulo de elasticidad (E) y Relación de Poisson (ν).*

Diámetro (D)	100.0	mm
Longitud (L)	200.0	mm
Área ($A = \pi \cdot D^2/4$)	7853.98	mm ²
Punto Milloresima	0.005	mm
Longitud efectiva de medición (g)	100	mm

Tabla 32 *Valores de módulo de elasticidad y relación de Poisson de las muestras de concreto a los 28 días.*

Característica	M1 Control 0%			M2 Fibra 0.5%			M3 Fibra 1%		
	M1-4-28	M1-5-28	M1-6-28	M2-4-28	M2-5-28	M2-6-28	M3-4-28	M3-5-28	M3-6-28
Carga máxima (kN)	65.410	65.002	63.430	110.62	108.22		116.71	115.97	122.81
Esfuerzo máximo ($f_c = F/A$)	8.328	8.276	8.076	14.085	13.779		9	3	6
Carga al 0.005 mm (kN)	41.945	20.976	17.172	38.082	13.572		14.209	9.358	19.846
Carga al 40% (kN)	26.164	26.001	25.372	44.248	43.288		46.688	46.389	49.126
Esfuerzo 0.005mm (σ)	5.341	2.671	2.186	4.849	1.728		1.809	1.191	2.527
Esfuerzo 40% (σ)	3.331	3.311	3.230	5.634	5.512		5.944	5.906	6.255
ϵ_{long} 0.0005 (mm/mm)	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005		0.0005	0.0005	0.0005
ϵ_{long} 40% (mm/mm)	0.0002	0.0006	0.0008	0.0005	0.0009		0.0009	0.0009	0.0009
ϵ_{trans} 0.0005mm/mm (mm/mm)	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001		0.0000	0.0001	0.0000
ϵ_{trans} 40% (mm/mm)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003		0.0003	0.0015	0.0000
Módulo de Elasticidad (E)	7012.3	5796.9	3441.2	12834.4	8426.8		8537.1	9966.2	9121.7
Relación de Poisson (ν)	0.3595	0.0091	0.0000	0.6539	0.4766		0.5017	3.0144	0.0979

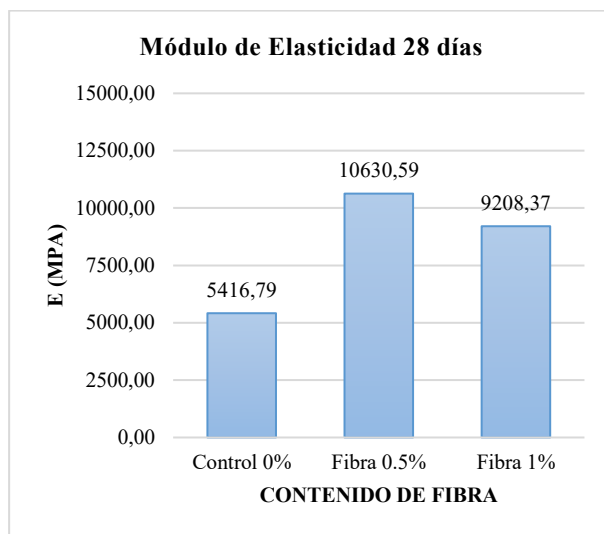
Tabla 33 *Verificación estadística del módulo de elasticidad mediante el Criterio de Chauvenet*

Muestra	Identificado r	n	E (MPa)	$\bar{x}$ (MPa)	s (MPa)	$ \sigma_i - \bar{x} $	$ \sigma_i - \bar{x} / s$	Valor crítico	¿Descartado?
M1 Control 0%	M1-4-28		7012.348			1595.559	0.879		No
	M1-5-28	3	5796.862	5416.789	1815.681	380.074	0.209	1.383	No
	M1-6-28		3441.156			1975.633	1.088		No
M2 Fibra 0.5%	M2-4-28	2	12834.376	10630.585	3116.630	2203.791	0.707	1.150	No

Muestra	Identificado r	n	E (MPa)	$\bar{x}$ (MPa)	s (MPa)	$ \sigma_i - \bar{x} $	$ \sigma_i - \bar{x} / s$	Valor critic o	¿Descartad o?
	M2-5-28		8426.795			2203.791	0.707	1.150	No
	M2-6-28		-		-	-	-	-	-
	M3-4-28		5742.827			671.222	0.934		No
M3 Fibra 1%	M3-5-28	3	5871.258	9208.371	718.468	757.857	1.055	1.383	No
	M3-6-28		6514.093			86.634	0.121		No

Al analizar los promedios obtenidos (Figura 71) se evidencia que la adición de fibras de Guadua angustifolia Kunth incrementa significativamente el módulo de elasticidad frente a la matriz sin refuerzo. Se observa un desempeño óptimo en la dosificación con 0.5 % de fibra, la cual registró un aumento del 96.2 % en su rigidez. Esto indica que, además de proporcionar un efecto de puenteo post-fisuración, las fibras de guadua trabajan activamente en la zona elástica, rigidizando la mezcla de concreto ante las cargas iniciales de compresión, lo que podría indicar que el módulo de elasticidad es más susceptible a la cantidad de fibra o dosificación.

Figura 71 Modulo de elasticidad muestra de control 0%, fibra 0.5% y fibra 1%.

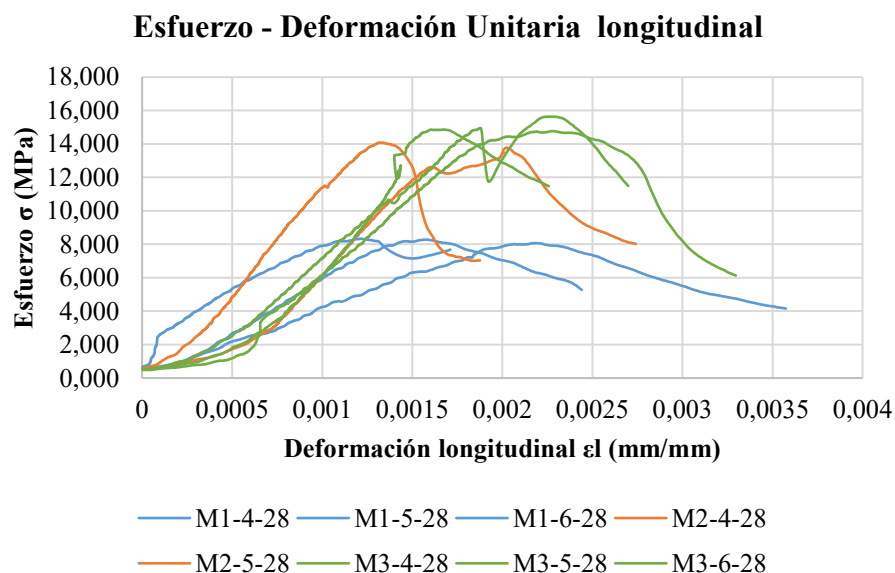


Al evaluar el comportamiento esfuerzo-deformación longitudinal (Figura 72) se corrobora de forma visual que los especímenes con 0.5% de fibra presentan pendientes iniciales mucho más pronunciadas, lo que se traduce de manera directa en su mayor módulo de elasticidad. En contraste,

las muestras de control (0 % fibra) exhiben una pendiente más suavizada (mayor deformabilidad). Y la mezcla con 1% de fibra exhibe curvas uniformes entre sus especímenes, lo cual es congruente con su desviación estándar de 718.46 MPa, situando su rigidez en un punto intermedio entre las otras dos dosificaciones.

En particular, el módulo de elasticidad promedio para la mezcla con 1.0 % de fibra (9208.37 MPa) representa una reducción del 13.4 % con respecto al pico máximo alcanzado por la dosificación del 0.5 %. Físicamente, este comportamiento se fundamenta en la pérdida de trabajabilidad experimentada durante la etapa de mezclado y fundición de los especímenes, ya que la mayor cantidad de fibra dificultó significativamente el proceso de vibrado y compactación. En consecuencia, aunque tras el fraguado el acabado exterior de las probetas era aparentemente adecuado, la matriz interna albergó microvacíos que interrumpieron la correcta transferencia de esfuerzos en el material compuesto. Este hallazgo se encuentra en total concordancia con lo reportado por García et al. (2024), quienes advierten que superar un umbral de adición del 0.5 % de fibra natural disminuye la trabajabilidad e impide la correcta homogeneización de la mezcla, lo cual incrementa la porosidad general y afecta negativamente las propiedades mecánicas.

Figura 72 *Gráficas curva esfuerzo – Deformación Unitaria longitudinal*



7.3.3 Relación de Poisson del concreto

Los resultados correspondientes a la Relación de Poisson (ν) de las distintas mezclas de concreto se calcularon en paralelo con el módulo de elasticidad, utilizando los mismos registros de deformación transversal y longitudinal en el rango elástico. Los parámetros iniciales para su obtención se encuentran detallados en la Tabla 32.

Durante la revisión analítica de los datos en bruto, se descartó el espécimen M3-5-28 debido a una inconsistencia física en sus registros: el alargamiento transversal resultó mayor que el acortamiento longitudinal, lo cual indica un dato anómalo; Esta anomalía se atribuye a una interrupción operativa durante la ejecución de la prueba; al pausar debido a que en el primer ensayo no media deformación transversal y luego reiniciar la máquina, la deformación transversal que ya se había acumulado se registró erróneamente como una deformación inicial nula, invalidando el comportamiento real del espécimen.

Posteriormente, los datos válidos fueron sometidos a verificación estadística mediante el Criterio de Chauvenet (Tabla 34). Este proceso permitió validar la dispersión de los datos y confirmar que, estadísticamente, ningún espécimen de los grupos restantes superaba el valor crítico para ser considerado atípico, garantizando así la idoneidad de los promedios representativos.

Tabla 34 Verificación estadística de la Relación de Poisson mediante el Criterio de Chauvenet.

Muestra	Identificador	n	ν	$\bar{x}$ (MPa)	s (MPa)	$ \sigma_i - \bar{x} $	$ \sigma_i - \bar{x} / s$	Valor crítico	¿Descartado?
M1 Control 0%	M1-4-28	3	0.359	0.123	0.205	0.237	1.154	1.383	No
	M1-5-28		0.009			0.114	0.555		No
	M1-6-28		0.000			0.123	0.599		No
M2 Fibra 0.5%	M2-4-28	2	0.654	0.497	0.222	0.157	0.707	1.150	No
	M2-5-28		0.34				0.707	1.150	No
	M2-6-28		-		-	-	-	-	-
M3 Fibra 1%	M3-4-28	2	0.502	0.300	0.286	0.202	0.707	1.383	No
	M3-5-28		-		-	-	-		-
	M3-6-28		0.098		0.286	0.202	0.707		No

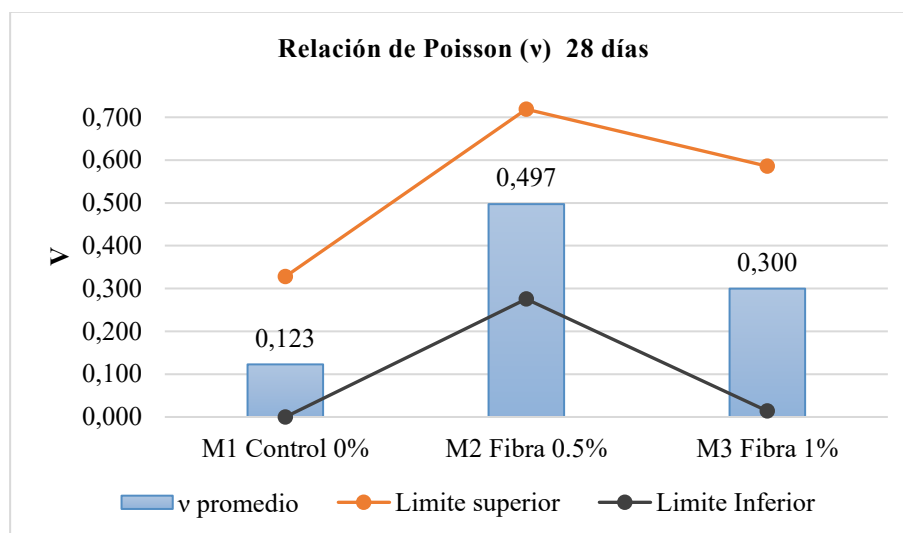
Nota. Los valores críticos corresponden a $n = 3$ y $n = 2$ según la cantidad de especímenes válidos por muestra.

Al realizar un análisis exhaustivo de los promedios obtenidos, se evidencia que la mezcla con 0.5 % de fibra presenta un incremento sustancial, alcanzando un valor de $\nu = 0.497$ (Figura

73). Físicamente, este comportamiento en la zona elástica se aproxima al límite teórico de un material incompresible ($\nu = 0.5$) Esto revela una extraordinaria redistribución de esfuerzos dentro del material compuesto: al estar orientadas en múltiples direcciones, las fibras de guadua actúan como un refuerzo anisotrópico que transmite una gran parte de la carga axial aplicada hacia las direcciones transversales, generando una expansión lateral mucho más pronunciada que la de la matriz simple. Esta alta deformabilidad lateral se confirma en las curvas de la Figura 81 (Anexo J) las cuales exhiben pendientes sostenidas y significativas, lo cual confirma valores altos de la relación de Poisson (ν).

Por su parte, la muestra con 1.0 % de fibra reportó un valor promedio de $\nu = 0.3$. Aunque la alta densidad de fibras continúa redistribuyendo el esfuerzo hacia los laterales, esta reducción transversal respecto a la muestra del 0.5 % corrobora el fenómeno físico evidenciado durante el análisis del módulo de elasticidad. El aumento en la proporción de macrofibras generó pérdida de trabajabilidad y problemas de compactación durante el vibrado, lo que derivó en la formación de microvacíos en la matriz cementicia. En materiales compuestos, estos vacíos internos actúan como espacios de alivio que absorben parte de la deformación transversal desde el interior, reduciendo así la expansión lateral global del espécimen bajo carga.

Finalmente, la muestra de control (0 % fibra) reportó un valor muy bajo (0.123), evidenciando una transmisión de cargas casi netamente axial y una matriz sumamente rígida que no presenta expansiones laterales representativas antes de su falla. Este comportamiento frágil se ve sustentado en la Figura 79 (Anexo J) donde se aprecian magnitudes de deformación sumamente mayores en el eje longitudinal respecto a las minúsculas variaciones en el eje transversal.

Figura 73 Relación de Poisson promedio a los 28 días por tipo de mezcla.

7.3.4 Resistencia a la flexión del concreto.

Los resultados de la resistencia a flexión para las diferentes muestras de concreto se presentan en la Figura 35. En esta se registran la carga máxima aplicada (P) y el módulo de rotura (MR) alcanzado por cada vigueta. Además, la evidencia fotográfica detallada del ensayo y los patrones de fisuración se encuentran documentados en los Anexo D, Anexo E y Anexo F.

Para revisar la validez de los datos, primero se aplicó el criterio estadístico de Chauvenet (Anexo K). el cual indicó que todos los resultados eran estadísticamente aceptables. Sin embargo, al aplicar un criterio analítico ingenieril, se evidenció que el espécimen MV1-3-28 tiene un MR de 1.45 MPa significativamente menor que sus pares. Si se incluyera este dato anómalo, el promedio de la muestra se reduciría a 2.24 MPa. Este bajo resultado debe descartarse porque va en contra de la lógica de ganancia de resistencia con la edad de curado del concreto, ya que es incluso menor que los promedios que la mezcla alcanzó a los 7 y 14 días. Al retirarlo, el promedio real y representativo a los 28 días es de 2.64 MPa.

Tabla 35 Resultados de carga y Módulo de rotura máximo.

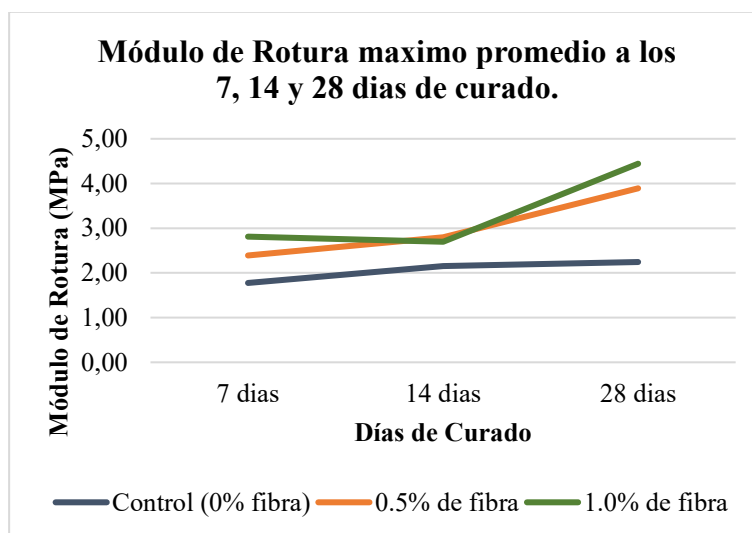
Muestra	Identificador	Edad: 7 días		Edad: 14 días		Edad: 28 días	
		Carga máx P (kN)	Módulo rotura MR (MPa)	Carga máx P (kN)	Módulo rotura MR (MPa)	Carga máx P (kN)	Módulo rotura MR (MPa)
Control 0%	MV1-1	12.19	1.73	14.41	2.05	17.64	2.50
	MV1-2	12.85	1.82	15.56	2.21	19.57	2.78
	MV1-3	12.48	1.77	15.50	2.20	10.21	1.45
0.5% de fibra	MV2-1	16.80	2.38	20.56	2.92	27.94	3.97
	MV2-2	16.97	2.41	18.98	2.69	27.98	3.97
	MV2-3	16.75	2.38	19.56	2.78	26.35	3.74
1% de fibra	MV3-1	19.58	2.78	19.65	2.79	31.94	4.53
	MV3-2	19.32	2.74	19.46	2.76	33.21	4.71
	MV3-3	19.25	2.73	19.43	2.76	28.75	4.08

En la Tabla 36 se observa cómo creció el módulo de rotura máximo promedio conforme avanzó el tiempo de curado (Figura 74). Es evidente que la muestra con 1.0 % de fibra alcanzó la resistencia más alta de todas a los 28 días (4.44 MPa). Esto supera a la mezcla de 0.5 % en 0.55 MPa (+14.1%) y a la muestra de control en 1.68 MPa (+68.2%). Esto comprueba que agregar entre 0.5 % y 1.0 % de fibra es muy beneficioso a flexión, ya que las fibras ayudan a soportar de manera efectiva las fuerzas de tensión que ocurren en la zona inferior de la viga.

Se destaca también el gran incremento que tuvo la muestra del 1% entre los 14 y los 28 días, logrando un crecimiento acelerado del +60.3 %. Aun así, la muestra del 0.5 % mostró un aumento constante a lo largo de las semanas y terminó muy cerca de la máxima resistencia, logrando 3.89 MPa.

Tabla 36 Crecimiento del módulo de rotura máximo promedio (MPa)

Muestra	7 días	Crecimiento	14 días	Crecimiento	28 días
Control (0% fibra)	1.78	+20.8%	2.15	+22.8%	2.64
0.5% de fibra	2.39	+17.2%	2.80	+38.9%	3.89
1.0% de fibra	2.75	+0.7%	2.77	+60.3%	4.44

Figura 74 Evolución del módulo de rotura máximo a flexión

Aunque la máquina universal utilizada no permitió obtener una gráfica de la falla, en la práctica se observó algo muy importante a simple vista: las vigas sin fibra (0 %) tuvieron una falla frágil. En contraste, la gran mayoría de las vigas con fibra tuvieron una falla progresiva; las fibras mantuvieron las partes unidas y evitaron que colapsaran de golpe.

Todo lo anterior nos demuestra que la adición de fibra en el concreto sometido a flexión alcanza su mejor momento después de los 28 días. Exclusivamente en la muestra del 1% se nota una excelente unión entre la fibra y el concreto que le da la mayor resistencia.

7.3.5 Ensayo de tracción diagonal (Cortante) en muretes de mampostería.

Tras haber realizado el procesamiento de los datos obtenidos en la metodología, se condenso la evidencia fotográfica en los Anexo G, Anexo H e Anexo I, los cuales evidencian los muretes durante el montaje y después de la falla.

Luego se procedió a la validación estadística por medio del Criterio de Chauvenet de las tres propiedades mecánicas obtenidas en este ensayo: el esfuerzo cortante máximo (τ_{max}), la deformación unitaria por cortante máxima (γ_{max}) y el módulo de rigidez (G); cada una de estas propiedades se consolidó en la Tabla 37, Tabla 38 y Tabla 39, respectivamente.

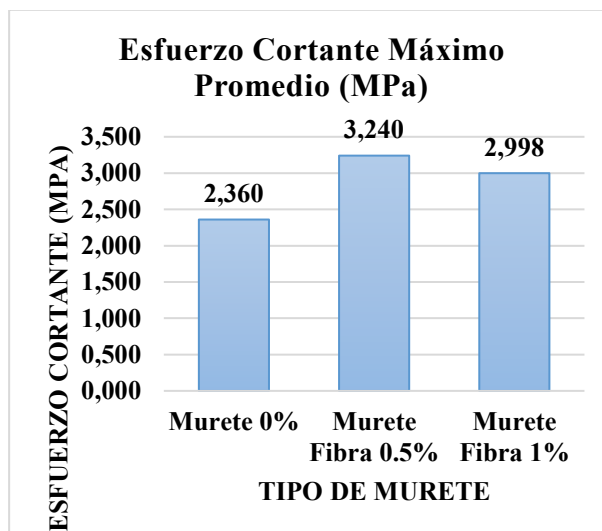
Al analizar este comportamiento desde la mecánica de fractura, se concluye que al dosificar la fibra de guadua, el material compuesto disminuye su rigidez inicial debido a que las fibras actúan

como un mecanismo de puenteo frente a las microfisuras tempranas que se forman en el mortero. Este fenómeno flexibiliza la matriz, permitiendo que el material se deforme continuamente y absorba energía sin colapsar de manera frágil, a diferencia de la muestra de control.

Resultados de resistencia a cortante. Los resultados de resistencia a cortante en muretes evidencian que la muestra de 0.5% de fibra alcanza el máximo valor de resistencia a cortante promedio (Figura 75). Sin embargo, al analizarla desviación estándar (s) a cuál representa la dispersión de los datos de las 3 muestras, se evidencia que la muestra de 1% de fibra posee una dispersión significativamente menor ($s = 0.358$ MPa). Esto demuestra un comportamiento altamente homogéneo y predecible frente a las demás dosificaciones, superando la estabilidad de la muestra de control ($s = 0.98$ MPa) y de la de 0.5% fibra ($s = 0.761$ MPa) aun cuando esta última haya alcanzado picos individuales de resistencia mayores.

Tabla 37 Verificación estadística y esfuerzo cortante máximo promedio ($\tau_{\max}$)

Muestra	Murete	n	Esfuerzo a Cortante (MPa)	$\bar{x}$ (MPa)	s (MPa)	$ \sigma_i - \bar{x} $	$ \sigma_i - \bar{x} / s$	Valor crítico	¿Descartado?	Esfuerzo Cortante Máximo Promedio [Mpa]
Murete 0%	MU1-1-28	3	3.439	2.360	0.980	1.079	1.101	1.383	No	2.360
	MU1-2-28		1.525			0.835	0.852		No	
	MU1-3-28		2.116			0.244	0.249		No	
Murete Fibra 0.5%	MU2-1-28	3	2.771	3.240	0.761	0.469	0.617	1.383	No	3.240
	MU2-2-28		4.118			0.878	1.154		No	
	MU2-3-28		2.832			0.409	0.537		No	
Murete Fibra 1%	MU3-1-28	3	3.060	2.998	0.358	0.062	0.173	1.383	No	2.998
	MU3-2-28		3.322			0.323	0.903		No	
	MU3-3-28		2.613			0.385	1.075		No	

Figura 75 Grafica de esfuerzo cortante máximo de muestra control 0%, fibra 0.5% y fibra 1%.

Resultados de deformación máxima por cortante promedio. Los resultados de deformación máxima por cortante promedio (γ_{max}) representados en la Figura 76 evidencian que la muestra con fibra al 1.0 % incrementa sustancialmente la capacidad de deformación del murete antes de su colapso, alcanzando un promedio de 0.057 mm/mm. Esto indica que puede deformarse un 56% más que la muestra de control (0.034 mm/mm) antes de fallar, otorgándole a la mampostería una tenacidad y ductilidad excepcionales ante posibles cargas sísmicas.

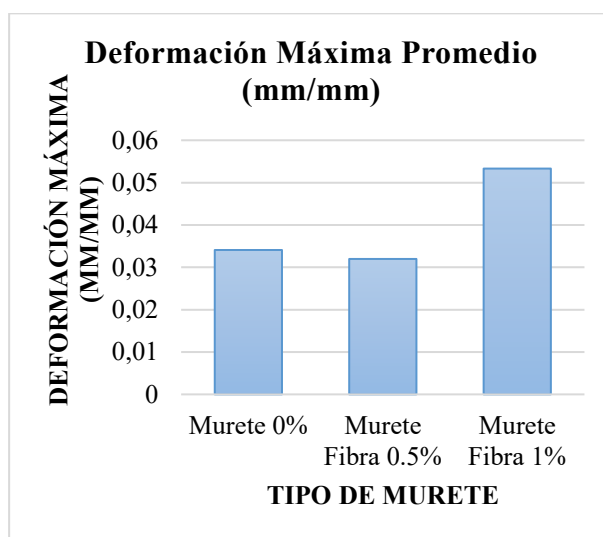
Adicionalmente, al analizar la dispersión estadística, la muestra con 1% de fibra registró la mayor consistencia en sus resultados, con un coeficiente de variación de apenas el 9.4%. En contraste, la muestra con 0.5% de fibra registró un del 21.8%, y la muestra de control evidenció un comportamiento sumamente errático con un del 102.9%, confirmando la fragilidad intrínseca y la falla súbita impredecible.

Tabla 38 Verificación estadística y deformación máxima por cortante promedio (γ_{max})

Muestra	Murete	n	Deformación Maxima [mm/mm]	$\bar{x}$ (MPa)	s (MPa)	$ \sigma_i - \bar{x} $	$ \sigma_i - \bar{x} / s$	Valor crítico	¿Descartado?	Deformación Maxima Promedio
Murete 0%	MU1-1-28	3	0.07	0.034	0.035	0.040	1.146	1.383	No	0.034
	MU1-2-28		0.02			0.016	0.452		No	
	MU1-3-28		0.01			0.024	0.694		No	

Muestra	Murete	n	Deformación Máxima [mm/mm]	$\bar{x}$ (MPa)	s (MPa)	$ \sigma_i - \bar{x} $	$ \sigma_i - \bar{x} / s$	Valor crítico	¿Descartado?	Deformación Máxima Promedio
Murete Fibra 0.5%	MU2-1-28	3	0.03	0.032	0.007	0.003	0.371		No	0.032
	MU2-2-28		0.04			0.008	1.133			
	MU2-3-28		0.03			0.005	0.761			
Murete Fibra 1%	MU3-1-28	3	0.05	0.053	0.005	0.006	1.151		No	0.053
	MU3-2-28		0.06			0.003	0.652			
	MU3-3-28		0.06			0.002	0.499			

Figura 76 Deformación máxima promedio por muestra (mm/mm)



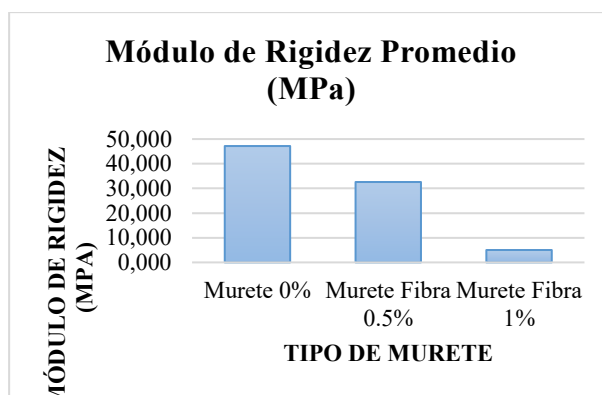
Resultados de módulo de rigidez. Los resultados del módulo de rigidez al corte (G), presentados en la Tabla 39 y Figura 77, evidencian que la muestra de control 0 % es la que posee la mayor rigidez inicial (47.180 MPa), seguida por la muestra del 0.5 % (32.593 MPa) y finalmente la del 1% (5.023 MPa). Adicionalmente, se observa una tendencia inversamente proporcional a la adición de fibra, mostrando que el coeficiente de variación es más uniforme en la muestra de 1% de fibra (6%), seguido por la muestra de 0.5% de fibra (24.6%) y la muestra de control (26.6%). Al analizar este comportamiento desde la mecánica de fractura, se concluye que al dosificar la fibra de guadua, el material compuesto disminuye su rigidez inicial debido a que las fibras actúan como un mecanismo de puenteo frente a las microfisuras tempranas que se forman en el mortero. Este

fenómeno flexibiliza la matriz, permitiendo que el material se deforme continuamente y absorba energía sin colapsar de manera frágil, a diferencia de la muestra de control.

Tabla 39 Verificación estadística y módulo de rigidez promedio (G)

Muestra	Murete	n	Módulo de rigidez (MPa)	$\bar{x}$ (MPa)	s (MPa)	$ \sigma_i - \bar{x} $	$ \sigma_i - \bar{x} / s$	Valor crítico	¿Descartado?	Módulo de Rigidez G [MPa]
Murete 0%	MU1-1-28		0.860			46.320	0.775		No	
	MU1-2-28	3	26.030	47.180	59.771	21.150	0.354		No	47.180
	MU1-3-28		114.650			67.470	1.129		No	
Murete Fibra 0.5%	MU2-1-28		6.210			26.383	0.650		No	
	MU2-2-28	3	12.210	32.593	40.612	20.383	0.502	1.383	No	32.593
	MU2-3-28		79.360			46.767	1.152		No	
Murete Fibra 1%	MU3-1-28		2.120			2.903	0.544		No	
	MU3-2-28	3	1.770	5.023	5.335	3.253	0.610		No	5.023
	MU3-3-28		11.18			6.157	1.154		No	

Figura 77 Módulo de rigidez promedio por muestra



Conclusiones

Durante la metodología experimental aplicada para el proceso de extracción, y fundamentada en la revisión del estado del arte, se pudo constatar que el método combinado modificado desarrollado en esta investigación es altamente eficaz para obtener el refuerzo natural de *Guadua angustifolia* Kunth. Se evidenció que este procedimiento representa el punto de equilibrio óptimo entre remover la matriz aglutinante (lignina y hemicelulosa) y preservar la integridad estructural de la celulosa sin deteriorarla. Este balance es un requisito clave para su uso como refuerzo ya que, como señala Estrada Mejía (2009), "al retirar la lignina de la planta se afecta también la celulosa, lo que aumenta la fragilidad de las fibras y reduce su resistencia mecánica, por lo tanto indica que para reforzar materiales compuestos debe venir de la mano con la estandarización de un proceso óptimo de extracción de fibras." (p. 7). En consecuencia, en este trabajo investigativo se logró estandarizar un proceso óptimo de extracción, culminando con la neutralización de la alcalinidad residual del NaOH mediante ácido acético, lo cual garantizó la obtención de unas fibras en condiciones químicas y físicas ideales para su incorporación a las mezclas cementicias.

Desde la caracterización física del culmo, el ensayo de contenido de humedad evidenció un contraste estructural determinante: la sección inferior del culmo retiene una cantidad de agua significativamente elevada (175.5 %) en comparación con la sección superior o "varillón" (86.1 %). Este hallazgo demuestra que el varillón posee una mayor proporción de masa seca (53.73 %), albergando una densidad superior de fibras de celulosa. En consecuencia, se concluye que esta sección superior, la cual tradicionalmente es desechada en la región por no tener un uso estructural directo debido a su pequeña sección transversal, es en realidad la materia prima más óptima y eficiente para los procesos de extracción de fibras de refuerzo, validando así la pertinencia y sostenibilidad ambiental de esta investigación.

Por otro lado, al evaluar el comportamiento físico en estado fresco de estas macrofibras (cortadas a 5 cm para el concreto y a 3 cm para el mortero) durante su integración a la mezcla, se concluyó que la trabajabilidad es inversamente proporcional a la cantidad de fibra adicionada. Si bien la adición del 1% de fibra resulta factible para la conformación de los especímenes experimentales, esta proporción sacrifica drásticamente la manejabilidad de la mezcla, dificultando significativamente los procesos de vibrado y compactación. Este comportamiento concuerda con

lo reportado por García et al. (2024), quienes advierten que superar un umbral de adición del 0.5 % de fibra natural disminuye la trabajabilidad e impide la correcta homogeneización de la mezcla. En contraparte, la dosificación del 0.5 % demostró un desempeño óptimo en estado fresco, permitiendo una correcta distribución de los materiales sin exigir esfuerzos extraordinarios de fundición.

En contraparte, la dosificación del 0.5 % de fibra demostró un desempeño óptimo en estado fresco, permitiendo una correcta distribución de los materiales sin exigir esfuerzos extraordinarios de fundición. Por lo tanto, se concluye que el 0.5 % representa el límite operativo ideal para asegurar la calidad integral del material compuesto en la práctica constructiva, garantizando que el concreto y el mortero mantengan sus propiedades plásticas óptimas antes del fraguado.

En relación con los resultados obtenidos en la fase de caracterización mecánica, se presentan las siguientes conclusiones derivadas del análisis de datos:

- **Resistencia a compresión:** El tratamiento estadístico mediante el Criterio de Chauvenet permitió validar un aumento drástico en la capacidad de carga a los 28 días de curado. La muestra de control registró 8.30 MPa, mientras que las dosificaciones del 0.5 % y 1.0 % de fibra alcanzaron 14.58 MPa y 15.27 MPa, respectivamente (Tabla 30). Se concluye que la inclusión de macrofibras de guadua actúa como un factor determinante en el incremento de la resistencia mecánica desde edades tempranas, manteniendo una tendencia de ganancia superior y constante hasta la edad de referencia.
- **Módulo de elasticidad:** Esta propiedad, evaluada a los 28 días, evidenció un desempeño óptimo en las dosificaciones reforzadas. Si bien la muestra con 1% de fibra presentó un módulo de elasticidad promedio de 9208.37 MPa menor que la del 0.5 % (10630.59 MPa), su dispersión de datos fue significativamente más baja y homogénea (Tabla 33). Este comportamiento demuestra que el refuerzo de fibra trabaja activamente en la zona elástica del concreto, optimizando la distribución interna de esfuerzos para soportar mayores cargas con menores deformaciones. Al evaluar las curvas esfuerzo-deformación unitaria (Figura 72), se corroboró una pendiente pronunciada y rígida en la dosificación del 0.5 %, mientras que la muestra de control exhibió una curva suavizada, indicando una alta deformabilidad ante esfuerzos reducidos. La ligera disminución del módulo de elasticidad en la muestra al 1% se atribuye también a la pérdida de trabajabilidad, la cual tiene como consecuencia microvacíos dentro de la matriz del concreto.

- **Relación de Poisson:** Respecto a la deformabilidad lateral, se concluye que la incorporación de fibras de guadua aporta significativamente a la redistribución de cargas dentro del rango elástico. Mientras que el concreto de control 0% de fibra evidenció un comportamiento frágil y una transmisión de cargas casi netamente axial ($\nu=0.123$), la dosificación del 0.5% de fibra generó una extraordinaria expansión transversal controlada, alcanzando un valor de $\nu=0.497$ (Figura 73). Físicamente, esto demuestra que la red de macrofibras actúa como un refuerzo anisotrópico capaz de transformar el esfuerzo longitudinal en deformación lateral antes de la falla. No obstante, la reducción de este valor en la mezcla al 1% ($\nu=0.300$) corrobora mecánicamente los problemas de compactación y trabajabilidad previamente identificados, donde los microvacíos absorbieron parte de la deformación transversal interna.
- **Resistencia a flexión:** Los resultados confirman la eficiencia de la fibra ante esfuerzos de tracción indirecta. La muestra de control registró un módulo de rotura de apenas 2.64 MPa, caracterizado por una falla súbita y catastrófica. En contraste, la adición del 1.0 % de fibra alcanzó el valor máximo absoluto de 4.44 MPa (Tabla 36, Figura 74). El análisis cualitativo permitió concluir que las fibras actúan mediante un mecanismo de puenteo manteniendo la cohesión de las partes fracturadas de la vigueta y garantizando una falla progresiva y dúctil.
- **Cortante en muretes:** En primer lugar, se evidenció que la dosificación del 0.5 % alcanzó un esfuerzo cortante máximo promedio de 3.24 MPa, lo cual representa un incremento sustancial del +37.3% frente a la muestra de control. Por otra parte, la muestra con 1% de fibra demostró un incremento excepcional en la capacidad de resistir deformaciones angulares antes de la falla, alcanzando una deformación máxima de 0.057 mm/mm frente a los 0.034 mm/mm de la muestra de control (Figura 76). Esto evidencia una tenacidad y ductilidad sobresalientes para resistir cargas laterales, lo cual deriva lógicamente en una disminución de su módulo de rigidez inicial (Figura 77), permitiendo que el muro disipe una mayor cantidad de energía antes del colapso.

A partir de la síntesis de los ensayos físicos y mecánicos expuestos, se concluye definitivamente que la dosificación de 0.5% de fibra representa la dosificación óptima para la práctica constructiva. Si bien la dosificación del 1% ofrece picos mayores de resistencia absoluta a compresión y flexión, además de notables bondades de tenacidad y deformabilidad frente la absorción de energía, su exceso sacrifica drásticamente la trabajabilidad de las mezclas en estado

fresco, promoviendo la formación de microvacíos en la matriz. Por ende, el 0.5 % garantiza el equilibrio técnico ideal entre viabilidad operativa en obra y ganancia estructural.

Finalmente, la presente investigación demuestra de manera categórica la viabilidad técnica del uso de macrofibras de *Guadua angustifolia* Kunth obtenidas y tratadas mediante el método combinado modificado de extracción químico-mecánica desarrollado en esta investigación, como material de refuerzo en matrices cementicias como el concreto y el mortero para aplicaciones en mampostería. Dado que al realizar todos los ensayos que reposan en esta investigación, el material compuesto evidenció una clara superioridad estructural frente a las muestras de control.

Con la culminación de este trabajo investigativo se realiza un aporte significativo al estado del arte sobre el uso de biomateriales en la ingeniería civil. Asimismo, el proyecto contribuye al desarrollo sostenible y al fortalecimiento económico de la región al validar una alternativa accesible, ecológica y de bajo costo para el refuerzo de concreto y mortero en pañetes.

Referencias bibliográficas

- Ashimori, M., Katayama, T., Aoyama, E., & Nagai, S. (2004). Study on splitting of bamboo fibers due to freezing and tensile strength of FRTP using bamboo fibers. *JSME International Journal Series A*, 47(4), 566–569. <https://doi.org/10.1299/jsmea.47.566>
- Bobbitt, Z. (2022). Chauvenet's criterion: Definition & example. *Statology*. <https://www.statology.org/chauvenets-criterion/>
- Catalán-Quiroz, P., Moreno-Martínez, J. Y., Arroyo Matus, R., & Galván, A. (2019). Obtención de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe mediante ensayos de laboratorio. *Acta Universitaria*, 29, 1–13. <https://doi.org/10.15174/au.2019.1861>
- Egbo, M. K. (2021). A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 33(8), 557–568. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.007>
- Estrada Mejía, M. (2009). *Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (Guadua angustifolia) para el refuerzo de materiales compuestos* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio institucional Universidad de los Andes. <https://hdl.handle.net/1992/11158>
- Euclid Chemical Toxement. (2021). *MAXTEN: Macro fibra sintética para reemplazar malla electrosoldada*. <https://www.toxement.com.co/media/5783/maxten.pdf>
- Fu, J., Zhang, X., Yu, C., Guebitz, G. M., & Cavaco-Paulo, A. (2012). Bioprocessing of bamboo materials. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 20(1), 13–19. https://www.researchgate.net/publication/283149274_Bioprocessing_of_Bamboo_Materials
- García, G., Cabrera, R., Rolón, J., Pichardo, R., & Thomas, C. (2024). Natural fibers as reinforcement of mortar and concrete: A systematic review from Central and South American regions. *Journal of Building Engineering*, 98, 111267. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111267>
- Guerrero, A. (1997). Montañas. En *Trópico, visiones de la naturaleza colombiana* (pp. 154–157). Villegas Editores.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2001). NTC 4925. Prefabricados de concreto. Método de ensayo para determinar la resistencia a la tracción diagonal (cortante)

- en muretes de mampostería. Icontec. <https://tienda.icontec.org/product/prefabricados-de-concreto-metodo-de-ensayo-para-determinar-la-resistencia-a-la-traccion-diagonal-cortante-en-muretes-de-mamposteria/>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2005). NTC 206-1. Maderas. Determinación de contenido de humedad para ensayos físicos y mecánicos. Icontec. <https://tienda.icontec.org/product/maderas-determinacion-de-contenido-de-humedad-para-ensayos-fisicos-y-mecanicos/>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2021). NTC 673. Concretos. Método de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. Icontec. <https://tienda.icontec.org/product/concretos-metodo-de-ensayo-de-resistencia-a-la-compresion-de-especimenes-cilindricos-de-concreto/>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2018). NTC 2871. Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión (utilizando una viga simple con carga en los tercios medios). Icontec. <https://tienda.icontec.org/product/metodo-de-ensayo-para-determinar-la-resistencia-del-concreto-a-la-flexion-utilizando-una-viga-simple-con-carga-en-los-tercios-medios/>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2019). NTC 4025. Concretos. Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión. Icontec. <https://tienda.icontec.org/product/concretos-metodo-de-ensayo-para-determinar-el-modulo-de-elasticidad-estatico-y-la-relacion-de-poisson-en-concreto-a-compresion/>
- Jain, S., Jindal, U. C., & Seema, R. K. (1992). Mechanical behaviour of bamboo and bamboo composite. *Journal of Materials Science*, 27, 4598–4604. <https://doi.org/10.1007/BF01166009>
- JAM Group Co. (s.f.). *Top 5 caustic soda neutralizers: A comprehensive guide*. <https://jamgroupco.com/caustic-soda-neutralizers/>
- Jansson, J. J. A. (2000). *Designing and building with bamboo*. Technical University of Eindhoven.
- Jawaid, M., & Abdul Khalil, H. P. S. (2011). Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydrate Polymers*, 86(1), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.043>

- Jindal, U. C. (1986). Development and testing of bamboo-fibres reinforced plastic composites. *Journal of Composite Materials*, 20, 19–29. <https://doi.org/10.1177/00219983860200010>
- ur, V., Chattopadhyay, D. P., & Kaur, S. (2013). Study on extraction of bamboo fibres from raw bamboo fibres bundles using different retting techniques. *Textiles and Light Industrial Science and Technology*, 2(4), 174–179. https://www.academia.edu/27485752/Study_on_Extraction_of_Bamboo_Fibres_from_Raw_Bamboo_Fibres_Bundles_Using_Different_Retting_Techniques
- Kim, H., Okubo, K., Fujii, T., & Takemura, K. (2013). Influence of fiber extraction and surface modification on mechanical properties of green composites with bamboo fiber. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27(12), 1348–1358. <https://doi.org/10.1080/01694243.2012.697363>
- Lakkad, S. C., & Patel, J. M. (1981). Mechanical properties of bamboo, a natural composite. *Fibre Science and Technology*, 14(4), 319–322. [https://doi.org/10.1016/0015-0568\(81\)90023-3](https://doi.org/10.1016/0015-0568(81)90023-3)
- Lo, T. Y., Cui, H. Z., & Leung, H. C. (2004). The effect of fiber density on strength capacity of bamboo. *Materials Letters*, 58(27-28), 2595–2598. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2004.03.029>
- Londoño, X. (2011). El bambú en Colombia. *Biotecnología Vegetal*, 11(3), 143–154. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/PER01000346229>
- Los habitantes de Paratebueno y de Medina podrán vivir de nuevo en sus propias casas. (2026, 11 de mayo). *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/mas-contenido/los-habitantes-de-paratebueno-y-de-medina-podran-vivir-de-nuevo-en-sus-propias-casas-3519782>
- Luna, P., & Lizarazo-Marriaga, J. (2025). Transforming bamboo-guadua: Fiber extraction and characterization for biocomposite materials. *Materiales de Construcción*, 75(358), e378. <https://doi.org/10.3989/mc.2025.383224>
- Maia Pederneiras, C., Veiga, R., & de Brito, J. (2021). Physical and mechanical performance of coir fiber-reinforced rendering mortars. *Materials*, 14(4), 823. <https://doi.org/10.3390/ma14040823>
- Maier, M., Javadian, A., Saeidi, N., Unluer, C., Taylor, H. K., & Ostertag, C. P. (2020). Mechanical properties and flexural behavior of sustainable bamboo fiber-reinforced mortar. *Applied Sciences*, 10(18), 6587. <https://doi.org/10.3390/app10186587>
- Maiti, R. (1997). *World fiber crops*. Science Publishers.

- Mason, W. H. (1926). *Process and apparatus for disintegration of wood and the like* (U.S. Patent No. 1,578,609). U.S. Patent and Trademark Office.
- Metropolis Center. (s.f.). *Tolete macizo No. 5 20x10x5*.
<https://www.metropoliscenter.com.co/p/tolete-macizo-no-5--20x10x5/>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10: Título C — Concreto estructural*. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
https://camacol.co/sites/default/files/descargables/T%C3%ADtulo%20C%20NSR-10%20del%20Decreto%20926%20del%2019032010_0.pdf
- Palacios Pabón, J. D., Capacho Carvajal, M. A., & Sánchez-Molina, J. (2023). Caracterización mecánica de microconcreto fibro-reforzado con fibras de guadua y fibras de fique. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(42), 86–92.
<https://doi.org/10.24054/rcta.v2i42.2673>
- Phong, N. T., Fujii, T., Chuong, B., & Okubo, K. (2012). Study on how to effectively extract bamboo fibers from raw bamboo and wastewater treatment. *Journal of Materials Science Research*, 1(1), 144–155. <https://doi.org/10.5539/jmsr.v1n1p144>
- Porras, A., & Marañón, A. (2012). Development and characterization of a laminate composite material from polylactic acid (PLA) and woven bamboo fabric. *Composites Part B: Engineering*, 43(7), 2782–2788. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.039>
- Quintanar Olguín, J., Suárez Patlán, E. E., & Sandoval García, J. (2018). Uso de la explosión súbita de vapor como pretratamiento para fraccionar biomasa. *Pistas Educativas*, 40(131), 212–221. <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/viewFile/1787/1515>
- Rao, K. M. M., & Rao, K. M. (2007). Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo. *Composite Structures*, 77(3), 288–295.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.07.023>
- Sika. (2024). *Fibras para concreto y mortero*.
<https://col.sika.com/es/construccion/concreto/produccion-de-concreto-mortero-y-cemento/fibras-para-concreto-y-mortero.html>
- Sika Colombia. (2025a). *Hoja de datos del producto SikaFiber: Microfibra monofilamento de polipropileno para concreto y mortero*.
https://col.sika.com/dam/dms/co01/x/sikafiber_.pdf

- Sika Colombia. (2025b). *Hoja de datos del producto SikaFiber-540 Twist: Macrofibra sintética para concreto*. <https://col.sika.com/es/construccion/concreto/produccion-de-concreto-mortero-y-cemento/fibras-para-concreto-y-mortero/macrofibra-sintetica/sikafiber540-twist.html>
- Sika Colombia. (2025c). *Hoja de datos del producto SikaFiber Force-60: Macrofibra sintética de 60 mm de longitud para concreto y concreto proyectado*. https://col.sika.com/dam/dms/co01/m/sikafiber_force-60.pdf
- Takeuchi Tam, C. P. (2004). Comportamiento estructural de la guadua angustifolia. Uniones en guadua. *Ingeniería e Investigación*, 24(2), 3–7. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingenv/article/view/14594>
- Tanahashi, M., Takada, S., Aoki, T., Goto, T., Higuchi, T., & Hanai, S. (1983). Characterization of explosion wood: 1. Structure and physical properties. *Wood Research*, 69, 36–51. <https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/53337>
- Thwe, M. M., & Liao, K. (2002). Effects of environmental aging on the mechanical properties of bamboo–glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(1), 43–52. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00071-9](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00071-9)
- Vanegas Alfonso, O. L., Martínez Morales, J. S., & Poveda Jaramillo, J. A. (2019). De la utilización de las fibras de guadua como refuerzo del concreto para minimizar el proceso de fisuración. En E. Serna M. (Coord.), *Investigación formativa en ingeniería* (3ª ed., pp. 96–105). Editorial Instituto Antioqueño de Investigación. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3387691>
- Zakikhani, P., Zahari, R., Sultan, M., & Majid, D. (2014). Extraction and preparation of bamboo fibre reinforced composites. *Materials & Design*, 63, 820–828. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.058>

Anexos

Anexo A Registro fotográfico de espécimen a compresión de la muestra de control 0%

Edad: 7 Dias		
Frontal	Cilindro 1	Cilindro 2
		
		Cilindro 3
		
Edad: 14 Dias		
Frontal	Cilindro 1	Cilindro 2
		
Lateral		Cilindro 3
		
Frontal	Cilindro 4	Cilindro 5
		
		Cilindro 6
		

Edad: 7 Dias

Lateral



Edad: 28 Dias

Cilindro 1 Cilindro 2 Cilindro 3

Frontal



Lateral

Edad: 28 Dias



Cilindro 4



Cilindro 5

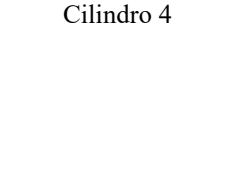
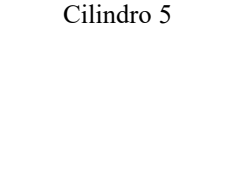
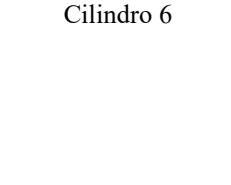


Cilindro 6

Frontal



Anexo B Registro fotográfico de espécimen a compresión de la muestra de fibra 0.5%

Edad: 7 Dias			
Frontal	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
			
	Cilindro 4	Cilindro 5	Cilindro 6
Frontal			
Frontal	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
			
	Cilindro 4	Cilindro 5	Cilindro 6
Lateral			
Edad: 14 Dias			
Frontal	Cilindro 4	Cilindro 5	Cilindro 6
			

Edad: 7 Dias

Lateral



Edad: 28 días

Frontal



Lateral



Frontal

Cilindro 1 Cilindro 2 Cilindro 3

Cilindro 4 Cilindro 5 Cilindro 6

Edad: 7 Dias

Lateral



Anexo C Registro fotográfico de especimen a compresión de la muestra de Fibra 1%

Edad: 7 Dias					
	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3		
Frontal					
Lateral					
	Cilindro 4	Cilindro 5	Cilindro 6		
Frontal					
Lateral					
Edad: 14 Dias					

Edad: 7 Dias			
	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
Frontal			
Lateral			
	Cilindro 4	Cilindro 5	Cilindro 6
Frontal			
Lateral			

Edad: 7 Dias



Edad: 28 dias

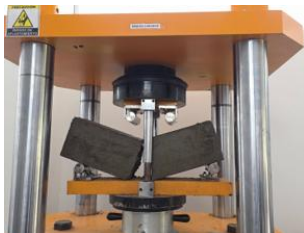


Edad: 7 Dias

Lateral

*Anexo D Registro fotográfico de espécimen a flexión de la muestra de control 0%***Edad: 7 días**

Vigueta 1



Vigueta 2



Vigueta 3

**Edad: 14 días**

Vigueta 1



Vigueta 2



Vigueta 3

**Edad: 28 días**

Vigueta 1



Vigueta 2



Vigueta 3



Anexo E Registro fotográfico de espécimen a flexión de la muestra de control 0.5%

Edad: 7 días

Vigueta 1



Vigueta 2



Vigueta 3



Edad: 14 días

Vigueta 1



Vigueta 2



Vigueta 3



Edad: 28 días

Vigueta 1



Vigueta 2



Vigueta 3



Anexo F Registro fotográfico de espécimen a flexión de la muestra de control 1%

Edad: 7 días

Vigueta 1



Vigueta 2



Vigueta 3



Edad: 14 días

Vigueta 1



Vigueta 2



Vigueta 3



Edad: 28 días

Vigueta 1



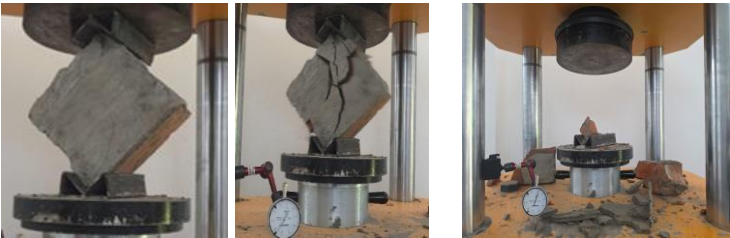
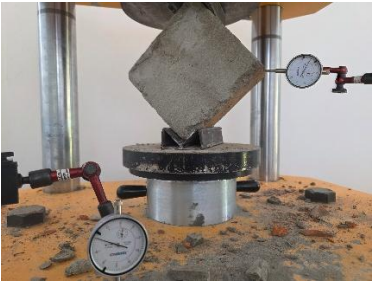
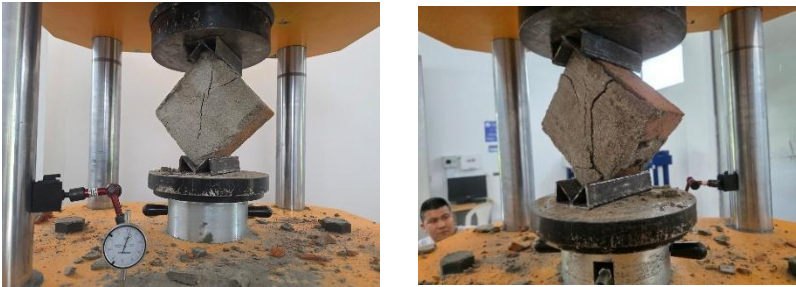
Vigueta 2



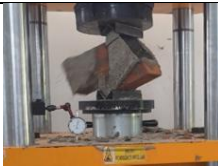
Vigueta 3



Anexo G Registro fotográfico de muretes a cortante de la muestra de control 0%

Montaje	Falla final del muro
MU1-1	
	
MU1-2	
	
MU1-3	
	

Anexo H Registro fotográfico de muretes a cortante de la muestra de fibra 0.5%

Montaje	Falla final del muro	
	M2-1	
		
	M2-2	
		
	M2-3	
		

Anexo I Registro fotográfico de muretes a cortante de la muestra de fibra 1%

Montaje	Falla final del muro
M3-1	
	
M3-2	
	
M3-3	
	

Anexo J Graficas Esfuerzo – Deformación Longitudinal, lateral.

Figura 78 *Grafica esfuerzo – deformación muestra control 0%*

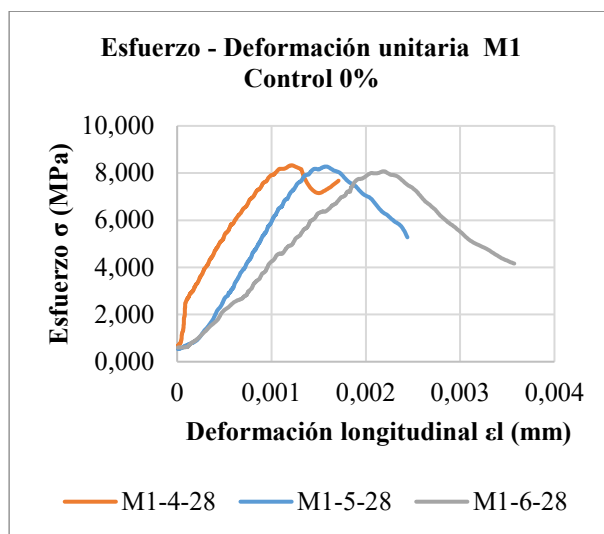


Figura 79 *Grafica deformación unitaria longitudinal – transversal muestra control 0%*

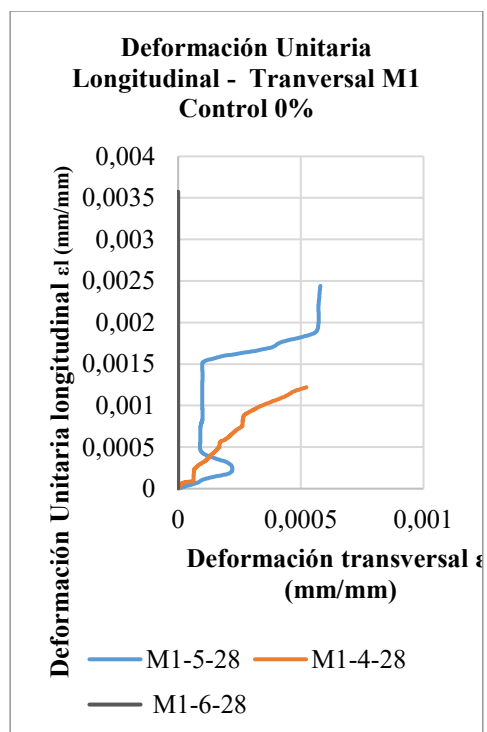


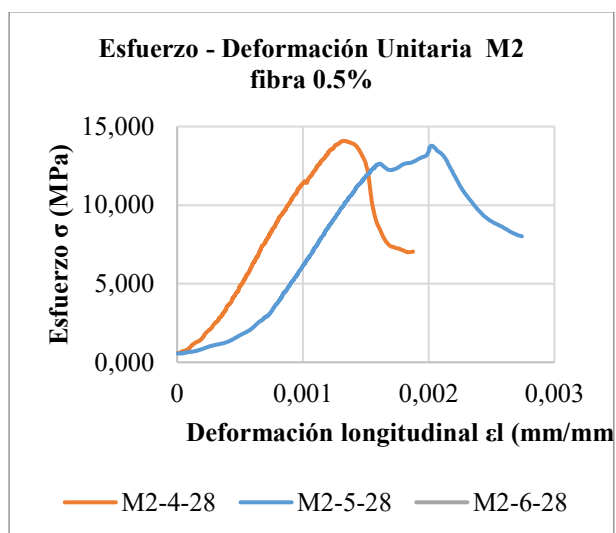
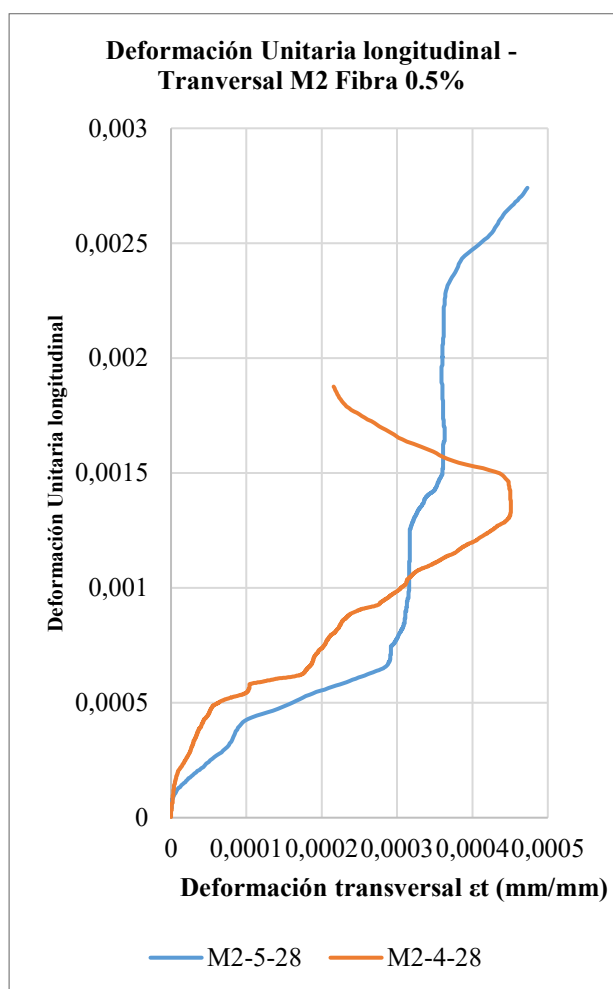
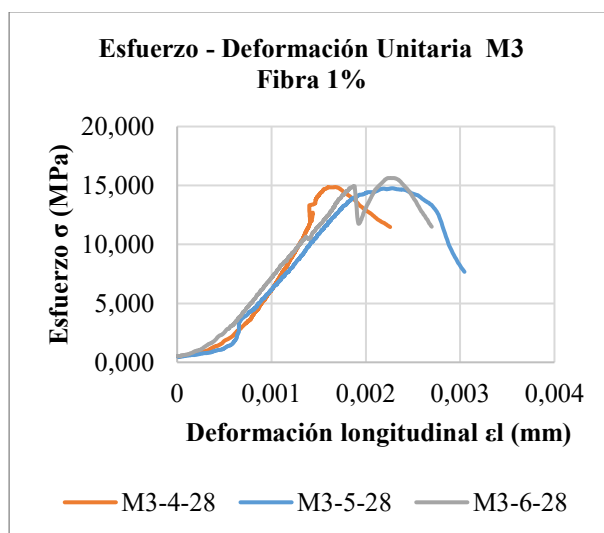
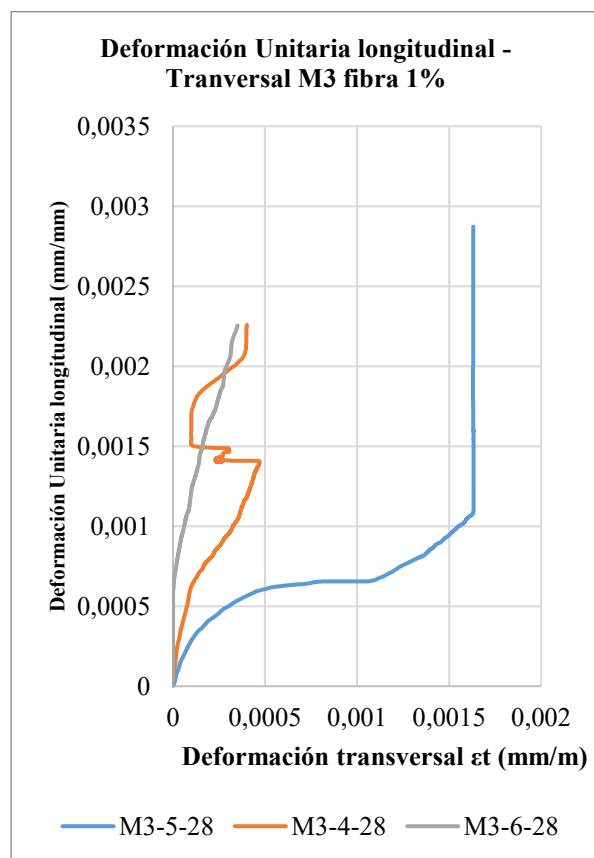
Figura 80 *Grafica esfuerzo – deformación muestra fibra 0.5%***Figura 81** *Grafica deformación unitaria longitudinal – transversal muestra fibra 0.5%*

Figura 82 *Grafica esfuerzo – deformación muestra fibra 1%***Figura 83** *Grafica deformación unitaria longitudinal – transversal muestra fibra 1%*

*Anexo K Criterio de Chauvenet de Módulos de Rotura.***Tabla 40** Verificación estadística del MR a los 7 días mediante el Criterio de Chauvenet.

Muestra	Identificador	n	MR	$\bar{x}$ (MPa)	s (MPa)	$ \sigma_i - \bar{x} $	$ \sigma_i - \bar{x} / s$	Valor crítico	¿Descartado?
M1 Control 0%	MV1-1-7	3	1.730	1.775	0.047	0.045	0.957	1.383	No
	MV1-2-7		1.824			0.049	1.038		No
	MV1-3-7		1.771			0.004	0.081		No
M2 Fibra 0.5%	MV2-1-7	3	2.385	2.390	0.016	0.006	0.347	1.383	No
	MV2-2-7		2.409			0.018	1.127		No
	MV2-3-7		2.377			0.013	0.780		No
M3 Fibra 1%	MV3-1-7	3	2.779	2.751	0.025	0.028	1.131	1.383	No
	MV3-2-7		2.742			0.009	0.364		No
	MV3-3-7		2.732			0.019	0.767		No

Tabla 41 Verificación estadística del MR a los 14 días mediante el Criterio de Chauvenet.

Muestra	Identificador	n	MR	$\bar{x}$ (MPa)	s (MPa)	$ \sigma_i - \bar{x} $	$ \sigma_i - \bar{x} / s$	Valor crítico	¿Descartado?
M1 Control 0%	MV1-1-14	3	2.045	2.151	0.092	0.106	1.153	1.383	No
	MV1-2-14		2.209			0.057	0.623		No
	MV1-3-14		2.200			0.049	0.530		No
M2 Fibra 0.5%	MV2-1-14	3	2.918	2.796	0.113	0.122	1.076	1.383	No
	MV2-2-14		2.694			0.102	0.901		No
	MV2-3-14		2.776			0.020	0.175		No
M3 Fibra 1%	MV3-1-14	3	2.789	2.770	0.017	0.019	1.146	1.383	No
	MV3-2-14		2.762			0.008	0.447		No
	MV3-3-14		2.758			0.012	0.698		No

Tabla 42 Verificación estadística del MR a los 28 días mediante el Criterio de Chauvenet.

Muestra	Identificador	n	MR	$\bar{x}$ (MPa)	s (MPa)	$ \sigma_i - \bar{x} $	$ \sigma_i - \bar{x} / s$	Valor crítico	¿Descartado?
M1 Control 0%	MV1-1-28	3	2.504	2.244	0.701	0.260	0.371	1.383	No
	MV1-2-28		2.778			0.534	0.762		No

Muestra	Identificador	n	MR	$\bar{x}$ (MPa)	s (MPa)	$ \sigma_i - \bar{x} $	$ \sigma_i - \bar{x} / s$	Valor crítico	¿Descartado?
M2 Fibra 0.5%	MV1-3-28		1.449			0.794	1.132		No
	MV2-1-28		3.966			0.073	0.556		No
	MV2-2-28	3	3.971	3.892	0.132	0.079	0.599	1.383	No
	MV2-3-28		3.740			0.152	1.154		No
	MV3-1-28		4.533			0.091	0.279		No
M3 Fibra 1%	MV3-2-28	3	4.714	4.443	0.326	0.271	0.831	1.383	No
	MV3-3-28		4.081			0.362	1.110		No

Anexo L Graficas esfuerzo cortante en función de la deformación por cortante.

Figura 84 Grafica esfuerzo cortante vs deformación por cortante MU1-1-28

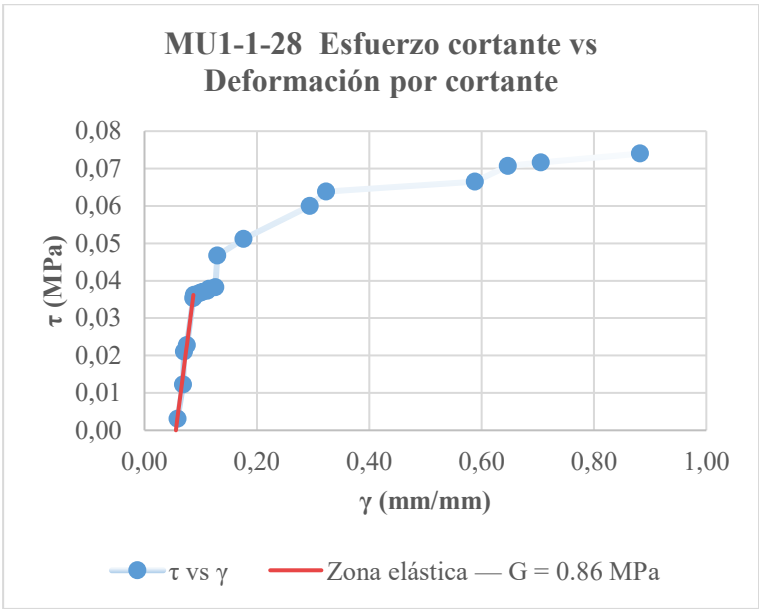


Figura 85 Grafica esfuerzo cortante vs deformación por cortante MU1-2-28

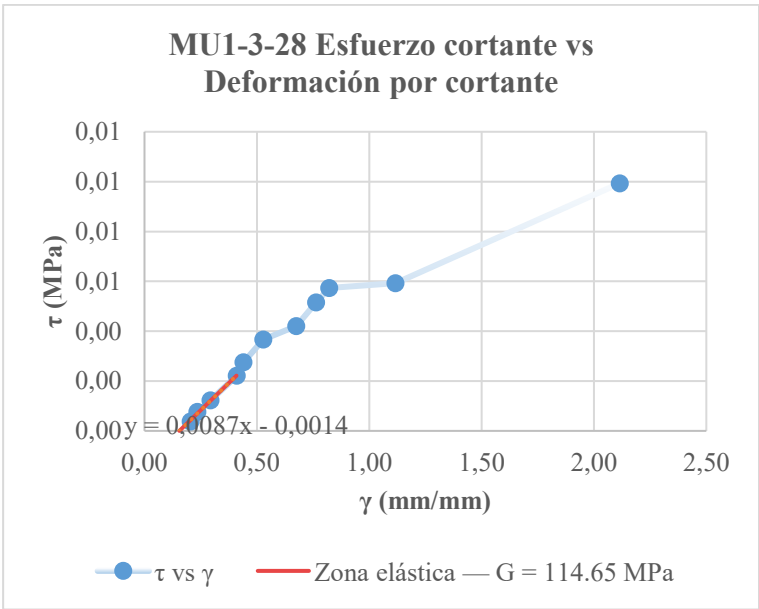


Figura 86 *Grafica esfuerzo cortante vs deformación por cortante MU1-3-28*

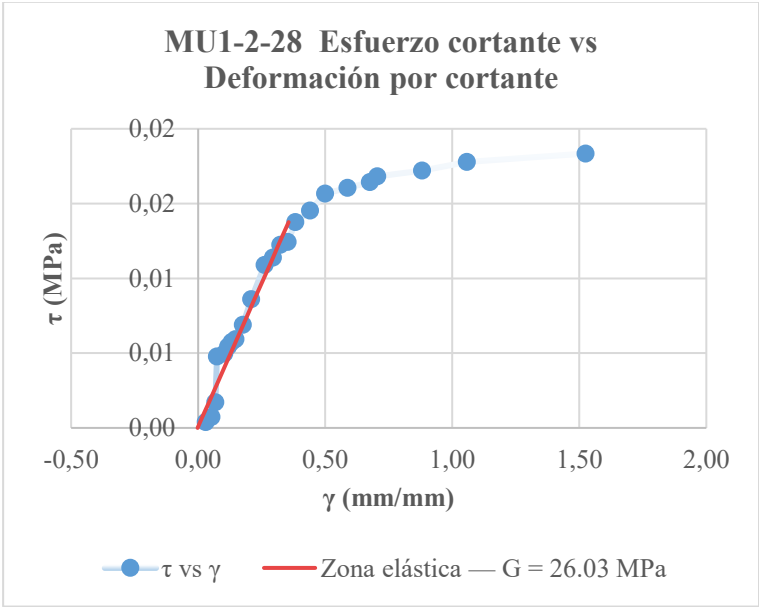


Figura 87 *Grafica esfuerzo cortante vs deformación por cortante MU2-1-28*

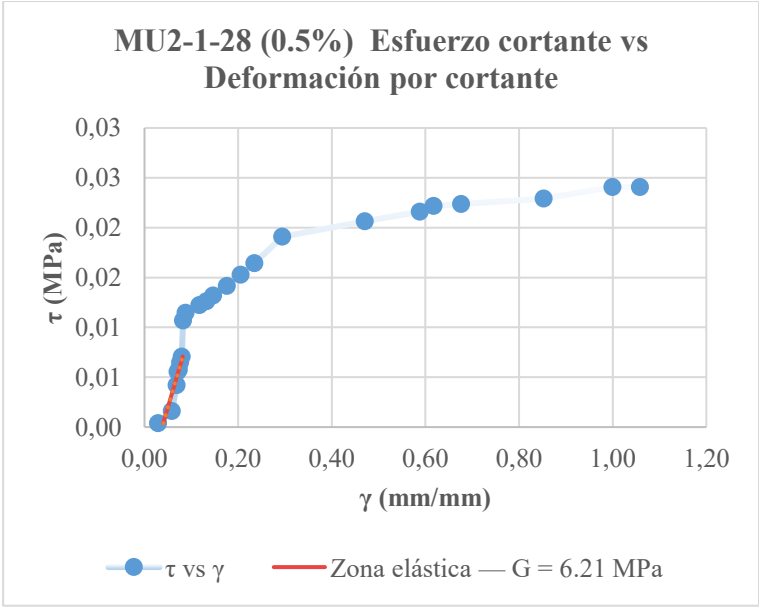


Figura 88 *Grafica esfuerzo cortante vs deformación por cortante MU2-2-28*

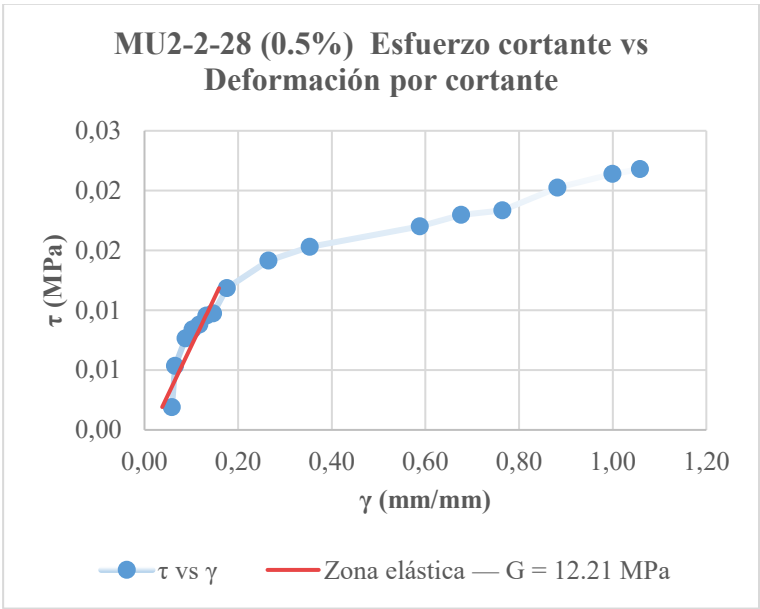


Figura 89 *Grafica esfuerzo cortante vs deformación por cortante MU2-3-28*

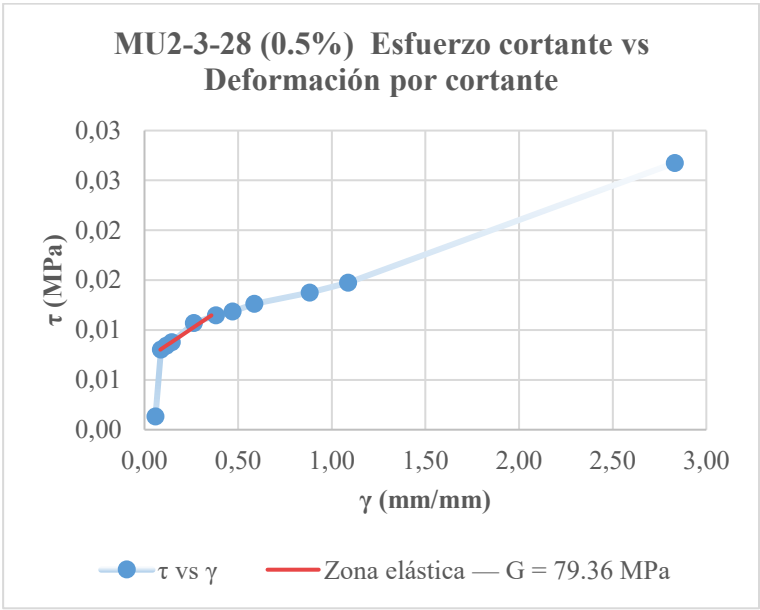


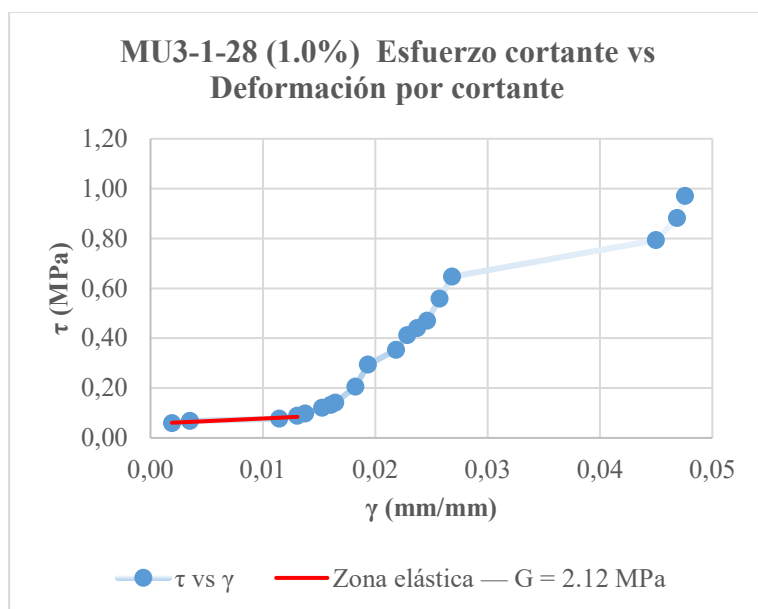
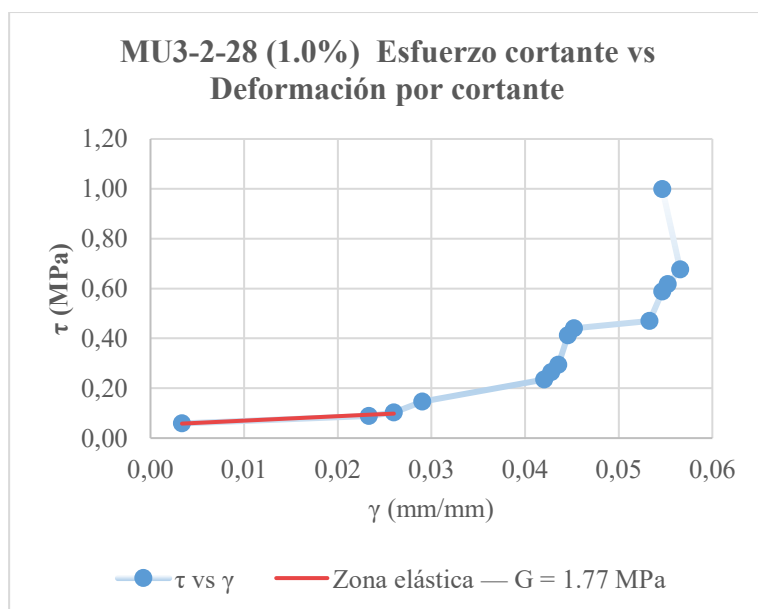
Figura 90 *Grafica esfuerzo cortante vs deformación por cortante MU3-1-28***Figura 91** *Grafica esfuerzo cortante vs deformación por cortante MU3-2-28*

Figura 92 *Grafica esfuerzo cortante vs deformación por cortante MU3-3-28*