

CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE
LA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH EN CONTACTO CON UN SUELO
FRICCIONANTE

FADEL ISAAC GUERRERO ALÍ



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
INGENIERÍA CIVIL
SANTIAGO DE CALI
2019

CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA
GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH EN CONTACTO CON UN SUELO
FRICCIONANTE

FADEL ISAAC GUERRERO ALÍ

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil

Director:

MANOLO GALVÁN CEBALLOS, MSc, Ph. D
Ingeniero Civil



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
INGENIERÍA CIVIL
SANTIAGO DE CALI
2019

Nota de aceptación:

Firma del Director de la Escuela

Firma del Director del Proyecto

Santiago de Cali, enero de 2019

Agradecimientos

A mis padres, pilares fundamentales de mi vida.

A mi familia, por su apoyo incondicional.

A mi director de grado, el profesor Manolo Galván, por ser guía durante este proceso.

A los grupos de investigación de Biomecánica, Labestrus y G-7, por su invaluable apoyo y conocimiento compartido.

Al personal operativo del Labestrus, por brindarme su tiempo en la realización de los ensayos.

A la Universidad del Valle y Colciencias, por apoyar económicamente este proyecto investigativo.

-Fadel Isaac Guerrero Alí.

Resumen

En el año 2010 se aprueba en el país el uso de la *Guadua angustifolia* como material estructural a través de la Norma de Construcción Sismo Resistente NSR-10 en su título G. A partir de esta inclusión, se han adelantado diferentes investigaciones en el país para determinar las características físicas y mecánicas de este material, con el fin de hacer más confiable y especializado su uso en la construcción cotidiana.

En este marco investigativo, este proyecto busca caracterizar las propiedades físico-mecánicas de la *Guadua angustifolia kunth* cultivada en el municipio de La Tebaida, Quindío, y determinar el deterioro de las mismas a través del tiempo en contacto directo con un suelo friccionante (arena), validando así el proceso de inmunización que se efectúa normalmente en el país. Durante la ejecución de este proyecto investigativo se realizaron 6 tipos de ensayos: compresión paralela y perpendicular a las fibras, corte paralelo a las fibras, tracción directa y flexión a luz corta y larga, en exposición a la intemperie durante 12 meses en contacto con un suelo friccionante, además de las pruebas realizadas al material antes de someterlo a la intemperie, obteniendo así un total de **449** ensayos válidos.

Al final, se realizó un análisis estadístico de los datos obtenidos para evaluar el comportamiento del material ante los diferentes tipos de esfuerzo y las variables del diseño factorial experimental, y se proponen valores admisibles de diseño de acuerdo a los resultados obtenidos.

Palabras clave: Bamboo, *Guadua angustifolia*, caracterización, esfuerzos admisibles.

Abstract

In 2010, the use of Bamboo *angustifolia* as a structural material was approved Colombia through the Colombian Seismic Building Codes NSR-10, Title G. From this inclusion, different investigations have been carried out in the country to determine the physical and mechanical characteristics of this material, in order to make its use in construction more reliable and specialized.

In this research framework, this project seeks to characterize the physico-mechanical properties of the *Guadua angustifolia* kunth cultivated in the municipality of La Tebaida, Quindío, and determine the deterioration of them through time in direct contact with a friction soil, thus validating the process of immunization that is normally carried out in the country. During the execution of this research project, 6 types of tests were carried out: parallel and perpendicular compression to the fibers, parallel cutting to the fibers, direct traction and short and long bending, on exposure to the weather in contact with a frictioning soil, in addition to the tests carried out on the material in its natural state, thus obtaining a total of **449** meaningful tests.

At the end, a statistical analysis of the data obtained was performed to evaluate the behavior of the material before the different types of effort and the experimental factorial design variables, and admissible design values are proposed according to the results obtained.

Keywords: Bamboo, *Guadua angustifolia*, characterization, allowable stresses.

Contenido

Resumen	V
Abstract	VI
Lista de figuras	X
Lista de tablas	XI
1. Introducción.....	1
1.1. El problema	1
1.1.1. Descripción del problema.....	1
1.1.2. Formulación del problema.....	2
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Justificación.....	3
2. Marco de referencia	4
2.1. Antecedentes	4
2.1.1. Caracterización físico-mecánica de la Guadua.....	4
2.1.2. Estudio de la variación de las propiedades de la Guadua	7
3. Marco teórico	8
3.1. Bambú Guadua <i>angustifolia</i> Kunth.....	8
3.1.1. Morfología general de la Guadua.....	9
3.1.2. Anatomía de la Guadua	11
3.1.3. Comportamiento físico-mecánico de la Guadua	12
3.2. Bases conceptuales de ensayos realizados.....	12
3.3. Propiedades físicas: contenido de humedad y densidad	16
4. Preliminares	20
4.1. Adquisición de material	20
4.2. Elaboración de probetas	20
4.2.1. Rotulado e inventariado de culmos.....	20
4.2.2. Elaboración de probetas para compresión y corte.....	21
4.2.3. Elaboración de probetas para flexión.....	21
4.2.4. Elaboración de probetas para tensión	22

4.3.	Construcción de ambiente para exposición a intemperie	22
4.4.	Adecuaciones para procedimientos experimentales	24
5.	Realización de ensayos	24
5.1.	Ensayo de compresión paralelo a las fibras	24
5.1.1.	Observaciones durante los ensayos	26
5.2.	Ensayo de compresión perpendicular a las fibras	27
5.2.1.	Observaciones durante los ensayos	28
5.3.	Ensayo de corte paralelo a las fibras	29
5.3.1.	Observaciones durante los ensayos	31
5.4.	Ensayo de flexión a luz corta (1.50m) y a luz larga (3.00m).....	31
5.4.1.	Observaciones durante los ensayos	33
5.5.	Ensayo de tracción paralela a las fibras.....	33
5.5.1.	Observaciones durante los ensayos	34
6.	Resultados y análisis de datos.....	34
6.1.	Determinación de valores atípicos o <i>outliers</i>	34
6.2.	Introducción a la obtención de esfuerzos admisibles	34
6.3.	Compresión paralela a las fibras.....	36
6.3.1.	Resultados a probetas sin alterar	36
6.3.2.	Resultados a probetas expuestas.....	37
6.3.3.	Análisis de datos.....	39
6.4.	Compresión perpendicular a las fibras.....	42
6.4.1.	Resultados a probetas sin alterar	42
6.4.2.	Resultados a probetas expuestas.....	43
6.4.3.	Análisis de datos.....	43
6.5.	Corte paralelo a las fibras	45
6.5.1.	Resultados a probetas sin alterar	46
6.5.2.	Resultados a probetas expuestas.....	46
6.5.3.	Análisis de datos.....	48
6.6.	Flexión a luz corta (1.50m).....	49
6.6.1.	Resultados a probetas sin alterar	49
6.6.2.	Resultados a probetas expuestas.....	50
6.6.3.	Análisis de datos.....	50

6.7. Flexión a luz larga (3.00m).....	51
6.7.1. Resultados a probetas sin alterar	52
6.7.2. Resultados a probetas expuestas.....	52
6.7.3. Análisis de datos.....	53
6.8. Tracción paralela a las fibras	54
6.8.1. Resultados a probetas sin alterar	54
6.8.2. Análisis de resultados	55
7. Correlaciones	55
7.1. Esfuerzo último vs. Diámetro externo (Compresión paralela)	55
7.2. Esfuerzo último vs. Altura probeta y Diámetro externo (Corte)	56
7.3. Esfuerzo último vs. Diámetro externo (Compresión perpendicular)	58
8. Conclusiones.....	60
9. Futuras líneas de investigación	62
Anexos	64
Referencias bibliográficas	69

Lista de figuras

Figura 3.1. Partes de la guadua.	9
Figura 3.2. Sección longitudinal del tallo.	9
Figura 3.3. Haces vasculares de la sección interior (a), media (b) y exterior (c) del culmo.	11
Figura 3.4. Convenciones ensayo de compresión perpendicular.	16
Figura 3.5. Coeficientes de modificación por contenido de humedad, NSR-10.	17
Figura 3.6. Esfuerzos admisibles (MPa) para CH=12%.	18
Figura 3.7. Corte y secado de muestras.	19
Figura 3.8. Obtención masa de muestras.	19
Figura 4.1. Nomenclatura usada para rotulado de culmos.	20
Figura 4.2. Nomenclatura usada para rotulado de probetas.	21
Figura 4.3. Ejemplo de probeta para ensayo de tracción.	22
Figura 4.4. Distribución de probetas en cajones de exposición.	23
Figura 4.5 (a) y (b). Construcción ambiente de exposición a la intemperie.	23
Figura 4.6. Montaje de carga para ensayos a flexión, NTC 5525.	24
Figura 5.1. Montaje típico ensayo a compresión paralela. Muestra IN-012-M-C-1.	25
Figura 5.2. Falla típica ensayo a compresión paralela. Muestra IN-008-M-2.	26
Figura 5.3. Falla típica ensayo a compresión paralela a guadua natural expuesta. Muestra NA-205-S-7.	26
Figura 5.4. Curva típica ensayo a compresión paralela. Muestra IN-012-M-C-2.	27
Figura 5.5. Montaje típico ensayo a compresión perpendicular.	28
Figura 5.6. Curva típica ensayo a compresión perpendicular. Muestra IN-006-S-CP-1.	29
Figura 5.7. Montaje típico ensayo a corte. Muestra IN-010-S-CP-1.	30
Figura 5.8. Apoyo y aplicación de carga.	30
Figura 5.9. Curva típico ensayo a corte. Muestra IN-012-M-CP-1.	31
Figura 5.10. Montaje de ensayo a flexión (luz corta y luz larga). Muestra IN-018-M-FC.	32
Figura 5.11. Montaje ensayo a tracción. Muestra IN-016-I-T-6.	33
Figura 6.1. Reducción en la resistencia a la compresión paralela.	40
Figura 6.2. Reducción en la resistencia a la compresión paralela.	44
Figura 7.1. Correlación entre esfuerzo último y diámetro externo, C-M.	56
Figura 7.2. Correlación entre esfuerzo último y diámetro externo, C-I.	56
Figura 7.3. Correlación entre esfuerzo último y altura, COR-S.	57
Figura 7.4. Correlación entre esfuerzo último y diámetro externo, COR-M.	57
Figura 7.5. Correlación entre esfuerzo último y altura, COR-I.	58
Figura 7.6. Correlación entre esfuerzo último y diámetro externo, CP-S.	58
Figura 7.7. Correlación entre esfuerzo último y diámetro externo, CP-M.	59
Figura 7.8. Correlación entre esfuerzo último y diámetro externo, CP-I.	59

Lista de tablas

Tabla 2.1. Esfuerzos obtenidos de algunas investigaciones.	7
Tabla 3.1. Usos de las partes de la guadua.	10
Tabla 6.1. Factores de reducción.	36
Tabla 6.2. Sumario de probetas ensayadas a compresión paralela.	36
Tabla 6.3. Probetas inmunizadas ensayadas a tiempo cero a compresión paralela.	37
Tabla 6.4. Probetas inmunizadas ensayadas a 12 meses a compresión paralela.	38
Tabla 6.5. Probetas naturales ensayadas a 12 meses a compresión paralela.	38
Tabla 6.6. Datos atípicos para ensayos a compresión paralela.	39
Tabla 6.7. Reducción en la resistencia a la compresión paralela después de 12 meses de exposición.	39
Tabla 6.8. Esfuerzos admisibles para compresión paralela.	41
Tabla 6.9. Sumario de probetas ensayadas a compresión perpendicular.	42
Tabla 6.10. Probetas inmunizadas ensayadas a tiempo cero a compresión perpendicular.	42
Tabla 6.11. Probetas inmunizadas ensayadas a 12 meses a compresión perpendicular.	43
Tabla 6.12. Probetas naturales ensayadas a 12 meses a compresión perpendicular.	43
Tabla 6.13. Datos atípicos para ensayos a compresión perpendicular.	44
Tabla 6.14. Reducción en la resistencia a la compresión perpendicular después de 12 meses de exposición.	44
Tabla 6.15. Esfuerzos admisibles a compresión perpendicular.	45
Tabla 6.16. Sumario de probetas ensayadas a corte.	45
Tabla 6.17. Probetas inmunizadas ensayadas a tiempo cero a corte paralelo.	46
Tabla 6.18. Probetas inmunizadas ensayadas a 12 meses a corte paralelo.	47
Tabla 6.19. Probetas naturales ensayadas a 12 meses a corte paralelo.	47
Tabla 6.20. Datos atípicos para ensayos a corte.	48
Tabla 6.21. Reducción en la resistencia a corte después de 12 meses de exposición.	48
Tabla 6.22. Esfuerzos admisibles a corte.	49
Tabla 6.23. Sumario de probetas ensayadas a flexión a luz corta.	49
Tabla 6.24. Probetas inmunizadas ensayadas a tiempo cero a flexión a luz corta.	50
Tabla 6.25. Probetas inmunizadas ensayadas a 12 meses a flexión a luz corta. ...	50
Tabla 6.26. Datos atípicos para ensayos de flexión a luz corta.	51
Tabla 6.27. Reducción en la resistencia a flexión a luz corta después de 12 meses de exposición.	51

Tabla 6.28. Probetas inmunizadas ensayadas a tiempo cero a flexión a luz larga.	52
Tabla 6.29. Probetas inmunizadas ensayadas a 12 meses a flexión a luz larga...	52
Tabla 6.30. Probetas naturales ensayadas a 12 meses a flexión a luz larga.	53
Tabla 6.31. Datos atípicos para ensayos de flexión a luz larga.....	53
Tabla 6.32. Reducción en la resistencia a flexión a luz larga después de 12 meses de exposición.	53
Tabla 6.33. Probetas inmunizadas ensayadas a tiempo cero a tracción.....	54
Tabla 6.34. Datos atípicos y esfuerzos últimos para ensayos de tracción.	55

1. Introducción

1.1. El problema

1.1.1. Descripción del problema

La *Guadua angustifolia* Kunth posee un lugar importante en la historia constructiva colombiana. “Durante el siglo XIX, período denominado el siglo del Bahareque, se construyeron cerca de 1000 pueblos en este material entre los departamentos de Risaralda, Quindío, Caldas, Valle del Cauca y Antioquia” (Londoño, 2011), lugares en donde ya era conocido su excelente comportamiento estructural. Es debido a este buen comportamiento durante las catástrofes naturales, y especialmente durante el desastre natural ocurrido en el eje cafetero de 1999, que se decide incluir la *Guadua angustifolia* como material constructivo mediante el Decreto 052 de 2002 a las Normas Colombianas de Diseño y Construcciones Sismo Resistentes (NSR-98), donde se contempla el uso de la *Guadua* como elemento constructivo para casas de bahareque encementado.

La *Guadua* es un material natural que posee calidades estructurales excepcionales. Es reconocida a nivel global como una de las mejores especies de bambú, debido principalmente a sus características físicas, entre las que podemos encontrar especímenes de hasta 30 metros de altura y 20 centímetros de diámetro (Londoño, 2011). Además de esto, presenta excelentes cualidades de resistencia, con valores de resistencia a la compresión simple típicos entre 400 y 600 kg/cm² (este último equivalente a aproximadamente 60 MPa) y una gran resistencia a las cargas solicitantes de flexión, razón por la que esta especie es conocida comúnmente como el acero vegetal. Sin embargo, varios autores han documentado que estas propiedades físico-mecánicas presentan una variación considerablemente alta en sus valores característicos (Alfredo, Moreno, Geovany, & Rojas, 2012; Ciro, Osorio, & Vélez, 2005; Correal, Echeverry, Ramírez, & Yamín, 2014; Luna, Lozano, & Takeuchi, 2014; Pantoja Trujillo & Acuña Jiménez, 2005; Prieto & Sánchez, 2000; Takeuchi, 2014; Takeuchi & González, 2007), debido principalmente a los factores de cultivo, como son la altura sobre el nivel del mar del mismo, la calidad del suelo, la práctica que se tenga para realizar el corte, entre otras.

Teniendo en cuenta lo anterior, y que la normativa que establece los procedimientos de ensayos para este material en nuestro país es relativamente reciente (Instituto Nacional de Normas Técnicas, 2007b), se hace necesario realizar una nueva caracterización físico mecánica para conocer de forma más precisa los esfuerzos admisibles para la *Guadua angustifolia* cultivada en la Tebaida (Quindío), lugar de procedencia del material de investigación.

El carácter natural de la *Guadua* le otorga la ventaja de ser eco-amigable y tener menor gasto energético con respecto a un material más convencional como el concreto (Villegas González, 2005). Sin embargo, esto conlleva problemas de vulnerabilidad debido a su propiedad higroscópica, es decir, que absorbe humedad del entorno que lo rodea, generando presencia de hongos e insectos xilófagos que se alimentan del culmo de *Guadua* y debilitan sus propiedades, asimismo, disminuyendo la resistencia del material ante las diferentes sollicitaciones de carga a las que se vea sometido.

Para contrarrestar este fenómeno, se realizan actualmente diferentes procesos de inmunización y secado al material. El proveedor del material a usar en esta investigación, InduGuadua SAS, realiza un proceso de inmunización con ácido bórico y bórax y diferentes procesos de secado que aseguran una mayor durabilidad de la *Guadua*. Con la metodología a emplear en la presente investigación, se busca validar la eficacia de estos procesos evaluando el impacto que estos tienen sobre culmos de *Guadua* inmunizada con respecto a culmos de *Guadua* en estado natural, mediante la simulación de condiciones de intemperie haciendo uso de un suelo friccionante.

1.1.2. Formulación del problema

¿Cómo es la variación de las propiedades físico-mecánicas de la *Guadua angustifolia* Kunth en contacto directo con un suelo friccionante?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Caracterizar la alteración ocasionada en las propiedades físico-mecánicas de la Guadua *angustifolia* Kunth cultivada en el municipio de la Tebaida (Quindío) cuando se encuentra en contacto directo con un suelo friccionante.

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades físico-mecánicas de la Guadua a usar en la presente investigación.
- Evaluar el deterioro de las propiedades físico-mecánicas de la Guadua *angustifolia* Kunth en exposición a condiciones ambientales de intemperie en contacto con un suelo friccionante.
- Validar la eficiencia del proceso de inmunización y secado que se le realiza a la Guadua tradicionalmente en Colombia.
- Correlacionar la resistencia físico-mecánica de la guadua con diferentes propiedades geométricas.

1.3. Justificación

La Guadua *angustifolia*, conocida como el oro verde del siglo XXI, es un material renovable, amigable, biodegradable y auto-sostenible, del que se tienen cerca de 51.000 ha plantadas en Colombia (Castaño & Moreno, n.d.; Morales & Kleinn, 2004). Gracias a sus propiedades físico-mecánicas, el diseño de la Guadua *angustifolia* como elemento estructural actualmente está contemplado en la NSR 10 en el Título G: Estructuras de madera y estructuras de Guadua (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010), y es utilizada en su forma natural para la construcción de viviendas, puentes, cubiertas, y otros usos más especializados como lo son los tratamientos bio-ingenieriles para los tratamientos de cauces y estabilización de taludes (especialmente, su uso para la construcción de trinchos). Sin embargo, el uso de este material como elemento constructivo es relativamente bajo en comparación con sistemas más convencionales como la mampostería, y los realizados con concreto y acero.

La Guadua ha contribuido históricamente al desarrollo del sector de la construcción, donde los mayores volúmenes se han consumido para la fabricación de formaleas, andamios, casetones y esterillas. Además, su uso se extiende

hasta la construcción de viviendas de estratos 4, 5 y 6, y recientemente de viviendas de interés social (Londoño, 2011). Gracias a esta contribución histórica del material al desarrollo del sector constructivo, el material ha venido estudiándose profundamente en las últimas décadas en nuestro país, lo que ha traído como resultado grandes avances en los criterios técnicos para el diseño y construcción de diferentes tipos de obras con este material. Sin embargo, estas obras se ejecutan sin tener en cuenta el factor natural en el diseño, es decir, que la Guadua presentará un deterioro progresivo a través del tiempo causado por diferentes factores naturales.

Es por esto que se considera necesario estudiar el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de la Guadua a través del tiempo, ya que esto propiciará la realización de diseños más eficaces y con períodos de diseño más realistas. Además, la caracterización físico-mecánica de este material aportará aún más información y credibilidad entre la población y la comunidad especializada, ya que enriquecerá los resultados obtenidos en diferentes investigaciones de otras regiones del país y adicionalmente, reforzará la posición de la Guadua como una alternativa renovable, amigable con el ambiente, de bajo costo y de excelente comportamiento estructural.

2. Marco de referencia

2.1. Antecedentes

2.1.1. Caracterización físico-mecánica de la Guadua

La Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) se perfila como el principal órgano de consulta responsable de la aparición de la Guadua *angustifolia* Kunth como material para la construcción de vivienda a través de la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistentes NSR-98, modificada por el Decreto 52 del 18 de enero de 2002, presentando el Capítulo E.7, denominado “Casas de uno y dos pisos en bahareque encementado”, en el cual se consignan las exigencias mínimas para asegurar a las casas construidas con bahareque encementado de uno y dos pisos un nivel de sismo resistencia suficiente para reducir al mínimo la posibilidad de que la vivienda colapse durante eventos sísmicos de gran impacto.

En cuanto a la normatividad nacional se refiere, se han desarrollado diferentes documentos a partir del 2007, que han otorgado el soporte metodológico y técnico, señalando un direccionamiento a la mayoría de trabajos de investigación que se relacionarán en este, incluyendo a la NSR-10. Estos documentos son las Normas Técnicas Colombianas, editadas por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, dentro de las que se encuentran: La NTC 5525 (Instituto Nacional de Normas Técnicas, 2007b) “Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua angustifolia* Kunth”, la cual es una versión adaptada para Colombia de la norma ISO 22157-1 (International Organization for Standardization, 2004) “Determination of physical and mechanical properties of bamboo”, cuyo objetivo primordial es presentar los métodos apropiados de ensayos para obtener resultados de laboratorio, los cuales se pueden utilizar para establecer valores y resistencias del material de referencia, y establecer la relación de las propiedades físicas y contenido de humedad, densidad, contracción, compresión paralela, flexión, corte paralelo y tracción paralela, entre otros. Este documento propicia la base metodológica para la gran mayoría de ensayos realizados en este proyecto de investigación, haciendo excepción del ensayo de compresión perpendicular a la fibra, el cual fue ejecutado siguiendo los lineamientos presentados en el documento titulado “Equipo portátil para ensayos de bambú” (Harries, Glucksman, Vieira, Liu, & Morán, n.d.).

Por otro lado, la NTC 5301 (Instituto Nacional de Normas Técnicas, 2007a) “Preservación y secado del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth”, tiene como principal objetivo el de establecer los requisitos que se deben cumplir para la preservación y secado de los culmos de *Guadua angustifolia* Kunth de acuerdo con las aplicaciones y usos; estos aplican específicamente para preservar el material de ataques bióticos y abióticos, y para establecer el contenido de humedad de acuerdo con su uso final. Finalmente, la NTC 5300 (Instituto Nacional de Normas Técnicas, 2008) establece los lineamientos que se deben seguir para la cosecha y postcosecha de los culmos maduros de *Guadua angustifolia* Kunth en el territorio nacional.

En cuanto a la investigación nacional, encontramos que se han desarrollado estudios sobre la caracterización de las propiedades físico-mecánicas de la *Guadua* de manera extensiva en las últimas décadas. Como ya se mencionó anteriormente, estas propiedades características del material varían en función de

las propiedades geográficas de la plantación y diferentes factores locales inherentes a la calidad del suelo donde estén, por lo que solo serán presentados resultados obtenidos en el marco investigativo nacional.

De acuerdo con lo anterior, tenemos que, en el año 2002, estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, obtuvieron la resistencia de la Guadua sometida a flexión longitudinal para diferentes luces libres que iban desde 0.5m hasta 3m, investigación que mostró resultados para esfuerzos máximos de hasta 221 kg/cm² y 311 kg/cm² para luces menores a 1.50m y mayores a 1.50m, respectivamente. Las probetas ensayadas eran provenientes de guaduales de Nimaima (Cundinamarca) y Armenia (Quindío) (Prieto & Sánchez, 2000).

En el año 2005, investigadores de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, realizaron ensayos para obtener los esfuerzos a la tensión paralela y a la cizalladura (cortante) a probetas provenientes del municipio de Venecia (Antioquia) (Ciro et al., 2005). Es necesario mencionar que a la fecha de realización de los ensayos no existía un documento en el país que presentara una normalización a la realización de ensayos a probetas de Guadua, por lo que estas pruebas fueron ejecutadas de acuerdo a los lineamientos establecidos por la ASTM y la INBAR. En el marco de esta investigación se obtuvieron resultados de 190.70 MPa de resistencia a la tensión con un coeficiente de variación del 34%, y de 5.57 MPa de resistencia a la cizalladura con un coeficiente de variación del 17%.

Dos años más tarde, en 2007, en el marco de un proyecto de investigación realizado en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, fueron obtenidas la resistencia a la compresión paralela de la fibra de la Guadua y su módulo de elasticidad. La Guadua usada en esta investigación fue extraída de tres guaduales ubicados en el municipio de Montenegro (Quindío) y uno ubicado en el departamento de Caldas (Takeuchi & González, 2007).

Más adelante, en el año 2012, investigadores del grupo GICA de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia realizaron una caracterización físico-mecánica extensiva de probetas de Guadua procedente del municipio de Miraflores (Boyacá), siguiendo los lineamientos establecidos en la NTC 5525 y el Reglamento Sismo Resistente Colombiano (NSR-10) (Alfredo et al., 2012). Los ensayos realizados fueron los necesarios para obtener esfuerzos de compresión paralela a las fibras (C), tensión paralela (T), corte paralelo (COR), y flexión (F).

Recientemente, en el año 2014, investigadores de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, caracterizaron Guadua proveniente de Quindío, Cundinamarca y el Valle del Cauca. En esta investigación se realizaron ensayos de flexión, compresión paralela, corte paralelo, tensión paralela, torsión y compresión perpendicular a la fibra, además de que se obtuvieron los módulos elásticos de la Guadua (Luna et al., 2014), lo que hace que esta sea una de las investigaciones más completas y que más ha aportado al estado del arte nacional. Estos ensayos se realizaron siguiendo la NTC 5525.

En la siguiente tabla, se presentarán resultados obtenidos en algunas de las investigaciones mencionadas anteriormente, relacionando los diferentes valores de esfuerzos últimos obtenidos para los tipos de ensayos ejecutados.

Tabla 2.1. Esfuerzos obtenidos de algunas investigaciones.

ESFUERZO [MPa]	Guerrero (2007)			Luna et. al. (2014)			Cely et. al. (2012)		
	S	M	I	S	M	I	S	M	I
Comp. paralela	40.12	45.14	45.31	19.10	19.30	23.60	51.00	43.00	27.00
Comp. perpendicular	7.23	5.39	5.38	2.40	1.00	2.90	-	-	-
Corte paralelo	7.32	7.78	8.00	3.20	4.30	3.00	11.30	10.30	10.30
Flexión	57.89	61.53	72.03	35.80	40.80	-	107.00	110.00	230.00
Tensión	-	-	-	-	-	-	-	112.50	-

Fuente: Propia. S: Parte Superior; M: Parte Media; I: Parte Inferior.

2.1.2. Estudio de la variación de las propiedades de la Guadua

En el año 2012, en la Universidad de Guayaquil, en Ecuador, se realizaron pruebas de envejecimiento acelerado a varias probetas de bambú laminado pegado, siguiendo lineamientos establecidos por la ASTM (Lozada Aspiazu & Gómez, 2012). Las pruebas consistían en exponer las probetas a diferentes ciclos de humedad y radiación UV, siendo necesaria la construcción de una *cámara de envejecimiento acelerado*, cumpliendo con los parámetros documentados en la Norma Técnica ASTM G53-96 (Práctica estándar para la exposición a la luz y el agua de materiales no metálicos, 1996). Este proceso variaba en razón de cuatro factores, como lo eran la luz UV, la temperatura, la humedad y los ciclos de

condensación. Según lo descrito por el autor, los resultados concluirían que la resistencia del material a los esfuerzos cortantes sí presenta una disminución en relación al tiempo de exposición de la probeta a las condiciones de intemperie establecidas en la investigación.

Recientemente, en el año 2014, se realizó una investigación conjunta entre la Universidad de Pittsburgh y el Shanghai Research Institute of Building Sciences, donde se evaluó el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de varias probetas de bambú *moso* (conocido como “bambú de invierno”) después de haber sufrido un proceso de inmersión en agua durante algunos días (lo cual variaba el contenido de humedad de la probeta) (Xu, Harries, Li, Liu, & Gottron, 2014). Los resultados de la investigación mostraron que la resistencia a compresión del material presentó una disminución considerable en relación al aumento del contenido de humedad de la probeta, siendo suficiente solo un día de exposición para evidenciar este cambio.

3. Marco teórico

3.1. Bambú *Guadua angustifolia* Kunth

La *Guadua* es una gramínea nativa de la familia del bambú, y su nombre fue descrito por el botánico alemán Karl Sigmond Kunth en 1822 como un género segregado del género asiático *Bambusa*. Kunth emplea el vocablo indígena “*guadua*”, usado por las comunidades nativas de la zona Andina para referirse a este tipo de bambú, y designa a *Guadua angustifolia* como la especie tipo, en donde el epíteto específico significa “*hoja angosta*”.

La *Guadua angustifolia* Kunth, una de las diferentes especies del género *Guadua*, se destaca del resto de bambúes americanos por poseer excelentes propiedades físico mecánicas en un corto período de tiempo, siendo uno de los 20 mejores bambúes que existen alrededor del mundo (Lozada Aspiazú & Gómez, 2012). La presencia de esta especie abunda en la región central andina, mientras que en la regiones de la Orinoquía y Atlántica se encuentra la *Guadua Amplexifolia* y en el Amazonas y el corredor chocoano se encuentran la *Guadua*

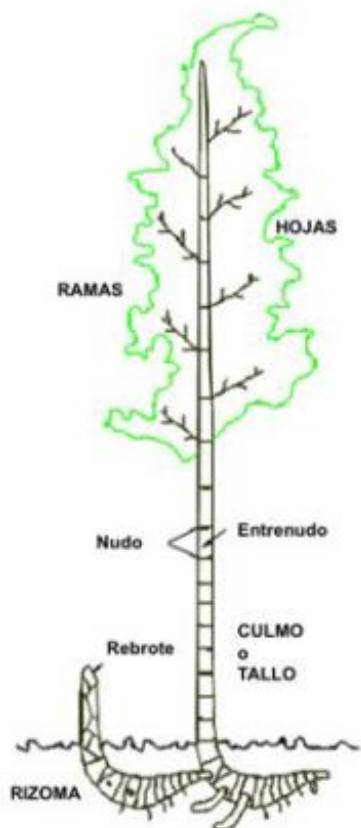
Superba y la *Guadua Weberbaueri* (Uribe Vallejo & Durán Contreras, 2002), siendo estas cuatro especies las predominantes en el territorio colombiano.

3.1.1. Morfología general de la Guadua

Las principales partes de la guadua (Figura 3.1) son: el rizoma, el tallo o culmo, las ramas y las hojas. El rizoma es el sistema de soporte de la guadua, tiene una parte superficial y una subterránea donde se encuentran las raíces de la planta, las cuales se ramifican y propagan generando brotes de nuevas guaduas.

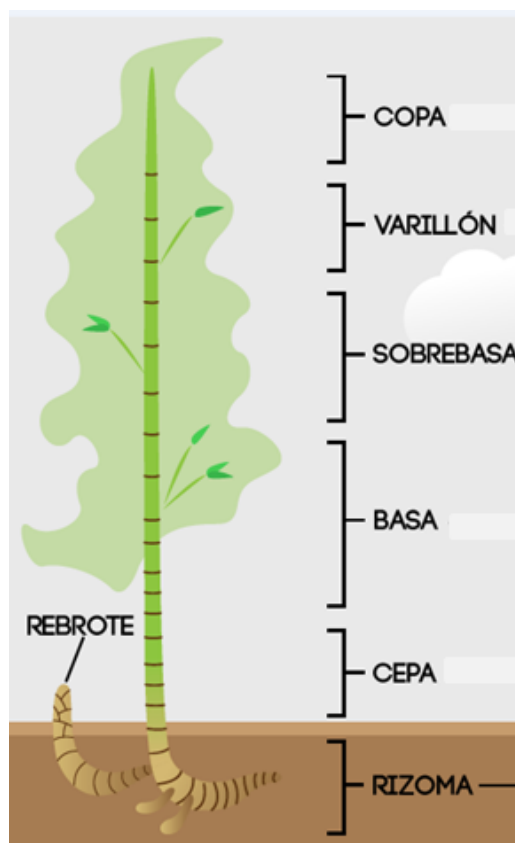
De acuerdo con el Centro Nacional para el estudio del Bambú – Guadua, esta se divide en seis partes a lo largo de su sección longitudinal (Tabla No. 2, Figura 3.2), donde cada una presenta un uso particular.

Figura 3.1. Partes de la guadua.



Fuente: Figura 2.1. (Takeuchi, 2014)

Figura 3.2. Sección longitudinal del tallo.



Fuente: Propia.

Para este proyecto de investigación serán tomadas probetas de la cepa, la basa y la sobrebasa, las cuales serán llamadas parte inferior, media y superior, respectivamente.

Tabla 3.1. Usos de las partes de la guadua.

PARTE	DESCRIPCIÓN	UTILIZACIÓN
RIZOMA	Es un tallo modificado, subterráneo, que conforma el soporte de la planta. Popularmente se conoce como “caimán”. Las raíces o rizomas se pueden encontrar hasta 2.0 metros de profundidad.	En decoración y juegos infantiles
CEPA	Es la sección basal del culmo con mayor diámetro, la distancia de sus entrenudos es corta, lo cual le proporciona una mayor resistencia a la compresión.	Se utiliza para columnas en construcción, cercos y entibados; para estabilidad de taludes tiene gran uso, dada su sección.
BASA	Parte de la guadua que posee mayores usos, debido a que su sección es menos cónica y la distancia entre nudos es mayor que en la cepa.	Si el tallo es de buen diámetro se utilizan también para columnas, además de esta sección se elabora la esterilla, la cual tiene múltiples usos en construcción de casetones, paredes, postes y para formaletear. Es el tramo más comercial de la guadua.
SOBREBASA	El diámetro es menor y la distancia entre nudos es un poco mayor comparada con la basa. Es un tramo de guadua con buen comercio, debido a su diámetro que permite buenos usos.	Utilizada como elemento de soporte en estructuras de concreto de edificios en construcción (puntal). También se emplea como viguetas para formaletear vaciados de losas, vigas y columnas.
VARILLÓN	Sección de menor diámetro.	Generalmente se utiliza en la

	Su longitud puede alcanzar los 3 metros.	construcción de apuntalamientos y como soporte (correa) para disponer tejas de barro o paja.
COPA	Es la parte apical de la guadua.	Se pica en el suelo del guadua como aporte de materia orgánica.

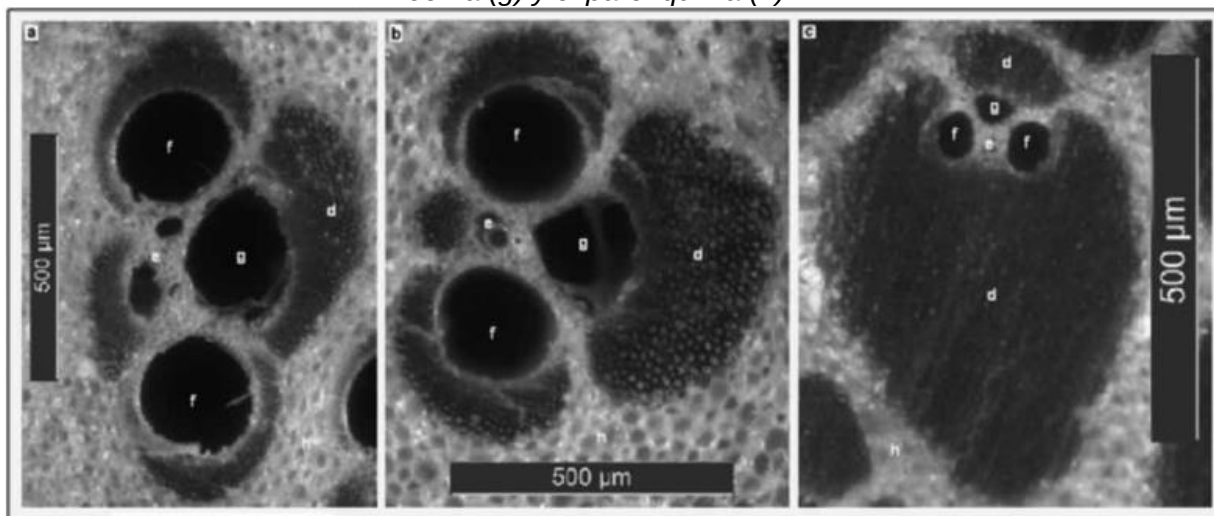
Fuente: Adaptación de Tabla No. 2 “Descripción y utilización de la guadua” (Uribe Vallejo & Durán Contreras, 2002).

3.1.2. Anatomía de la Guadua

De acuerdo a la anatomía interna de la guadua, la misma presentará un particular comportamiento mecánico ante las diferentes solicitaciones de carga.

Al realizar un corte transversal a un culmo de guadua se pueden distinguir la corteza exterior, que es la encargada de proteger la parte interna e impedir el paso de agua que pueda causar algún deterioro; la capa interna, que está compuesta de capas de células que rodean la cavidad interna de la guadua; y los haces vasculares, que están compuestos por el sistema conductivo (formado por dos vasos, el floema y el protoxilema), las células parenquimáticas entre los tubos que forman el sistema conductivo y los haces de fibras (Takeuchi, 2014).

Figura 3.3. Haces vasculares de la sección interior (a), media (b) y exterior (c) del culmo. Los tejidos que lo componen son las fibras (d), protoxilema (e), el metaxilema (f), el floema (g) y el parénquima (h).



Fuente: (Zaragoza-Hernández et al., 2014)

3.1.3. Comportamiento físico-mecánico de la Guadua

Gracias a la orientación axial de las fibras de la guadua, esta presenta gran resistencia a esfuerzos aplicados en este sentido. En este mismo sentido, la parte exterior del culmo tiene mayor cantidad de fibras y es más dura, por lo que desarrolla mayor resistencia a tensión en probetas extraídas de la pared del culmo que las probetas extraídas del culmo completo (Takeuchi, 2014). Carvajal y colaboradores (Carvajal, Ortigón, & Romero, 1981) encontraron valores promedio de resistencia a la tensión de 165 MPa, 156 MPa y 87 MPa de probetas extraídas de la pared externa con nudo, de la pared completa sin nudo y de la pared completa con nudo respectivamente.

En cuanto a la compresión perpendicular a las fibras podemos observar una notable disminución en los esfuerzos últimos obtenidos. Esto se debe a que la guadua está compuesta por fibras longitudinales fuertes, sin embargo, estas se encuentran en una matriz relativamente débil y blanda, la cual no aporta la suficiente resistencia ante la aplicación de fuerzas radiales y circunferenciales.

En el marco de lo mencionado anteriormente, la resistencia al corte paralelo a las fibras y la compresión perpendicular a las fibras es bastante baja, gracias a la presencia de fuertes fibras en el sentido longitudinal contenidas en una matriz débil, que es la encargada de soportar este tipo de sollicitaciones de carga.

3.2. Bases conceptuales de ensayos realizados

En la investigación se asumirá la Guadua *angustifolia* como un material transversalmente isótropo, según lo propuesto por Torres (Torres, Ghavami, & García, 2007), donde su comportamiento está definido por cinco constantes elásticas independientes, las cuales son: módulos de Young en dirección axial (E_z) y en dirección circunferencial ($E_\theta = E_r$), coeficientes de Poisson radial-circunferencial ($\nu_{r\theta}$) y axial-circunferencial ($\nu_{z\theta}$), y un módulo cortante axial-circunferencial ($G_{z\theta}$). De igual forma, es necesario obtener todos los resultados promedios de resistencia última de tal manera que se pueda evaluar el comportamiento de los trinchos en guadua por este parámetro. Para cumplir estos objetivos es necesario realizar los siguientes ensayos:

- Compresión paralela a las fibras (C), NTC 5525.. (Instituto Nacional de Normas Técnicas, 2007b)
- Compresión perpendicular a las fibras (CP). (Harries et al., n.d.)
- Corte paralelo a las fibras (COR), NTC 5525. (Instituto Nacional de Normas Técnicas, 2007b)
- Flexión a luz larga – 3 metros (FL), NTC 5525. (Instituto Nacional de Normas Técnicas, 2007b)
- Flexión a luz corta – 1.5 metros (FC). (Harries et al., n.d.)
- Tracción paralela a las fibras (T), NTC 5525. (Instituto Nacional de Normas Técnicas, 2007b)

El ensayo de corte paralelo a las fibras (COR) se realizará dado que las últimas investigaciones arrojan que la Guadua falla estructuralmente por corte, por lo que se considera relevante llevar a cabo estas pruebas. De igual forma, para el ensayo de Compresión Perpendicular a las fibras (CP) se asumirá el coeficiente de Poisson radial-circunferencial ($\nu_{r\theta}$) como 0.226, promedio de los resultados obtenidos en recientes investigaciones (García, Rangel, & Ghavami, 2012). Estos valores son fundamentales para el modelamiento en elementos finitos de estructuras que usen este material como elemento constructivo. Se realizarán ensayos de flexión con luces de $L=1.5$ metros y $L=3.0$ metros, dado que un estudio presentado por Prieto y Sánchez (2002) muestra un cambio significativo en la resistencia de la Guadua a flexión según el tamaño de la luz.

Como se mencionó anteriormente, en la actualidad existen varias normativas que presentan protocolos de ensayo para obtener las propiedades físico-mecánicas de la Guadua; entre las más importantes están:

- NTC 5525
- Informe Técnicas No. 36 INBAR (no es una normativa, pero es una guía que ofrece protocolos de ensayo)
- ISO 22157
- ASTM D143-94 (no especializada en Guadua)

Para esta investigación han sido usados la norma colombiana, NTC 5525, y el Informe de Técnicas No. 36 de la INBAR. De la NTC 5525, fueron usados los

protocolos y ecuaciones establecidas para la obtención de los esfuerzos en los ensayos de compresión, corte y tensión paralelos a las fibras, presentadas a continuación:

$$\sigma_c = \frac{F_{ult}}{A} \quad (3.1) \quad A = \frac{\pi(\phi_e^2 - \phi_i^2)}{4} \quad (3.2)$$

Donde:

- ϕ_e : Diámetro externo de la probeta
- ϕ_i : Diámetro interno de la probeta
- F_{ult} : Carga última desarrollada en el ensayo
- A : Área efectiva de la probeta
- σ_c : Resistencia a la compresión paralela a las fibras

$$\tau = \frac{F_{ult}}{4lt} \quad (3.3) \quad t = \frac{\phi_e - \phi_i}{2} \quad (3.4)$$

Donde:

- F_{ult} : Carga última desarrollada en el ensayo
- τ : Resistencia al corte paralelo a las fibras
- t : Espesor efectivo de la probeta
- ϕ_e : Diámetro externo de la probeta
- ϕ_i : Diámetro interno de la probeta
- l : Longitud efectiva de la probeta

$$\sigma_t = \frac{F_{ult}}{A} \quad (3.5) \quad A = t \times b \quad (3.6)$$

Donde:

- F_{ult} : Carga última desarrollada en el ensayo
- A : Área efectiva de la probeta
- σ_t : Esfuerzo a tensión
- t : Espesor efectivo de la probeta
- b : Ancho efectivo de la probeta

El protocolo seguido en esta investigación para el ensayo a flexión está basado en la NTC 5525, pero decidió modificarse los puntos de ubicación de la carga, ya que la norma establece que debe aplicarse a una distancia $d=L/3$, sin embargo se ha concluido, apoyado en otras investigaciones (Castrillón Valdés & Malaver Zapata, 2004), que la carga debe ser aplicada en los nudos más cercanos a $L/3$ asegurando la centralidad de aplicación, evitando de esta manera que se presente el fenómeno de aplastamiento de la probeta. Es por esto que a la ecuación presentada en la norma debió modificarse, y ser usada como se presenta a continuación:

$$\sigma_f = \frac{M \frac{\emptyset}{2}}{I} \quad (3.7)$$

$$I = \frac{\pi}{64} \cdot (\emptyset^4 - (\emptyset - 2t)^4) \quad (3.8) \quad M = \frac{F_{ult}}{2} \cdot a \quad (3.9)$$

Donde:

- σ_f : Resistencia a flexión
- M: Momento crítico a flexión
- $\emptyset$: Diámetro externo de la probeta
- I: momento de inercia de la sección transversal de la probeta
- t: Espesor de la probeta
- a: Distancia desde el dispositivo de soporte hasta el dispositivo de aplicación de la carga
- F_{ult} : Carga última desarrollada en el ensayo

Finalmente, en lo concerniente al ensayo de compresión perpendicular a la fibra, se usó el protocolo establecido en el Informe de Técnicas No. 36 de la INBAR, ya que este ensayo no se encuentra reglamentado por la norma colombiana. Las ecuaciones a usar se presentan a continuación.

$$M_{NS} = \left(\frac{F_{ult} * R}{\pi} \right) \cdot \left(1 - \frac{t^2}{12 R^2} \right) \quad (3.10)$$

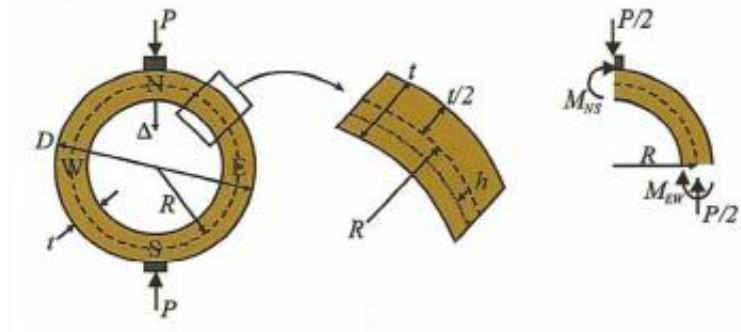
$$h = R - \frac{t}{\ln\left(\frac{\frac{2R}{t} + 1}{\frac{2R}{t} - 1}\right)} \quad (3.11)$$

$$f_{rNS} = M_{NS} \cdot \frac{12\left(\frac{t}{2} + h\right)}{L t^3} \quad (3.12)$$

Donde:

- M_{NS} : Momento producido en el sentido Norte-Sur
- F_{ult} : Carga última desarrollada en el ensayo
- R : Radio de la probeta
- t : Espesor de la probeta
- L : Longitud de la probeta
- f_{rNS} : Módulo de rotura en el sentido Norte-Sur
- h : distancia desde la mitad del espesor de la probeta hasta la sección crítica (ver Figura 3.4).

Figura 3.4. Convenciones ensayo de compresión perpendicular.



Fuente: Informe de Técnicas No. 36, INBAR.

3.3. Propiedades físicas: contenido de humedad y densidad

La guadua, como material higroscópico, tiene la propiedad de adquirir humedad del ambiente con el cual está en contacto; estos cambios se ven reflejados en la resistencia que presenta ante las diferentes sollicitaciones mecánicas a las que se le someta. Teniendo en cuenta esto, y que uno de los principales objetivos de este proyecto de investigación es caracterizar la variación

en el comportamiento físico-mecánico de la guadua en contacto con un ambiente de constantes ciclos de cambios de humedad, es evidente la necesidad de llevar un registro de la misma en cada una de las probetas ensayadas para cada uno de los niveles de tiempo del diseño factorial. Además, se realizarán ensayos a probetas sin exponer a la intemperie y secadas al aire libre para determinar la densidad de los culmos de guadua adquiridos en el proyecto, consiguiendo una completa caracterización del material.

En el título G de la NSR-10, relacionado a la construcción en guadua, se presentan unas correcciones de esfuerzos admisibles ante cada uno de los tipos de solicitaciones para diferentes condiciones de humedad. Como se puede apreciar en la figura 3.4, la corrección no se aplica para contenidos de humedad menores o iguales al 12%, mientras que cuando este parámetro supera apenas el 19% la reducción de resistencia en el diseño será de casi un 30% con respecto al valor original. Esto aparece como un fuerte respaldo a la necesidad de caracterizar la variación de la resistencia mecánica conforme al paso del tiempo en contacto con un ambiente húmedo.

Figura 3.5. Coeficientes de modificación por contenido de humedad, NSR-10.

Esfuerzos		CH ≤ 12%	CH = 13%	CH = 14%	CH = 15%	CH = 16%	CH = 17%	CH = 18%	CH ≥ 19%
Flexión	F_b	1.0	0.96	0.91	0.87	0.83	0.79	0.74	0.70
Tracción	F_t	1.0	0.97	0.94	0.91	0.89	0.86	0.83	0.80
Compresión paralela	F_c	1.0	0.96	0.91	0.87	0.83	0.79	0.74	0.70
Compresión perpendicular	F_p	1.0	0.97	0.94	0.91	0.89	0.86	0.83	0.80
Corte	F_y	1.0	0.97	0.94	0.91	0.89	0.86	0.83	0.80
Modulo de elasticidad	$E_{0.5}$	1.0	0.99	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.90
	$E_{0.05}$								
	E_{min}								

Fuente: NSR-10 / Tabla G.12.7-5.

A continuación, se presentan los esfuerzos admisibles para un contenido de humedad igual o menor al 12%.

Figura 3.6. Esfuerzos admisibles (MPa) para CH=12%.

F_b Flexión	F_t Tracción	F_c Compresión	$F_{p\perp}$ Compresión $\perp$	F_v Corte
15	18	14	1.4	1.2

Fuente: NSR-10 / Tabla G.12.7-1

Para esta investigación, el contenido de humedad se determinó siguiendo las directrices consignadas en la NTC 5525 (Instituto Nacional de Normas Técnicas, 2007b). En el proceso, básicamente, se somete una muestra a un proceso de secado artificial y posteriormente se determina la pérdida de masa de la misma la cual es atribuida a la humedad evaporada. Para ello, las muestras seleccionadas para el ensayo de contenido de humedad fueron extraídas de la sección de falla evidente de la probeta ensayada según el tipo de sollicitación de carga que haya sido asignado, teniendo en cuenta que el número de muestras para este ensayo fue mayor en las probetas expuestas a la intemperie que en las muestras secadas al aire y en estado original.

Así pues, las muestras usadas para la determinación del contenido de humedad se pesaron en una balanza electrónica con exactitud de 0.01g, y posteriormente se introdujeron durante 48 horas en un horno eléctrico para su correspondiente proceso de secado a 105 °C. Acto seguido, se registró el peso de su masa y, siguiendo la ecuación 3.13, se determinó su contenido de humedad:

$$CH = \frac{m_i - m_f}{m_f} \times 100 \quad (3.13)$$

Donde:

- m_i es la masa de la muestra antes del secado.
- m_f es la masa de la muestra después del secado.
- CH es el contenido de humedad en la muestra.

La geometría de las muestras es aproximadamente la de un ortoedro, donde la altura es la original de la probeta ensayada, el ancho es aproximadamente de 1 cm y la profundidad es el espesor del culmo. Gracias a esto, se puede obtener un valor de densidad bastante cercano al real tomando las

medidas con un calibrador vernier digital y procediendo con los cálculos correspondientes, de acuerdo con la ecuación (3.14):

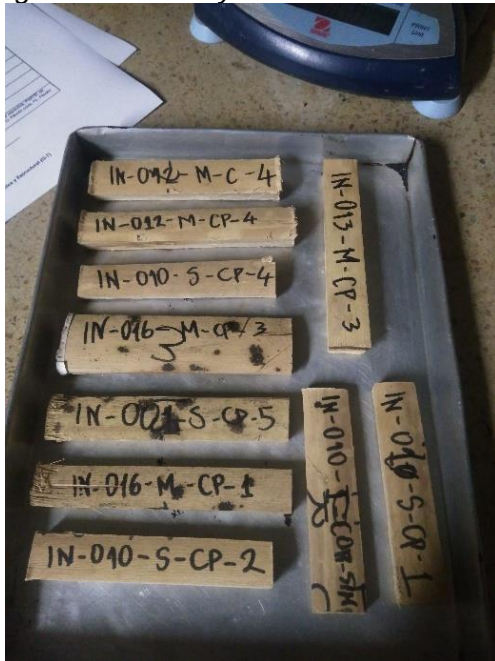
$$\rho = \frac{m_i}{h * t * b} \quad (3.14)$$

Donde:

- ρ es la densidad de la muestra secada al aire.
- m_i es la masa inicial de la muestra.
- h es la altura de la muestra.
- t es el espesor de la muestra.
- b es el ancho de la muestra.

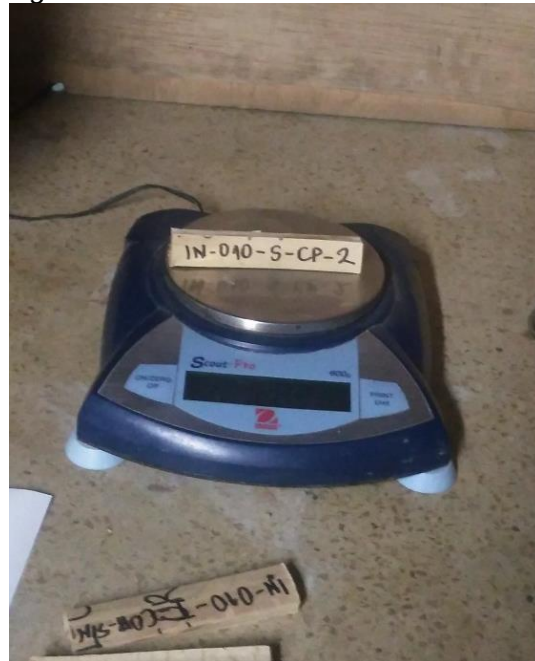
A continuación, se puede apreciar registro fotográfico del proceso anteriormente descrito.

Figura 3.7. Corte y secado de muestras.



Fuente: Propia.

Figura 3.8. Obtención masa de muestras.



Fuente: Propia.

4. Preliminares

4.1. Adquisición de material

Los culmos de guadua usados en la presente investigación fueron adquiridos a Induguadua SAS, proveedor de este material ubicado en el municipio de La Tebaida, Quindío. Esta empresa compra la materia prima en los guaduales del sector para después someterla a un proceso de transformación industrial y posteriormente usarla en diferentes actividades que van desde las confecciones artesanales, hasta la construcción de obras civiles.

Para la presente investigación se ordenaron culmos de guadua maduros de aproximadamente 6 metros de largo, con diámetros variados entre 8 y 12 cm y de las tres partes de la guadua (inferior, media y superior). Además, el 70% de los culmos adquiridos había sufrido el proceso de secado e inmunización con ácido bórico y bórax descrito anteriormente en el documento y el 30% restante eran culmos simplemente secados al aire libre, para un total de 221 culmos de guadua.

4.2. Elaboración de probetas

4.2.1. Rotulado e inventariado de culmos

Después de recibir y almacenar los culmos de guadua, se realizó el rotulado de cada uno de estos de la siguiente manera:

Figura 4.1. Nomenclatura usada para rotulado de culmos.

IN	001	S
a	b	c

Donde:

- **a:** IN: Inmunizada; NA: Natural.
- **b:** Consecutivo de culmo de guadua, de 001 a 221.
- **c:** Parte de la guadua de donde se obtuvo el culmo.

Además, para cada uno de los culmos de guadua se obtuvo diferentes propiedades físicas como lo son: diámetros inferiores, diámetros superiores,

número de nudos, separación entre nudos en la parte superior, media e inferior, y observaciones.

4.2.2. Elaboración de probetas para compresión y corte

Para realizar estas pruebas se siguieron las directrices consignadas en la NTC 5525; en esta normativa se recomienda usar valores de altura de las probetas iguales al diámetro o dos veces el diámetro, dejando la elección a criterio del investigador. En este proyecto de investigación se han usado probetas de altura igual al diámetro, cuidado que no tengan nudos en su composición, ya que, como se mencionó anteriormente, estos reducen la resistencia de la probeta ante sollicitaciones de carga en dirección axial. Cabe destacar que el ensayo de compresión perpendicular no se encuentra especificado en esta norma, por lo que en este caso se optó por realizar las probetas de la misma manera descrita. De esta manera, se realizó el proceso de corte de cada una de las muestras a ensayar, las cuales se rotularon e inventariaron de la siguiente manera:

Figura 4.2. Nomenclatura usada para rotulado de probetas.

IN	001	S	C	01
a	b	c	d	e

Donde, además de lo explicado en el subtítulo anterior:

- **d:** Tipo de ensayo; C: Compresión, CP: Compresión perpendicular; COR: Corte.
- **e:** Consecutivo de probetas del mismo culmo.

4.2.3. Elaboración de probetas para flexión

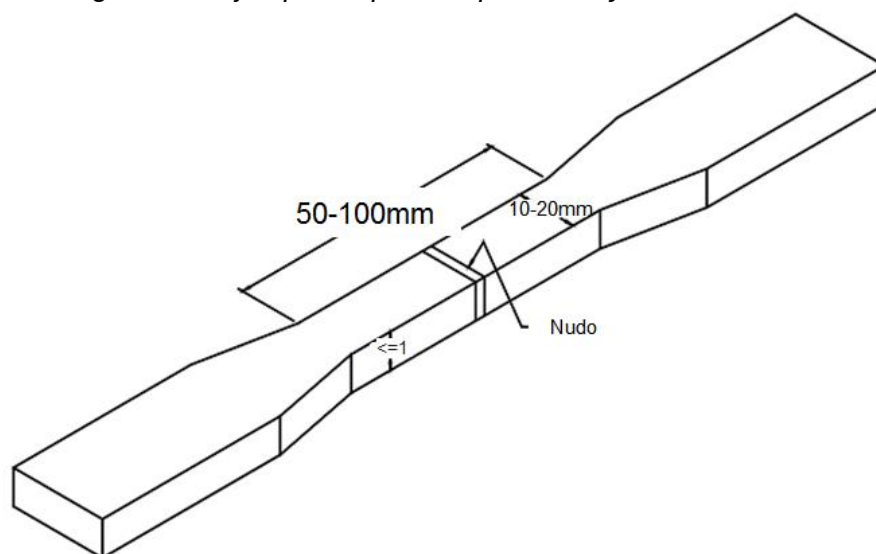
De acuerdo a lo mencionado anteriormente, en este proyecto de investigación se decidió realizar el ensayo de flexión (de cuatro puntos) para dos vanos de 1.5m y 3.0m, siendo este último el especificado en la normativa colombiana. Para los ensayos a luz corta se obtuvieron probetas de la parte superior, media e inferior, mientras que, para ensayos a luz larga las probetas fueron rotuladas simplemente para la parte superior e inferior, teniendo en cuenta que cada una tendría un porcentaje de su longitud perteneciente a la parte media del

culmo. El rotulado de estas muestras se realizó de la misma manera que para las probetas de compresión y corte.

4.2.4. Elaboración de probetas para tensión

Para el ensayo de tensión las probetas se realizaron de acuerdo a lo establecido en la NTC 5525, donde se determina que la porción de ensayo debe contener un nudo para realizar el ensayo y requiere tener una sección transversal rectangular de espesor igual al de la probeta y ancho entre 1cm y 2cm, además con una longitud de ensayo entre 5cm y 10cm (Figura 4.3). Además, se especifica que las probetas deben tener una forma que garantice que la falla se produce en la porción de ensayo y que minimice la concentración de esfuerzo en el área de transición, esto es, que la probeta tenga forma de “corbatín”. Las muestras fueron obtenidas de las partes superior, media e inferior de los culmos de guadua y fueron rotuladas de la misma manera descrita anteriormente.

Figura 4.3. Ejemplo de probeta para ensayo de tracción.



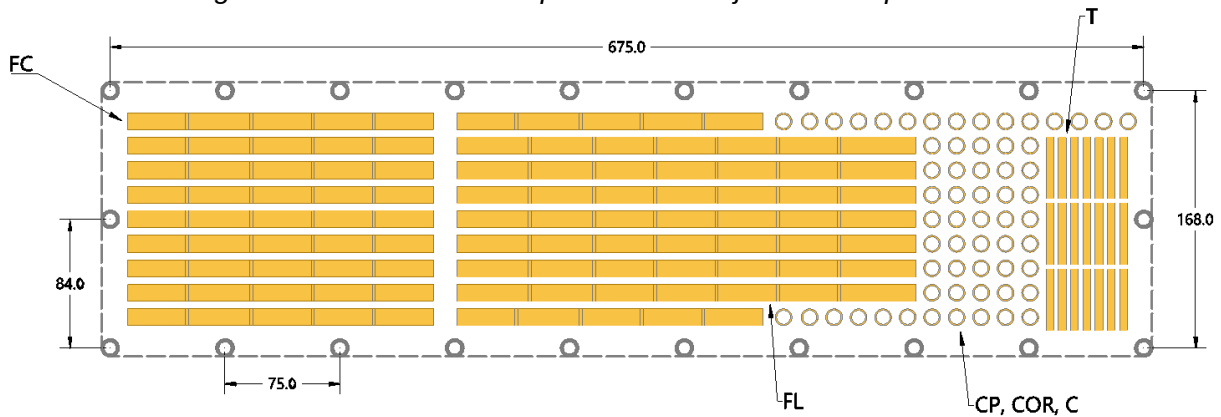
Fuente: NTC 5525, Figura 5.

4.3. Construcción de ambiente para exposición a intemperie

Para la exposición a la intemperie que se efectuó a las probetas, se construyeron dos cajones de aproximadamente 42 m² en planta, ubicados en la parte anterior del patio del edificio 350 la escuela de Ingeniería Civil y Geomática, en los cuales se organizaron las probetas de acuerdo a la distribución presentada en la figura 4.4, teniendo en cuenta que se realizaron tres niveles en altura para la

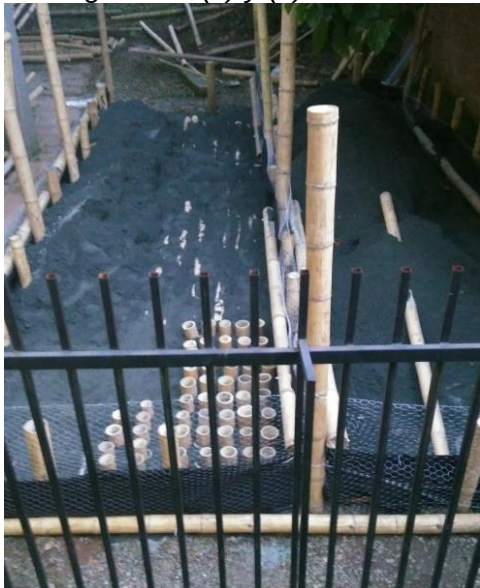
distribución de muestras, siendo cada uno de estos correspondiente a un nivel temporal en el diseño factorial ejecutado en el experimento. El cajón fue construido con culmos adquiridos para el proyecto pero que, por diferentes razones, no podían ser utilizados para la ejecución de ensayos, además de un cerramiento en malla metálica y geotextil para evitar que el suelo friccional encargado de retener la humedad se escapara del área delimitada. En la figura 4.5 se puede apreciar el registro fotográfico del proceso de construcción de las instalaciones descritas y la organización de los diferentes niveles.

Figura 4.4. Distribución de probetas en cajones de exposición.



Fuente: Propia.

Figura 4.5 (a) y (b). Construcción ambiente de exposición a la intemperie.



(a)

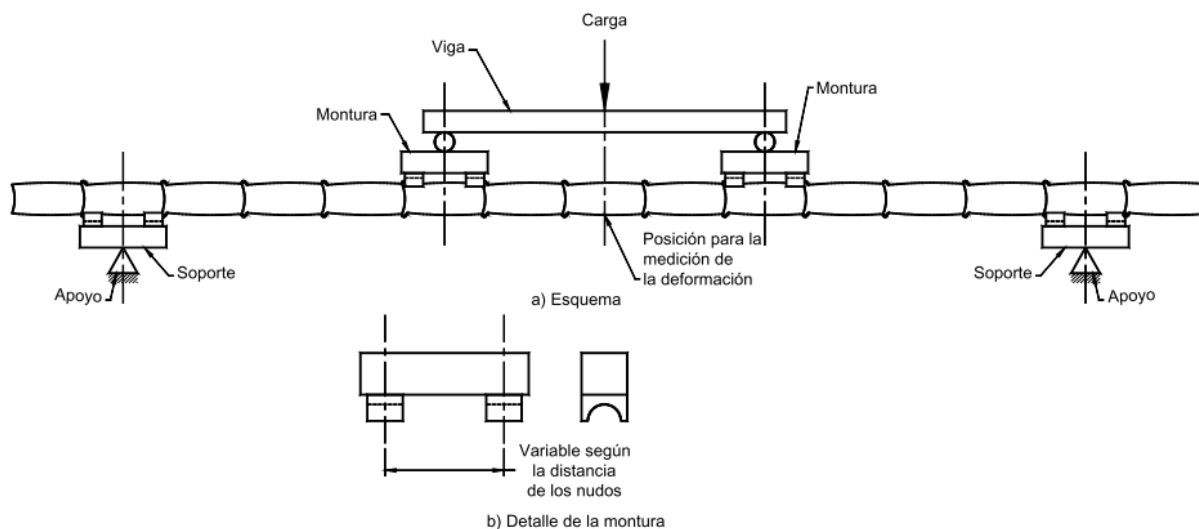


(b)

4.4. Adecuaciones para procedimientos experimentales

Como se mencionó anteriormente, los ensayos de flexión a luces de 1.5m y 3.0m (luz corta y luz larga, respectivamente) se ejecutaron siguiendo los lineamientos establecidos en la NTC 5525, efectuando una pequeña modificación: los apoyos del culmo ensayado no se ubicarían en los tercios de la longitud del mismo, sino en los nudos más cercanos a estas posiciones, debido a los resultados encontrados en recientes investigaciones (Alfredo et al., 2012) donde se encontró que localizar los apoyos de la manera convencional ocasiona, normalmente, aplastamiento del culmo, lo cual se deriva en una prueba inválida. A continuación, se muestran los diagramas consignados en la norma relacionados al montaje de carga para este ensayo.

Figura 4.6. Montaje de carga para ensayos a flexión, NTC 5525.



Fuente: NTC 5525, Figura 3.

5. Realización de ensayos

5.1. Ensayo de compresión paralelo a las fibras

Este ensayo se llevó a cabo siguiendo los lineamientos establecidos en la NTC 5525, aplicando carga de manera axial a una probeta en una máquina universal de ensayos. En la Figura 5.1 puede apreciarse el montaje típico efectuado para la ejecución de este ensayo.

Figura 5.1. Montaje típico ensayo a compresión paralela. Muestra IN-012-M-C-1.



Fuente: Propia.

Las probetas ensayadas fueron tomadas de las partes inferior, media y superior de diferentes culmos de guaduas inmunizadas y naturales, y fueron escogidas de los entrenudos de los mismos, de tal manera que no existieran nudos o cañutos en las porciones ensayadas. Así mismo, y tal como lo dispone la norma referenciada, la longitud de las probetas era similar a su diámetro externo (siempre cumpliendo que $D < L < 2D$), a pesar de que la norma dicta claramente que para propósitos investigativos esto puede escogerse de manera diferente.

Para iniciar el ensayo se aplicó una precarga no mayor a 100 kg, esto para acomodar correctamente la probeta, y se continuó con la aplicación de carga a una velocidad de deformación no mayor a 0.01 mm/s, tal como se especifica en la norma. Como puede observarse en la Figura 5.1, las probetas fueron ensayadas sobre un nivelador de carga, buscando que la distribución de la misma fuera lo más uniforme posible. Para la medición de carga de estos ensayos, fue utilizada una celda de carga con capacidad de 20 toneladas.

Figura 5.2. Falla típica ensayo a compresión paralela. Muestra IN-008-M-2.



Fuente: Propia.

Figura 5.3. Falla típica ensayo a compresión paralela a guadua natural expuesta. Muestra NA-205-S-7.



Fuente: Propia.

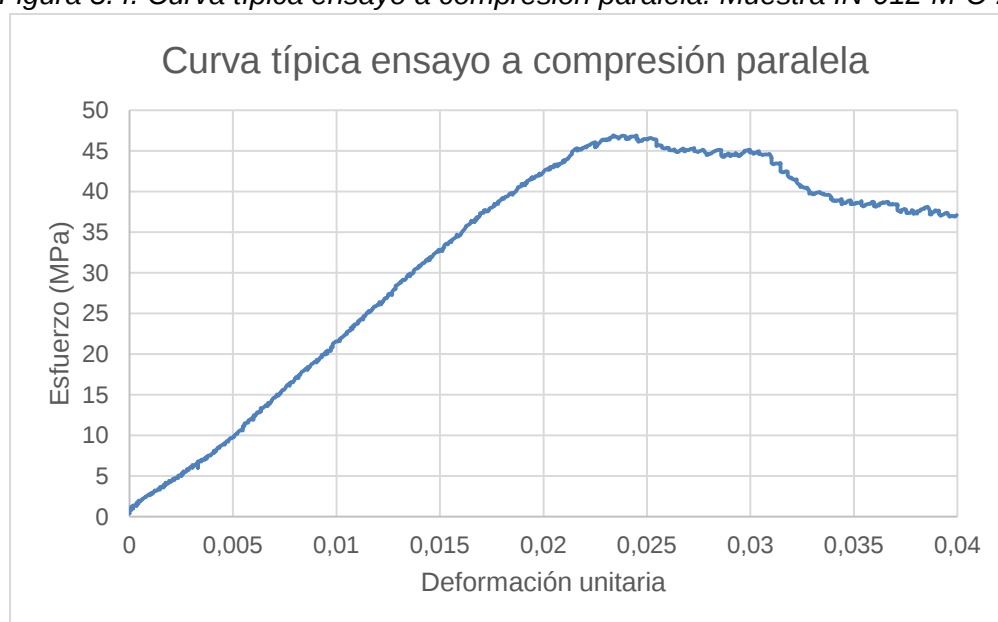
5.1.1. Observaciones durante los ensayos

Al seleccionar las probetas a ensayar que fueron expuestas durante 12 meses a la intemperie, se observó que la rigidez de estas en el sentido radial era mínima, esto debido a la casi nula presencia de la matriz que, en su condición natural, le aportaba resistencia a la composición de fibras longitudinales. Al efectuar una inspección preliminar, se encontró que las probetas naturales

presentaban mayor pérdida de rigidez que las probetas inmunizadas, por lo que podría esperarse una gran diferencia en la reducción de resistencia obtenida. Sin embargo, y como podrá apreciarse más adelante, los resultados no fueron los esperados.

Adicional a esto, la curva de esfuerzo-deformación típica de este ensayo es la que se observa en la siguiente figura donde, como es de esperarse, la falla no es abrupta y otorga cierto espacio de desarrollo posterior a la fractura.

Figura 5.4. Curva típica ensayo a compresión paralela. Muestra IN-012-M-C-2.



Fuente: Propia.

5.2. Ensayo de compresión perpendicular a las fibras

Este ensayo no se encuentra normalizado en la NTC, por lo que se siguieron recomendaciones del informe No. 36 la INBAR, donde se consignan diferentes procedimientos para realizar diferentes tipos de ensayos de manera manual, entre ellos, el ensayo de compresión perpendicular a las fibras. Como se explicó anteriormente, la geometría de las probetas consta de alturas iguales o mayores al diámetro y muestras seleccionadas sin nudos en su composición. Fueron obtenidas diferentes medidas geométricas para cada una de las probetas, como lo son su altura (dos diferentes medidas), y sus diámetros externo e interno (dos medidas diferentes de cada uno).

Las probetas fueron dispuestas de la forma en que se aprecia en la siguiente figura. Como primer paso, se aplicó una precarga para fijar la probeta, y se dio inicio al ensayo a una deformación constante de tal manera que el mismo tuviera una duración mayor a 90 segundos. Finalmente, y cuando la probeta hubiera alcanzado el límite de falla, se suspende el ensayo y se procede a extraer datos adicionales de la muestra como la humedad y la densidad, según se determinara necesario. Usando las diferentes medidas obtenidas y la lectura de carga final, se calcula el esfuerzo último de rotura con la ecuación 3.12.

$$f_{rNS} = M_{NS} \cdot \frac{12 \left(\frac{t}{2} + h \right)}{L t^3} \quad (3.12)$$

Figura 5.5. Montaje típico ensayo a compresión perpendicular.



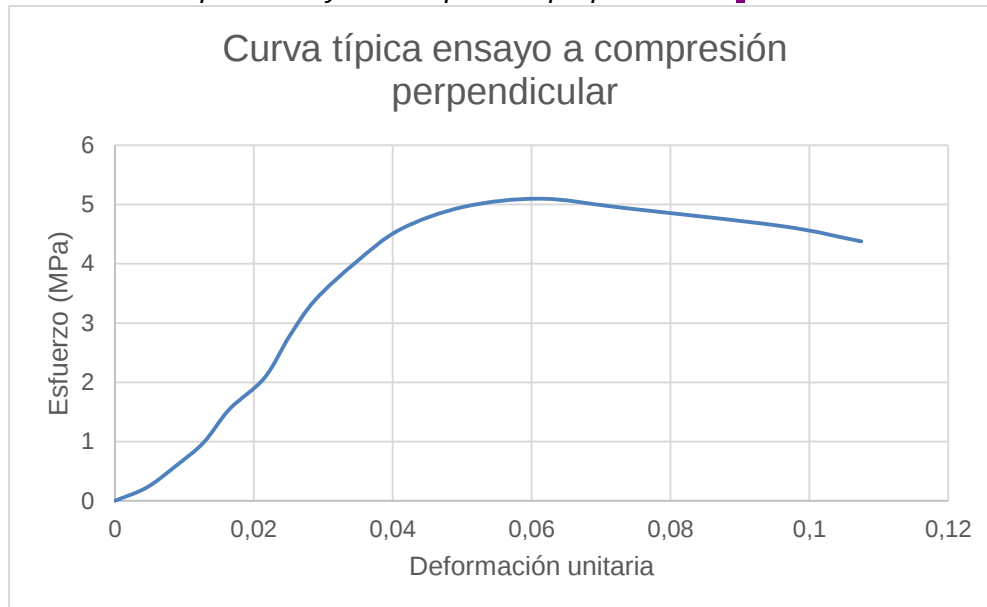
5.2.1. Observaciones durante los ensayos

La rigidez radial de las probetas que estuvieron expuestas en contacto con suelo era mínima debido a la ausencia de la matriz, por lo que, debido a la dirección de aplicación de carga en este ensayo, se esperaba que la reducción en la resistencia a la compresión paralela fuera mucho más alta que para los otros ensayos, especialmente para las probetas que no contaban con proceso de inmunización y secado.

Como observación adicional, se pudo observar que algunas probetas presentaban una pequeña fractura que, contrario a ser el límite de falla, le otorgaban a la muestra un recorrido mayor en la curva de esfuerzo-deformación,

tal como puede observarse en la siguiente figura. La falla típica de las muestras en este ensayo es abrupta para las probetas con contenido de humedad bajo, mientras que para probetas casi saturadas o muy húmedas la falla es casi imperceptible en un pequeño espacio de tiempo.

Figura 5.6. Curva típica ensayo a compresión perpendicular. Muestra IN-006-S-CP-1.



Fuente: Propia.

5.3. Ensayo de corte paralelo a las fibras

Al igual que en ensayos anteriores, las probetas ensayadas tenían altura igual o mayor a su diámetro, siendo esto un lineamiento establecido en la NTC 5525. Las probetas fueron ensayadas en una máquina universal de ensayos al igual que las probetas de compresión paralela y perpendicular a las fibras, con la diferencia de que se usaron placas con forma de corbatín que son las sugeridas por la norma para este tipo de ensayos (ver Figuras 5.7 y 5.8).

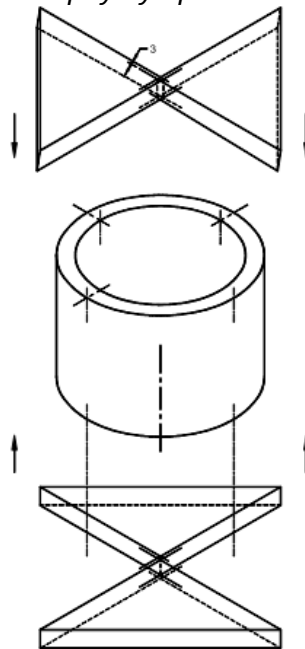
Es necesario mencionar que, según la NTC 5525, el 50% de las probetas ensayadas deben contener un nudo en su composición, mientras que el 50% restante no pueden tenerlo, sin embargo, se da libertad para consideraciones diferentes en casos investigativos. Para este proyecto, se decidió ensayar únicamente probetas sin nudo, buscando tener una muestra más homogénea y así realizar una comparación más fidedigna y evitar añadir un nivel más al diseño factorial del experimento. Al igual que en ensayos anteriores, fueron obtenidas la altura y los diámetros externo e interno (dos medidas diferentes para cada uno) para cada una de las muestras ensayadas, esto con el fin de obtener su espesor.

Figura 5.7. Montaje típico ensayo a corte. Muestra IN-010-S-CP-1.



Fuente: Propia.

Figura 5.8. Apoyo y aplicación de carga.



Fuente: NTC 5525.

Inicialmente se aplica una precarga no mayor a 100 kg para fijar la probeta, según lo establecido por la norma, para así dar inicio al ensayo a una velocidad de

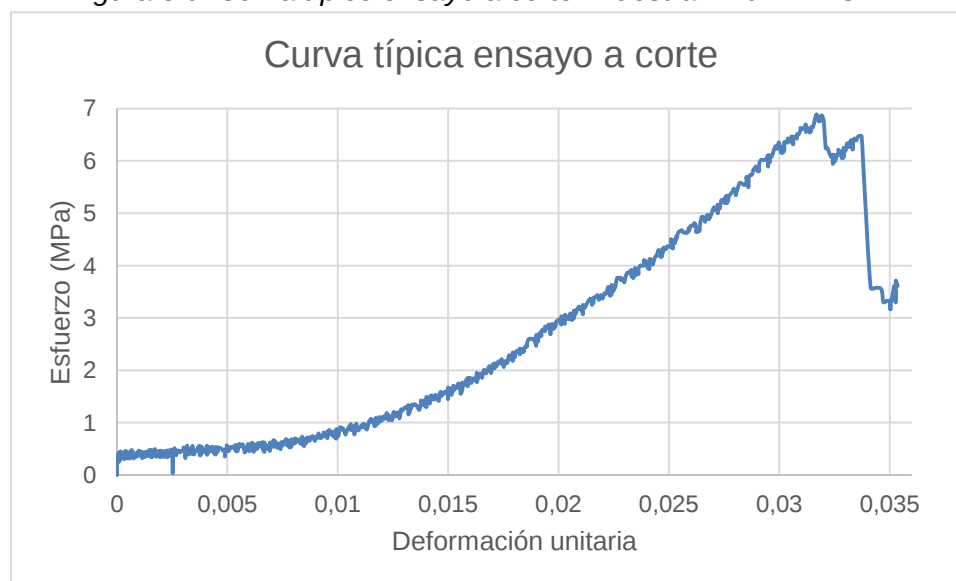
deformación constante de 0.01 mm/s hasta que se presente la falla, momento en el cual se suspende el ensayo y se toma lectura de la carga última. El esfuerzo último se obtuvo mediante el uso de la ecuación 3.3.

$$\tau = \frac{F_{ult}}{4lt} \quad (3.3)$$

5.3.1. Observaciones durante los ensayos

Este ensayo presenta la particularidad de tener una falla abrupta y sonora, la cual puede apreciarse en la curva de esfuerzo-deformación como una disrupción en el trazado continuo de la misma. Esta característica no se aprecia de forma tan clara en los ensayos a las probetas expuestas donde la falla es más dúctil, probablemente debido a su alto contenido de humedad. La falla que se presenta en este ensayo debe darse en los cuatro planos de cortante, ya que, de lo contrario, el ensayo no será válido.

Figura 5.9. Curva típico ensayo a corte. Muestra IN-012-M-CP-1.



Fuente: Propia.

5.4. Ensayo de flexión a luz corta (1.50m) y a luz larga (3.00m)

Estos ensayos fueron ejecutados de acuerdo a los lineamientos establecidos en la NTC 5525. Las probetas fueron obtenidas de la parte superior, media e inferior (para las muestras de flexión a luz corta) y de la parte superior e

inferior (para las probetas de flexión a luz larga). Fueron tomados diferentes datos y mediciones como lo son los diámetros externos e internos en cada uno de los extremos (dos medidas para cada uno), la longitud y la cantidad de nudos.

De acuerdo a lo consignado en la norma, la carga debe aplicarse en los tercios de la luz a ensayar, por lo que serían tramos de 50 cm para la flexión a luz corta y de 100 cm para flexión a luz larga. Esto es variable, ya que se decidió que la aplicación de la carga fuera aplicada en los nudos más cercanos a los tercios, con el fin de reducir al máximo las fallas por aplastamiento en los entrenudos de las probetas. Todo esto derivó en la necesidad de implementar un dispositivo de carga graduable que permitiera realizar los dos tipos de ensayo como han sido descritos de una manera eficiente, llegando a la implementación que se aprecia en la figura 5.10, con dos vigas funcionando como rieles para cuatro soportes (dos superiores y dos inferiores) móviles.

Figura 5.10. Montaje de ensayo a flexión (luz corta y luz larga). Muestra IN-018-M-FC.



Fuente: Propia.

Al igual que en ensayos de otras solicitaciones de carga, se aplica una precarga inicial para fijar la probeta y se da inicio al experimento a una velocidad constante de 0.5 mm/s (según lo indicado por la norma). Finalmente se determina

el tipo de falla, se toma registro fotográfico de la misma, y se toma la lectura de la carga final para obtener el esfuerzo último, el cual fue hallado con la ecuación 3.9.

5.4.1. Observaciones durante los ensayos

5.5. Ensayo de tracción paralela a las fibras

Como se mencionó previamente, la preparación de las probetas se llevó a cabo de acuerdo con lo descrito en el subcapítulo 4.2.4, tallando las muestras en forma de hueso o corbatín, garantizando así la zona de falla para tener medidas más aproximadas al lugar de fractura de la probeta. Es necesario mencionar que la muestra debe contener un nudo en la zona de falla, ya que esta sección es la más frágil y lógicamente la fractura se presenta en este lugar.

El procedimiento experimental fue ejecutado en una máquina universal de ensayos, y para sujetar la probeta fueron usadas mordazas para ensayos a tracción, frecuentemente usadas para fallar tejidos y cables, entre otros. La probeta fue dispuesta de la manera que se observa en la figura, sujetando sus dos extremos con las mordazas de manera que el agarre fuera suficiente durante el ensayo, pero que no alterara su geometría antes del mismo, y que por supuesto no la dañara.

De esta manera se inicia el ensayo a velocidad constante, de tal manera que su duración exceda los 90 segundos hasta que se presente la falla, momento en el que se interrumpe la aplicación de carga y se procede a tomar lectura de carga última, y finalmente se obtiene el esfuerzo con la ecuación 3.5.

Figura 5.11. Montaje ensayo a tracción. Muestra IN-016-I-T-6.



Fuente: Propia.

5.5.1. Observaciones durante los ensayos

Estos ensayos fueron difíciles de llevar a cabo debido a su naturaleza misma; sujetar una probeta de naturaleza arqueada con prensas puede llevar a que la misma se fracture antes de iniciar el ensayo, y al mismo tiempo este cuidado puede ocasionar una sujeción insuficiente del elemento, lo que deriva en un ensayo inválido. Lo que se realizó en este trabajo de investigación para evitar este inconveniente fue tallar las probetas de un tamaño menor a 2 centímetros, con lo que se asegura que la curvatura de las mismas sea la menor posible.

6. Resultados y análisis de datos

6.1. Determinación de valores atípicos o *outliers*

El primer paso que se realizó en el análisis de datos efectuado en este proyecto investigativo fue el de determinar datos atípicos en las muestras de datos, también conocidos como *outliers*. Esto se ejecutó por medio del software *IMB SPSS Statistics*, en donde se obtuvo el valor Z para cada uno de los valores con respecto al grupo muestral al que pertenecía y se comparaba con los valores de referencia, siendo estos: $Z=1.96$ para un porcentaje de confianza del 95% y $Z=2.575$ para un porcentaje de confianza del 99%, teniendo en cuenta que Z es la cantidad de distancias intercuartiles a las que se encuentra el dato del último cuartil, también conocido como bigote superior o inferior. Basado en lo recientemente descrito, un valor que presentara un $Z=2.575$ se consideraba un outlier extremo, por lo que debía ser removido del grupo final de datos a analizar, mientras que un dato con un Z entre 1.96 y 2.575 debía ser estudiado para determinar si afectaba en mayor o menor medida los resultados finales y generaba un comportamiento erróneo en la estadística de la mayoría de la población. Por supuesto, un valor con Z menor a 1.96 era un dato que se conservaba en el grupo muestral de estudio.

6.2. Introducción a la obtención de esfuerzos admisibles

Una vez realizado el análisis estadístico de datos para la totalidad de los ensayos para cada sollicitación mecánica y cada parte de la guadua, así como cada uno de los dos tipos de material (natural e inmunizada) y los tiempos de exposición (0 y 12 meses), se procedió a determinar los valores admisibles de esfuerzo según lo establece la NSR-10 en su título G.

Los valores de referencia para esfuerzos de flexión, tracción, compresión paralela y perpendicular, así como corte paralelo, se encuentran en la tabla G.12.7-1 y ya fueron referenciados en la Figura 3.6.

Siguiendo el procedimiento descrito en la norma, los valores de esfuerzos admisibles fueron determinados a partir del valor característico, el cual se obtiene con la siguiente ecuación:

$$f_{ki} = f_{0.05i} \left(1 - \frac{2.7s}{m\sqrt{n}} \right) \quad (6.1)$$

Donde:

f_{ki} = valor característico en la sollicitación **i**

$f_{0.05i}$ = valor correspondiente al percentil 5 de los datos de las pruebas de laboratorio en la sollicitación **i**

m = valor promedio de los datos de las pruebas de laboratorio

s = desviación estándar de los datos de las pruebas de laboratorio

n = número de ensayos

i = subíndice que depende del tipo de sollicitación (**FL** para flexión a luz larga, **FC** para flexión a luz corta, **T** para tracción paralela a las fibras, **C** para compresión paralela a las fibras, **CP** para compresión perpendicular a las fibras y **COR** para cortante paralelo a las fibras).

Una vez determinado el valor característico para cada sollicitación de carga, se procede con el cálculo de los esfuerzos admisibles con la siguiente fórmula:

$$F_i = FC \times f_{ki} / F_s \times FDC \quad (6.2)$$

Donde:

F_i = esfuerzo admisible en la sollicitación **i**

f_{ki} = valor característico del esfuerzo en la sollicitación **i**

FC = Factor de reducción por diferencias entre las condiciones de los ensayos en el laboratorio y las condiciones reales de aplicación de las cargas en la estructura

F_s = Factor de seguridad

FDC= Factor de duración de carga. Para esta investigación este factor no será tenido en cuenta, ya que es considerado más para aspectos de diseño.

i= subíndice que depende del tipo de sollicitación (**FL** para flexión a luz larga, **FC** para flexión a luz corta, **T** para tracción paralela a las fibras, **C** para compresión paralela a las fibras, **CP** para compresión perpendicular a las fibras y **COR** para cortante paralelo a las fibras).

A continuación, se presenta una tabla con los diferentes valores para los factores de reducción FC y Fs:

Tabla 6.1. Factores de reducción.

Factor	Flexión	Tracción	Compresión 	Compresión ⊥	Corte
FC	-	0.5	-	-	0.6
Fs	2.0	2.0	1.5	1.8	1.8

Fuente: Tabla G.12.7-3 NSR-10, Factores de Reducción.

Para la presente investigación no se tendrán en cuenta los factores de reducción por humedad ni por temperatura establecidos en la NSR-10.

6.3. Compresión paralela a las fibras

A continuación, se presenta una tabla donde se puede apreciar el total de probetas ensayadas para esta sollicitación de carga a diferentes tiempos y para diferentes tipos de guadua, así como la clasificación por partes del culmo.

Tabla 6.2. Sumario de probetas ensayadas a compresión paralela.

Parte del culmo	No expuestas	Expuestas durante 12 meses		Subtotal
	Inmunizada	Inmunizada	Natural	
Superior	17	12	15	44
Media	18	19	20	57
Inferior	15	15	15	45
TOTAL				146

Fuente: Propia.

6.3.1. Resultados a probetas sin alterar

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos de estas probetas, mencionando que se muestran los valores para esfuerzos últimos, y que el grupo de muestras no ha pasado por ningún filtro estadístico.

Tabla 6.3. Probetas inmunizadas ensayadas a tiempo cero a compresión paralela.

Superior		Media		Inferior	
Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)
IN-013-S-C-1	49,68	IN-012-M-C-1	46,67	IN-012-I-C-1	41,20
IN-013-S-C-2	35,66	IN-012-M-C-4	47,14	IN-005-I-C-3	48,74
IN-013-S-C-3	43,03	IN-012-M-C-3	32,64	IN-016-I-C-1	41,18
IN-013-S-C-5	39,53	IN-012-M-C-2	47,64	IN-016-I-C-4	46,46
IN-015-S-C-5	47,11	IN-015-M-C-3	44,53	IN-005-I-C-2	47,15
IN-010-S-C-2	29,86	IN-016-M-C-4	42,06	IN-012-I-C-4	40,40
IN-012-S-C-3	48,30	IN-010-M-C-3	30,85	IN-013-I-C-1	44,64
IN-013-S-C-6	28,42	IN-009-M-C-4	54,86	IN-002-I-C-4	43,90
IN-013-S-C-7	47,25	IN-009-M-C-3	42,24	IN-013-I-C-2	44,32
IN-010-S-C-5	35,85	IN-010-M-C-4	32,55	IN-014-I-C-2	58,76
IN-013-S-C-8	47,32	IN-009-M-C-5	49,61	IN-014-I-C-3	49,15
IN-010-S-C-3	32,13	IN-016-M-C-2	42,10	IN-008-I-C-4	40,22
IN-013-S-C-4	44,05	IN-009-M-C-2	51,61	IN-014-I-C-5	53,49
IN-010-S-C-4	29,61	IN-014-M-C-4	58,54	IN-013-I-C-4	39,28
IN-016-S-C-1	50,56	IN-016-M-C-1	47,76	IN-002-I-C-3	40,69
IN-013-S-C-9	40,32	IN-015-M-C-2	45,21		
IN-010-S-C-1	33,35	IN-009-M-C-1	51,39		
		IN-014-M-C-1	55,05		

Fuente: Propia.

6.3.2. Resultados a probetas expuestas

Después de estar expuestas 12 meses a la intemperie y estar en contacto directo con un suelo friccionante bajo constantes cambios de humedad, fueron ensayadas 12 probetas inmunizadas de la parte superior, 19 de la parte media y 15 de la parte inferior, así como 15 probetas en estado natural de la parte superior, 20 de la parte media y 15 de la parte inferior, para un total de 96 probetas. En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos de estas probetas, mencionando que se muestran los valores para esfuerzos últimos, y que, al igual que en el punto anterior, el grupo de muestras no ha pasado por ningún filtro estadístico.

Tabla 6.4. Probetas inmunizadas ensayadas a 12 meses a compresión paralela.

Superior		Media		Inferior	
Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)
IN-112-S-4	22,18	IN-013-M-5	18,58	IN-013-I-C-1	32,83
IN-007-S-5	17,40	IN-010-M-1	12,62	IN-011-I-4	5,88
IN-007-S-2	18,04	IN-008-M-C-3	22,21	IN-011-I-41	1,78
IN-008-S-2	21,51	IN-010-M-C-2	27,67	IN-011-I-3	4,35
IN-011-S-3	11,70	IN-011-M-C-3	26,81	IN-011-I-2	3,24
IN-009-S-5	23,62	IN-008-M-2	13,01	IN-007-I-1	21,52
IN-009-S-1	22,88	IN-013-M-4	8,16	IN-011-I-1	17,56
IN-015-S-10	23,45	IN-007-M-2	22,92	IN-006-I-4	23,12
IN-011-S-4	24,80	IN-013-M-2	12,97	IN-012-I-4	17,16
IN-009-S-1	22,92	IN-008-M-5	22,80	IN-012-I-3	17,26
IN-009-S-3	25,85	IN-008-M-1	10,31	IN-005-I-1	15,18
IN-015-S-2	28,44	IN-011-M-2	14,79	IN-011-I-21	14,35
		IN-016-M-5	38,31	IN-136-I-9	16,46
		IN-015-M-2	10,92	IN-136-I-10	17,09
		IN-015-M-5	23,04	IN-136-I-3	19,14
		IN-007-M-5	1,74		
		IN-013-M-3	1,68		
		IN-015-M-4	7,05		
		IN-015-M-1	30,13		

Fuente: Propia.

Tabla 6.5. Probetas naturales ensayadas a 12 meses a compresión paralela.

Superior		Media		Inferior	
Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)
NA-201-S-6	20,88	NA-201-M-2	17,02	NA-203-I-4	7,86
NA-201-S-14	7,34	NA-201-M-4	11,51	NA-203-I-3	9,13
NA-203-S-3	9,32	NA-205-M-1	18,15	NA-201-I-3	16,97
NA-205-S-1	22,76	NA-205-M-3	21,23	NA-192-I-11	18,19
NA-205-S-5	20,09	NA-205-M-11	20,71	NA-192-I-13	16,72
NA-205-S-6	19,22	NA-205-M-31	21,80	NA-205-I-7	25,36
NA-205-S-7	20,33	NA-201-M-1	17,33	NA-205-I-2	29,86
NA-205-S-9	11,61	NA-201-M-5	21,79	NA-205-I-8	30,10
NA-211-S-3	9,58	NA-203-M-2	4,34	NA-211-I-1	13,96
NA-211-S-7	8,42	NA-203-M-3	6,57	NA-192-I-7	17,07
NA-211-S-10	9,41	NA-203-M-4	8,82	NA-211-I-5	14,05
NA-211-S-16	9,39	NA-203-M-5	7,82	NA-192-I-9	17,16
NA-211-S-17	16,33	NA-205-M-2	8,01	NA-201-I-11	16,42
NA-196-S-9	8,70	NA-205-M-5	19,85	NA-192-I-12	11,42

NA-196-S-1	22,42	NA-205-M-21	26,33	NA-205-I-4	25,37
		NA-211-M-3	11,73		
		NA-196-M-3	10,38		
		NA-196-M-4	26,10		
		NA-002-M-1-C	11,89		
		NA-201-M-9	15,71		

Fuente: Propia.

6.3.3. Análisis de datos

Después de efectuar el análisis preliminar para determinar la presencia de datos atípicos descrito anteriormente, se llegó a los siguientes resultados:

Tabla 6.6. Datos atípicos para ensayos a compresión paralela.

Parte del culmo	IN (no expuestas)	IN (expuestas)	NA (expuesta)
Superior	0	1	0
Medio	0	1	0
Inferior	1	1	0

Fuente: Propia.

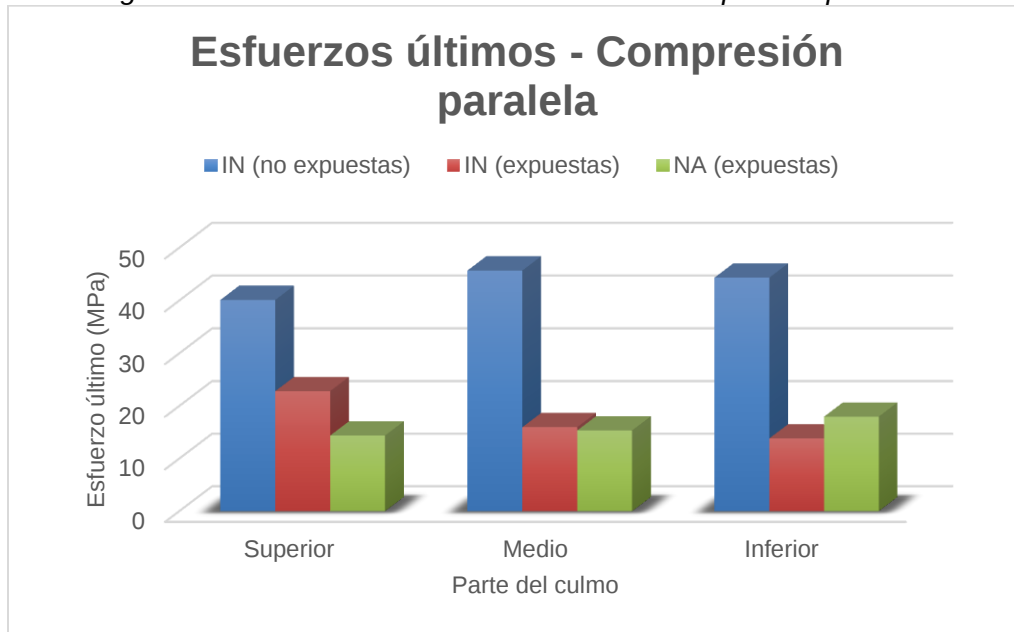
Después de eliminar los datos atípicos, se obtiene el grupo muestral final con el que se efectuará el análisis estadístico que se presenta a continuación. La primera observación que podemos hacer es la diferencia entre los esfuerzos últimos promedio obtenidos para las guaduas expuestas y las no expuestas, pudiendo representar esta diferencia como un porcentaje de reducción, tal como puede apreciarse en la siguiente tabla:

Tabla 6.7. Reducción en la resistencia a la compresión paralela después de 12 meses de exposición.

Parte del culmo	IN (no expuestas)	IN (expuestas)		NA (expuesta)	
	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Reducción	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Reducción
Superior	40,12	22,83	43,09%	14,39	64,14%
Medio	45,69	15,97	65,05%	15,36	66,39%
Inferior	44,35	13,86	68,75%	17,98	59,46%

Fuente: Propia.

Figura 6.1. Reducción en la resistencia a la compresión paralela.



Fuente: Propia.

Contrario a lo que se esperaba en el inicio de la investigación, solo los ensayos de la parte superior de la guadua presentaron una importante reducción en la resistencia a compresión paralela a las fibras en comparación al comportamiento observado en las probetas inmunizadas, mientras que los resultados para la parte media son prácticamente iguales y, sorprendentemente, en la parte inferior las probetas sin tratamiento ofrecieron un esfuerzo último promedio considerablemente mayor al obtenido de las probetas inmunizadas. Además, es necesario mencionar que, tanto para las probetas inmunizadas como para las naturales, la reducción en apenas 12 meses de exposición a la intemperie fue en promedio del 61%, lo cual nos da los primeros indicios de la vulnerabilidad del material frente a los agentes naturales.

Finalmente, y de acuerdo a lo descrito en el subcapítulo 6.1, se determinaron los esfuerzos admisibles a compresión paralela tanto para las guaduas en estado natural como para las expuestas a la intemperie, con los desfavorables resultados que se pueden apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 6.8. Esfuerzos admisibles para compresión paralela.

Esfuerzo admisible compresión paralela - Inmunizadas no expuestas					
Parte culmo	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Desv. Est. (Mpa)	$\sigma_{\text{últ}}$ 5% (MPa)	Valor caract.	σ_{adm} (MPa)
Superior	40,12	7,68	29,37	25,69	14,27
Media	45,69	7,8	32,29	28,79	15,99
Inferior	44,35	4,21	39,28	36,59	20,33
Esfuerzo admisible compresión paralela - Inmunizadas expuestas					
Parte culmo	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Desv. Est. (Mpa)	$\sigma_{\text{últ}}$ 5% (MPa)	Valor caract.	σ_{adm} (MPa)
Superior	22,83	3,16	17,4	15,44	8,58
Media	15,97	8,67	1,68	1,1	0,61
Inferior	13,86	7,02	1,72	1,09	0,61
Esfuerzo admisible compresión paralela - Naturales expuestas					
Parte culmo	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Desv. Est. (Mpa)	$\sigma_{\text{últ}}$ 5% (MPa)	Valor caract.	σ_{adm} (MPa)
Superior	14,39	5,95	8,1	5,76	3,2
Media	15,35	6,62	6,46	4,78	2,65
Inferior	17,98	6,86	8,75	6,42	3,57

Fuente: Propia.

A excepción de las probetas ensayadas en estado natural (sin exposición a la intemperie), los esfuerzos admisibles obtenidos son irrisorios y prácticamente inutilizables en cualquier diseño que los requiera. Esto no se debe exclusivamente a la reducción de los esfuerzos últimos obtenidos, porque, de ser así, la reducción en los esfuerzos admisibles estaría alrededor del 60%, pero es la metodología de obtención de los mismos la que ocasiona que los valores de diseño se vean disminuidos de una manera tan traumática. Revisando los datos de la tabla 6.8, podemos apreciar que esta disminución se presenta desde los valores característicos, por lo que, estudiando la ecuación 6.3, nos damos cuenta que hay un factor negativo compuesto por valores directamente proporcionales como la desviación estándar (muy alta para probetas expuestas) e indirectamente proporcionales como el promedio y el número de muestras (que son considerablemente bajos para estos ensayos), lo cual se ve repercutido en una reducción crítica para grupos muestrales con mayor desviación.

$$f_{ki} = f_{0.05i} \left(1 - 2.7s / m\sqrt{n} \right) \quad (6.3)$$

6.4. Compresión perpendicular a las fibras

En la siguiente tabla se presentan los números correspondientes a la cantidad de probetas ensayadas bajo esta sollicitación de carga, tanto para las probetas en condición natural, como las que sufrieron exposición a la intemperie.

Tabla 6.9. Sumario de probetas ensayadas a compresión perpendicular.

Parte del culmo	No expuestas	Expuestas a la intemperie		Subtotal
	Inmunizada	Inmunizada	Natural	
Superior	12	8	8	28
Media	12	8	7	27
Inferior	13	7	7	27
TOTAL				82

Fuente: Propia

6.4.1. Resultados a probetas sin alterar

Bajo esta sollicitación de cargas fueron ensayadas 12 probetas inmunizadas de la parte superior, 12 probetas de la parte media y 13 de la parte inferior, para un total de 37 probetas ensayadas a compresión perpendicular. A continuación, los resultados obtenidos para esfuerzos últimos.

Tabla 6.10. Probetas inmunizadas ensayadas a tiempo cero a compresión perpendicular.

Superior		Media		Inferior	
Probeta	σ_{ult} (MPa)	Probeta	σ_{ult} (MPa)	Probeta	σ_{ult} (MPa)
IN-016-S-CP-5	7,35	IN-004-M-CP-2	4,49	IN-004-I-CP-1	6,26
IN-007-S-CP-4	9,07	IN-004-M-CP-3	5,81	IN-014-I-CP-2	5,74
IN-016-S-CP-4	6,61	IN-005-M-CP-2	6,33	IN-007-I-CP-2	6,92
IN-007-S-CP-1	7,32	IN-002-M-CP-3	4,84	IN-002-I-CP-1	6,03
IN-006-S-CP-2	5,79	IN-002-M-CP-2	3,54	IN-005-I-CP-2	7,19
IN-016-S-CP-1	5,66	IN-004-M-CP-4	7,02	IN-004-I-CP-2	4,37
IN-006-S-CP-1	5,08	IN-002-M-CP-1	4,23	IN-002-I-CP-3	3,12
IN-008-S-CP-5	7,88	IN-004-M-CP-1	3,93	IN-004-I-CP-3	4,94
IN-011-S-CP-4	7,89	IN-004-M-CP-5	5,21	IN-002-I-CP-2	3,56
IN-012-S-CP-2	9,09	IN-005-M-CP-1	5,85	IN-004-I-CP-4	5,34
IN-012-S-CP-1	4,95	IN-005-M-CP-4	8,91	IN-005-I-CP-3	7,87
IN-008-S-CP-1	10,10	IN-013-M-CP-1	4,60	IN-005-I-CP-4	5,69
				IN-002-I-CP-4	2,84

Fuente: Propia.

6.4.2. Resultados a probetas expuestas

Por otro lado, para realizar el análisis de la disminución de la resistencia a la compresión perpendicular de la guadua, fueron ensayadas probetas inmunizadas expuestas a la intemperie durante 12 meses de acuerdo a la siguiente distribución: 8 de la parte superior, 8 de la parte media y 7 de la parte inferior, mientras que las cantidades de guaduas naturales expuestas a la intemperie fueron 8 de la parte superior, 7 de la parte media y 7 de la parte inferior. En las siguientes tablas se presenta un resumen de los esfuerzos últimos obtenidos:

Tabla 6.11. Probetas inmunizadas ensayadas a 12 meses a compresión perpendicular.

Superior		Media		Inferior	
Probeta	$\sigma_{últ}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{últ}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{últ}$ (MPa)
IN-012-S-4	2,04	IN-005-M-3	1,94	IN-013-I-C-3	1,59
IN-015-S-5	5,10	IN-011-M-C-3	1,88	IN-013-I-C-5	2,02
IN-016-S-2	3,96	IN-008-M-C-2	3,29	IN-014-I-C-1	1,54
IN-005-S-4	1,88	IN-011-M-C-2	1,21	IN-014-I-C-4	3,99
IN-011-S-5	4,29	IN-015-M-C-1	1,04	IN-005-I-C-2	2,33
IN-008-S-3	5,82	IN-007-M-C-2	5,49	IN-008-I-C-5	4,91
IN-016-S-3	3,08	IN-010-M-C-2	5,03	IN-002-I-C-2	1,58
IN-013-S-4	2,87	IN-013-M-C-5	3,44		

Fuente: Propia.

Tabla 6.12. Probetas naturales ensayadas a 12 meses a compresión perpendicular.

Superior		Media		Inferior	
Probeta	$\sigma_{últ}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{últ}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{últ}$ (MPa)
NA-204-S-12	0,90	NA-205-M-7	3,58	NA-211-I-3	1,84
NA-192-S-13	6,40	NA-196-M-2	3,73	NA-192-I-2	0,69
NA-211-S-9	1,17	NA-189-M-4	3,54	NA-211-I-2	2,91
NA-209-S-5	1,26	NA-185-M3	2,38	NA-205-I-11	0,77
NA-204-S-10	1,16	NA-185-M-1	1,90	NA-182-I-5	0,21
NA-192-S-10	0,93	NA-185-M-2	1,97	NA-192-I-6	8,31
NA-213-S-10	0,97	NA-205-M-4	4,26	NA-211-I-4	0,24
NA-192-S-7	2,32				

Fuente: Propia.

6.4.3. Análisis de datos

Como se mencionó anteriormente, se realizó un procesamiento estadístico para identificar datos atípicos en el grupo muestral, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 6.13. Datos atípicos para ensayos a compresión perpendicular.

Parte del culmo	IN (no expuestas)	IN (expuestas)	NA (expuesta)
Superior	0	0	1
Medio	1	0	0
Inferior	0	0	0

Fuente: Propia.

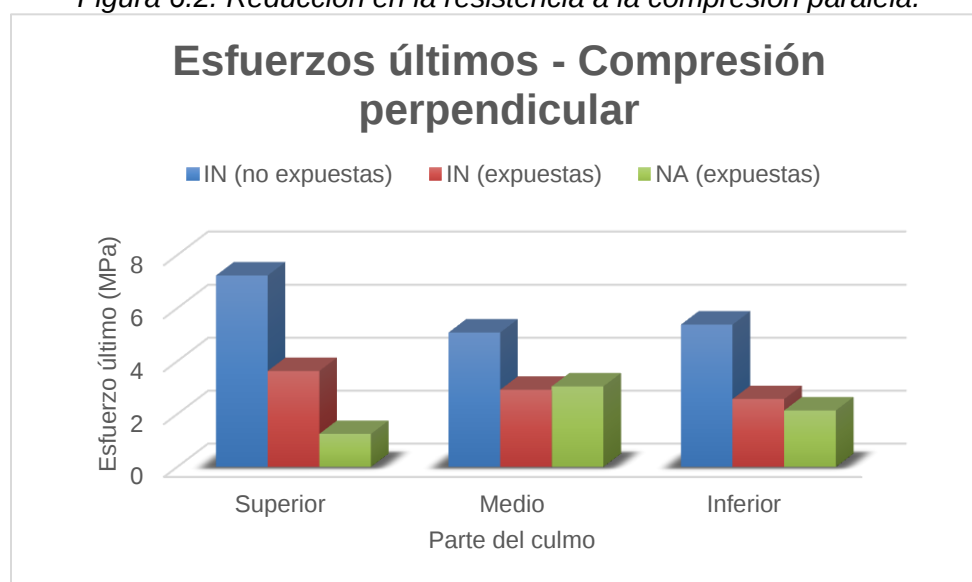
Luego de excluir los datos atípicos del grupo muestral final, se procede a realizar el análisis estadístico, del cual se pueden apreciar los primeros resultados representados en la reducción obtenida a la resistencia a la compresión perpendicular entre las probetas ensayadas.

Tabla 6.14. Reducción en la resistencia a la compresión perpendicular después de 12 meses de exposición.

Parte del culmo	IN (no expuestas)	IN (expuestas)		NA (expuesta)	
	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Reducción	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Reducción
Superior	7,230	3,630	49,79%	1,250	82,71%
Medio	5,080	2,920	42,52%	3,050	39,96%
Inferior	5,380	2,570	52,23%	2,140	60,22%

Fuente: Propia.

Figura 6.2. Reducción en la resistencia a la compresión paralela.



Fuente: Propia.

Con el grupo muestral final, se realiza el análisis de datos para la obtención de los esfuerzos admisibles, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 6.15. Esfuerzos admisibles a compresión perpendicular.

Esfuerzo admisible compresión perpendicular - Inmunizadas no expuestas					
Parte culmo	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Desv. Est. (Mpa)	$\sigma_{\text{últ}}$ 5% (MPa)	Valor caract.	σ_{adm} (MPa)
Superior	7,23	1,67	5,02	4,12	1,91
Media	5,08	1,07	3,54	2,93	1,36
Inferior	5,38	1,57	3,01	2,35	1,09
Esfuerzo admisible compresión perpendicular - Inmunizadas no expuestas					
Parte culmo	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Desv. Est. (Mpa)	$\sigma_{\text{últ}}$ 5% (MPa)	Valor caract.	σ_{adm} (MPa)
Superior	3,63	1,41	1,10	0,69	0,32
Media	2,92	1,69	1,10	0,49	0,23
Inferior	2,57	1,34	1,10	0,51	0,24
Esfuerzo admisible compresión perpendicular - Inmunizadas no expuestas					
Parte culmo	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Desv. Est. (Mpa)	$\sigma_{\text{últ}}$ 5% (MPa)	Valor caract.	σ_{adm} (MPa)
Superior	1,25	0,19	0,90	0,77	0,35
Media	3,05	0,95	1,92	1,31	0,61
Inferior	2,14	2,89	0,22	0,00	0,00

Fuente: Propia.

Nuevamente la reducción en los esfuerzos admisibles es crítica, esto debido a que la desviación estándar obtenida es muy alta en comparación con el promedio y número de datos, que son bajos.

6.5. Corte paralelo a las fibras

Para este tipo de ensayos se probó un total de 116 muestras, distribuidas de la siguiente manera.

Tabla 6.16. Sumario de probetas ensayadas a corte.

Parte del culmo	No expuestas	Expuestas a la intemperie		Subtotal
	Inmunizada	Inmunizada	Natural	
Superior	13	15	12	40
Media	13	15	11	39
Inferior	13	12	12	37
TOTAL				116

Fuente: Propia.

6.5.1. Resultados a probetas sin alterar

Bajo esta solicitación de carga se ensayaron 13 probetas inmunizadas de la parte superior, 13 de la parte media y 13 de la parte inferior, para un total de 39 probetas inmunizadas sin alterar ensayadas a corte. En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos de estas probetas, mencionando que se muestran los valores para esfuerzos últimos, y que el grupo de muestras no ha pasado por ningún filtro estadístico.

Tabla 6.17. *Probetas inmunizadas ensayadas a tiempo cero a corte paralelo.*

Superior		Media		Inferior	
Probeta	σ_{ult} (MPa)	Probeta	σ_{ult} (MPa)	Probeta	σ_{ult} (MPa)
IN-016-S-C-5-SIN	6,24	IN-012-M-CP-4	6,17	IN-006-I-COR-1	7,15
IN-010-S-CP-1	6,47	IN-013-M-CP-3	6,19	IN-010-I-COR-2	7,07
IN-009-S-CP-5	6,73	IN-016-M-CP-1	6,21	IN-006-I-COR-C-1	6,82
IN-010-S-CP-2	7,66	IN-012-M-CP-1	5,96	IN-006-I-COR-C-2	6,53
IN-010-S-CP-5	5,94	IN-016-M-CP-3	6,99	IN-010-I-COR-C-2	7,78
IN-010-S-CP-4	7,14	IN-007-M-C-1	9,82	IN-006-I-COR-2	8,44
IN-006-S-C-1	7,62	IN-013-M-C-1	8,61	IN-010-I-COR-C-1	7,25
IN-007-S-C-3	8,69	IN-002-M-C-2	5,66	IN-010-I-COR-3	7,03
IN-008-S-C-1	8,81	IN-005-M-C-4	8,54	IN-009-I-C-3	8,34
IN-002-S-C-2	6,04	IN-007-M-C-3	9,77	IN-009-I-C-4	11,43
IN-007-S-C-5	7,18	IN-005-M-C-2	9,04	IN-015-I-C-2	9,46
IN-006-S-C-2	8,28	IN-007-M-C-4	9,83	IN-011-I-C-3	9,04
IN-012-S-C-1	8,34	IN-008-M-C-4	8,39		

Fuente: Propia.

6.5.2. Resultados a probetas expuestas

Después de estar expuestas 12 meses a la intemperie y estar en contacto directo con un suelo friccionante bajo constantes cambios de humedad, fueron ensayadas 12 probetas inmunizadas de la parte superior, 19 de la parte media y 15 de la parte inferior, así como 15 probetas en estado natural de la parte superior, 20 de la parte media y 15 de la parte inferior, para un total de 96 probetas. En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos de estas probetas, mencionando que se muestran los valores para esfuerzos últimos, y que, al igual que en el punto anterior, el grupo de muestras no ha pasado por ningún filtro estadístico.

Tabla 6.18. Probetas inmunizadas ensayadas a 12 meses a corte paralelo.

Superior		Media		Inferior	
Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)
IN-008-S-C-4	2,28	IN-187-M-4	4,41	IN-136-I-16	4,12
IN-206-S-9	3,56	IN-187-M-2	1,93	IN-004-I-C-2	3,17
IN-002-S-C-3	2,79	IN-142-M-7	4,65	IN-004-I-C-1	3,13
IN-142-S-6	4,75	IN-011-M-C-1	2,68	IN-136-I-4	3,58
IN-008-S-C-5	6,69	IN-006-M-C-4	3,83	IN-012-I-C-2	3,50
IN-012-S-C-5	1,46	IN-010-M-CP-4	4,26	IN-136-I-13	4,01
IN-008-S-C-3	7,86	IN-187-M-1	4,29	IN-136-I-15	4,69
IN-002-S-C-4	3,65	IN-187-M-3	4,07	IN-136-I-12	4,26
IN-016-I-C-2	3,81	IN-142-M-4	4,49	IN-136-I-6	4,72
IN-187-S-10	3,54	IN-015-M-C-3	2,02	IN-008-I-C-3	4,13
IN-207-S-9	4,04	IN-142-M-3	4,42	IN-136-I-14	4,21
IN-207-S-14	4,77	IN-187-M-1	5,12	IN-136-I-5	4,13
IN-002-S-C-5	3,38	IN-176-M-4	2,85		
IN-206-S-7	2,89				
IN-187-S-4	3,73				

Fuente: Propia.

Tabla 6.19. Probetas naturales ensayadas a 12 meses a corte paralelo.

Superior		Media		Inferior	
Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)
NA-205-S-2-COR	3,35	NA-209-M-4	3,75	NA-212-I-4	3,49
NA-205-S-4-COR	3,91	NA-196-M-5	5,59	NA-211-I-11	5,20
NA-205-S-8-COR	1,82	NA-185-M-5	1,71	NA-203-I-9	1,72
NA-211-S-1-COR	5,27	NA-209-M-6	3,43	NA-203-I-12	1,49
NA-196-S-4	3,56	NA-184-M-6	3,25	NA-201-I-12	5,20
NA-211-S-15	3,98	NA-201-M-1	2,96	NA-201-I-5	5,21
NA-196-S-8	3,79	NA-211-M-2	2,25	NA-203-I-5	5,10
NA-196-S-7	3,58	NA-209-M-8	4,11	NA-212-I-5	2,02
NA-196-S-3	6,03	NA-196-M-6	3,65	NA-201-I-6	3,84
NA-196-S-11	2,81	NA-185-M-7	2,92	NA-201-I-4	4,72
NA-211-S-8	2,42	NA-185-M-4	2,32	NA-203-I-11	4,58
NA-196-S-6	0,92	NA-196-M-1	4,52	NA-205-I-9	2,07

Fuente: Propia.

6.5.3. Análisis de datos

Como primera medida, se efectúa la identificación de datos anormales para obtener el grupo muestral a estudiar, obteniendo los resultados que se muestran a continuación.

Tabla 6.20. Datos atípicos para ensayos a corte.

Parte del culmo	IN (no expuestas)	IN (expuestas)	NA (expuesta)
Superior	0	1	0
Medio	0	0	0
Inferior	1	0	0

Fuente: Propia.

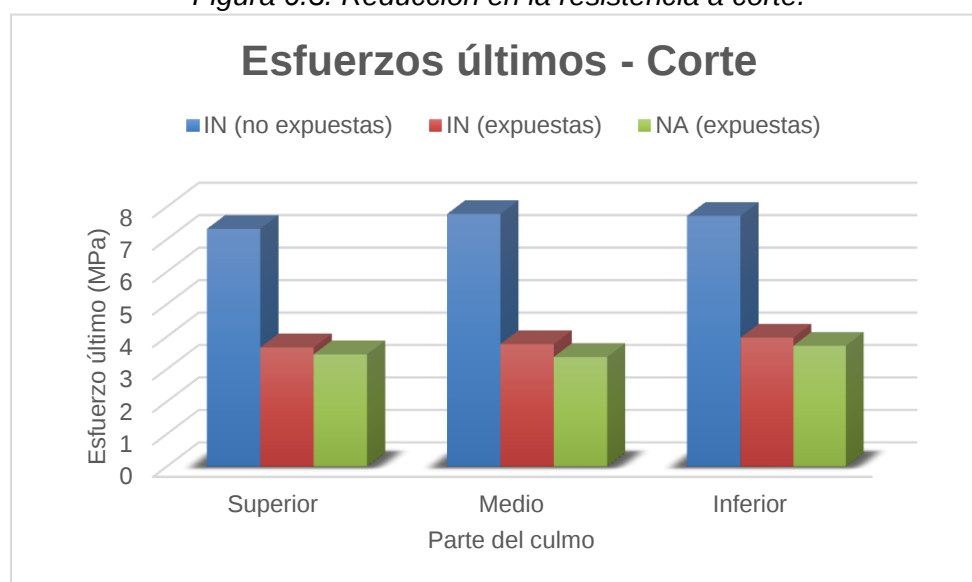
Ya con los datos atípicos identificados y retirados del grupo de datos, se procede a obtener los valores de esfuerzos últimos para la sollicitación de carga de corte paralelo a las fibras, con los siguientes resultados.

Tabla 6.21. Reducción en la resistencia a corte después de 12 meses de exposición.

Parte del culmo	IN (no expuestas)	IN (expuestas)		NA (expuesta)	
	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Reducción	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Reducción
Superior	7,32	3,670	49,85%	3,454	52,81%
Medio	7,78	3,772	51,53%	3,373	56,66%
Inferior	7,72	3,971	48,55%	3,719	51,81%

Fuente: Propia.

Figura 6.3. Reducción en la resistencia a corte.



Fuente: Propia.

Seguidamente, se presentan los resultados obtenidos de la determinación de los esfuerzos admisibles para esta sollicitación de carga.

Tabla 6.22. Esfuerzos admisibles a corte.

Esfuerzo admisible corte - Inmunizadas no expuestas					
Parte culmo	σ_{ult} (MPa)	Desv. Est. (Mpa)	σ_{ult} 5% (MPa)	Valor caract.	σ_{adm} (MPa)
Superior	7,32	1,00	6,00	5,38	1,63
Media	7,78	1,62	6,00	5,06	1,53
Inferior	7,72	0,97	6,53	5,89	1,79
Esfuerzo admisible corte - Inmunizadas expuestas					
Parte culmo	σ_{ult} (MPa)	Desv. Est. (Mpa)	σ_{ult} 5% (MPa)	Valor caract.	σ_{adm} (MPa)
Superior	3,67	1,24	1,46	1,10	0,33
Media	3,77	1,04	1,98	1,60	0,49
Inferior	3,97	0,52	3,15	2,83	0,86
Esfuerzo admisible corte - Naturales expuestas					
Parte culmo	σ_{ult} (MPa)	Desv. Est. (Mpa)	σ_{ult} 5% (MPa)	Valor caract.	σ_{adm} (MPa)
Superior	3,45	1,39	1,41	0,97	0,29
Media	3,37	1,07	2,01	1,49	0,45
Inferior	3,72	1,50	1,61	1,11	0,33

Fuente: Propia.

6.6. Flexión a luz corta (1.50m)

A continuación, se presenta el resumen de las probetas ensayadas a flexión a luz corta, incluyendo probetas expuestas a la intemperie y en condición natural.

Tabla 6.23. Sumario de probetas ensayadas a flexión a luz corta.

Parte del culmo	No expuestas	Expuestas	Subtotal
	Inmunizada	Inmunizada	
Superior	7	7	14
Media	7	8	15
Inferior	4	7	11
TOTAL			40

6.6.1. Resultados a probetas sin alterar

En el marco de la presente investigación se realizó un total de 18 ensayos de flexión a luz corta (luz de 1.50m) a probetas inmunizadas a tiempo cero,

distribuidos de la siguiente manera: 7 probetas de la parte superior de la guadua, 7 de la parte media y 4 de la parte inferior. En la siguiente tabla se presentan los resultados para esfuerzos últimos bajo esta solicitación:

Tabla 6.24. Probetas inmunizadas ensayadas a tiempo cero a flexión a luz corta.

Superior		Media		Inferior	
Probeta	$\sigma_{últ}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{últ}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{últ}$ (MPa)
IN-036-S-FC	50,70	IN-036-M-FC	49,87	IN-036-I-FC	92,96
IN-047-S-FC	68,77	IN-047-M-FC	64,54	IN-039-I-FC	61,27
IN-034-S-FC	60,16	IN-046-M-FC	77,25	IN-043-I-FC	79,51
IN-037-S-FC	41,15	IN-044-M-FC	46,15	IN-042-I-FC	54,39
IN-042-S-FC	60,66	IN-034-M-FC	75,68		
IN-043-S-FC	71,12	IN-037-M-FC	52,70		
IN-046-S-FC	52,70	IN-042-M-FC	64,52		

Fuente: Propia.

6.6.2. Resultados a probetas expuestas

Por otro lado, los ensayos a probetas inmunizadas expuestas a la intemperie por 12 meses fueron distribuidos de la siguiente manera: 7 de la parte superior de la guadua, 8 de la parte media y 7 de la parte inferior. A continuación, se presentan los esfuerzos últimos obtenidos:

Tabla 6.25. Probetas inmunizadas ensayadas a 12 meses a flexión a luz corta.

Superior		Media		Inferior	
Probeta	$\sigma_{últ}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{últ}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{últ}$ (MPa)
IN-032-S-FC	31,49	IN-027-M-FC	45,16	IN-030-I-FC	19,93
IN-033-S	41,00	IN-033-M-FC	38,83	IN-017-I	28,73
IN-023-S	40,10	IN-018-M-FC	44,38	IN-025-I	39,37
IN-038-S	36,19	IN-021-M-FC	32,36	IN-034-I	24,61
IN-029-S	42,31	IN-038-M	52,64	IN-038-I	43,01
IN-041-S	44,84	IN-020-M	38,01	IN-127-I	35,90
IN-157-S	35,40	IN-029-M	50,73	IN-157-I	29,83
		IN-028-M	44,76		

Fuente: Propia.

6.6.3. Análisis de datos

Al igual que en los casos de solicitación de carga anteriores, se llevó a cabo la identificación de valores atípicos, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 6.26. Datos atípicos para ensayos de flexión a luz corta.

Parte del culmo	IN (no expuestas)	IN (expuestas)
Superior	0	0
Medio	0	0
Inferior	0	0

Fuente: Propia.

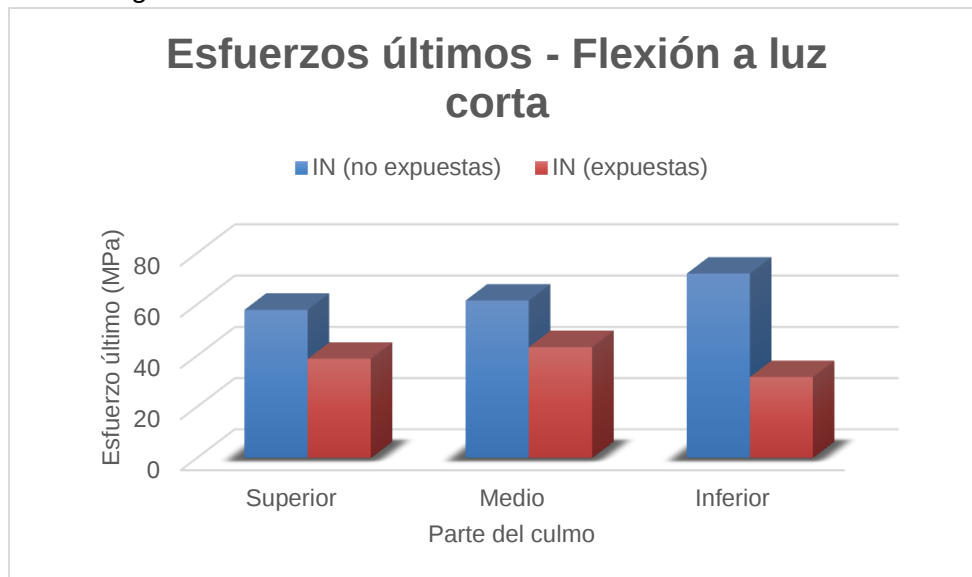
Después de extraer los datos anómalos, se hizo un primer acercamiento a los resultados estadísticos obtenidos del grupo muestral final, donde podemos apreciar los esfuerzos últimos promedio para esta sollicitación de carga, así como el porcentaje de reducción en la resistencia que esto representa.

Tabla 6.27. Reducción en la resistencia a flexión a luz corta después de 12 meses de exposición.

Parte del culmo	IN (no expuestas)	IN (expuestas)	
	$\sigma_{últ}$ (MPa)	$\sigma_{últ}$ (MPa)	Reducción
Superior	57,89	38,760	33,05%
Medio	61,53	43,360	29,53%
Inferior	72,03	31,630	56,09%

Fuente: Propia.

Figura 6.4. Reducción en la resistencia a flexión a luz corta.



Fuente: Propia.

6.7. Flexión a luz larga (3.00m)

6.7.1. Resultados a probetas sin alterar

En este apartado se ensayaron 7 probetas inmunizadas tanto de la parte superior como inferior (es necesario mencionar que, dada la longitud de la probeta que es 3 metros, no existe parte media a ensayar), para un total de 14 probetas de las cuales se obtuvieron los esfuerzos últimos que se presentan a continuación:

Tabla 6.28. Probetas inmunizadas ensayadas a tiempo cero a flexión a luz larga.

Superior		Inferior	
Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)
IN-141-S-FL	68,31	IN-137-I-FL	75,36
IN-137-S-FL	74,27	IN-140-I-FL	58,64
IN-133-S-FL	107,76	IN-143-I-FL	66,72
IN-140-S-FL	67,29	IN-142-I-FL	79,42
IN-131-S-FL	73,46	IN-130-I-FL	74,85
IN-129-S-FL	59,66	IN-134-I-FL	99,96
IN-130-S-FL	93,41	IN-131-I-FL	70,53

Fuente: Propia.

6.7.2. Resultados a probetas expuestas

Mientras tanto, para evaluar el deterioro en la resistencia físico-mecánica de la guadua bajo esta sollicitación de carga se ensayaron un total de 15 probetas inmunizadas expuestas a la intemperie durante 12 meses de la siguiente manera: 8 de la parte superior del culmo y 7 de la parte inferior, y 9 probetas naturales que sufrieron la misma exposición, donde 4 son de la parte superior de la guadua y 5 fueron extraídas de la parte inferior. Los resultados obtenidos se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 6.29. Probetas inmunizadas ensayadas a 12 meses a flexión a luz larga.

Superior		Inferior	
Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)
IN-124-S-FL	32,27	IN-133-I-FL	42,40
IN-167-S	37,88	IN-124-I	26,05
IN-120-S	38,52	IN-121-I	29,26
IN-075-S	37,80	IN-114-I	38,69
IN-122-S	40,90	IN-120-I	36,12
IN-121-S	42,98	IN-147-I	28,53
IN-145-S	42,13	IN-033-I	33,89
IN-153-S	42,90		

Fuente: Propia.

Tabla 6.30. Probetas naturales ensayadas a 12 meses a flexión a luz larga.

Superior		Inferior	
Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)
NA-159-S	44,25	NA-161-I	37,02
NA-182-S	64,91	NA-159-I	51,81
NA-160-S	13,78	NA-165-I	35,21
NA-185-S	35,63	NA-195-I	62,09
		NA-162-I	44,70

Fuente: Propia

6.7.3. Análisis de datos

El análisis de datos realizado para estos ensayos concluye con la identificación del grupo muestral válido después de extraer los valores atípicos, obteniendo los resultados para esfuerzos últimos presentados a continuación.

Tabla 6.31. Datos atípicos para ensayos de flexión a luz larga.

Parte del culmo	IN (no expuestas)	IN (expuestas)	NA (expuesta)
Superior	0	0	0
Medio	0	0	0
Inferior	0	0	0

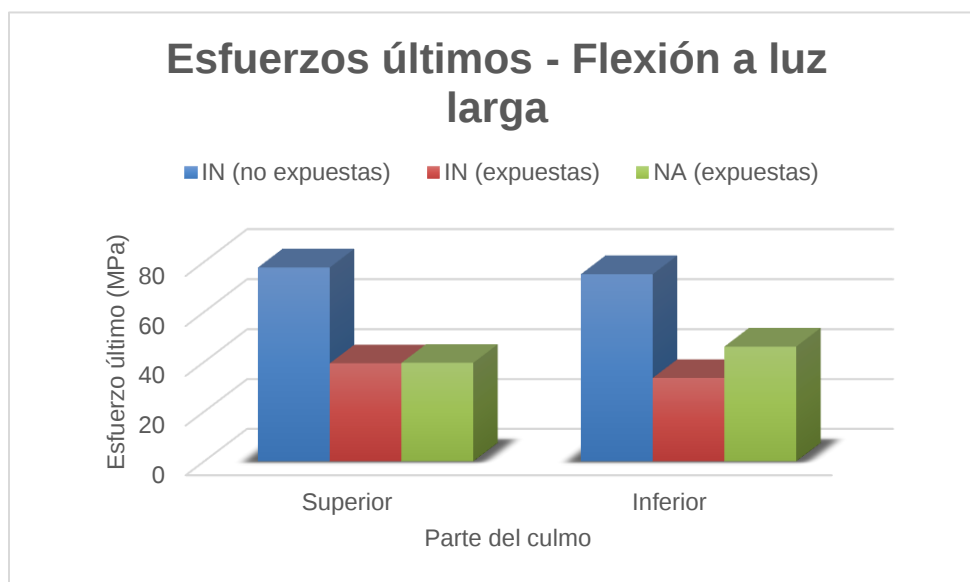
Fuente: Propia.

Tabla 6.32. Reducción en la resistencia a flexión a luz larga después de 12 meses de exposición.

Parte del culmo	IN (no expuestas)	IN (expuestas)		NA (expuestas)	
	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Reducción	$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa)	Reducción
Superior	77,74	39,42	49,29%	39,64	49,01%
Inferior	75,07	33,56	55,29%	46,17	38,50%

Fuente: Propia.

Figura 6.5. Reducción en la resistencia a flexión a luz larga.



Fuente: Propia.

6.8. Tracción paralela a las fibras

6.8.1. Resultados a probetas sin alterar

Debido a que la sollicitación a tracción no se presenta comúnmente en la guadua, se tomó la decisión de realizar la caracterización del material con probetas inmunizadas y sin ningún tipo de exposición a la intemperie, por lo que no se cuentan con valores para evaluar la disminución de la resistencia de la guadua a este tipo de ensayo con el paso del tiempo. En esta etapa fueron ensayadas 11 probetas inmunizadas de la parte superior, 9 de la parte media y 6 de la parte inferior, para un total de 26 ensayos realizados. En la tabla que se presenta a continuación se pueden encontrar los valores obtenidos para esfuerzos últimos bajo esta sollicitación.

Tabla 6.33. Probetas inmunizadas ensayadas a tiempo cero a tracción.

Superior		Media		Inferior	
Probeta	$\sigma_{últ}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{últ}$ (MPa)	Probeta	$\sigma_{últ}$ (MPa)
IN-014-S-T-3	117,55	IN-016-M-T-1	102,71	IN-016-I-T-1	99,16
IN-014-S-T-4	123,72	IN-016-M-T-2	137,22	IN-016-I-T-3	99,68
IN-016-S-T-1	108,15	IN-016-M-T-3	98,90	IN-016-I-T-4	73,32
IN-016-S-T-2	80,37	IN-016-M-T-4	112,81	IN-016-I-T-5	74,91
IN-016-S-T-3	104,26	IN-016-M-T-5	98,51	IN-016-I-T-6	80,34
IN-016-S-T-4	94,58	IN-016-M-T-6	103,25	IN-016-I-T-8	98,61

IN-016-S-T-5	96,91	IN-016-M-T-8	104,00		
IN-016-S-T-6	108,04	IN-016-M-T-9	103,00		
IN-016-S-T-7	106,05	IN-016-M-T-7	62,15		
IN-016-S-T-8	66,02				
IN-016-S-T-9	79,08				

Fuente: Propia.

6.8.2. Análisis de resultados

Concluyendo la presentación de resultados obtenidos para esfuerzos últimos, se muestran a continuación los datos atípicos encontrados en el grupo muestral de elementos ensayados bajo esta sollicitación de carga, así como los valores de esfuerzos últimos promedios para este grupo de estudio final.

Tabla 6.34. Datos atípicos y esfuerzos últimos para ensayos de tracción.

Parte del culmo	IN (no expuestas)	
	Datos atípicos	$\sigma_{últ}$ (MPa)
Superior	0	98,61
Medio	0	107,55
Inferior	0	87,67

Fuente: Propia.

7. Correlaciones

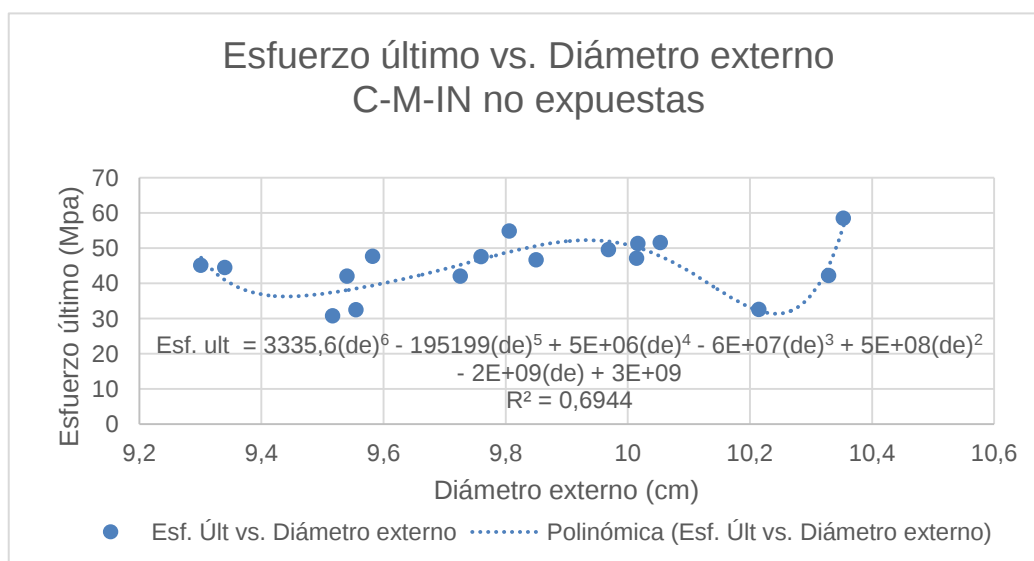
Se calcularon diferentes correlaciones entre los esfuerzos últimos obtenidos para las diferentes sollicitaciones de carga y múltiples datos geométricos como los diámetros externo e interno, altura, número de nudos, entre otros, con el fin de obtener varias ecuaciones que permitieran conocer la capacidad última de una probeta sin tener que evaluar su resistencia de manera directa. A continuación, se presentan las correlaciones que presentaron un mayor coeficiente de ajuste.

7.1. Esfuerzo último vs. Diámetro externo (Compresión paralela)

En primera instancia se presenta esta sencilla correlación que, a pesar de arrojar resultados deficientes para la parte superior de la guadua, ofrece un valor de ajuste alrededor del 70% para las partes media y superior lo cual, teniendo en

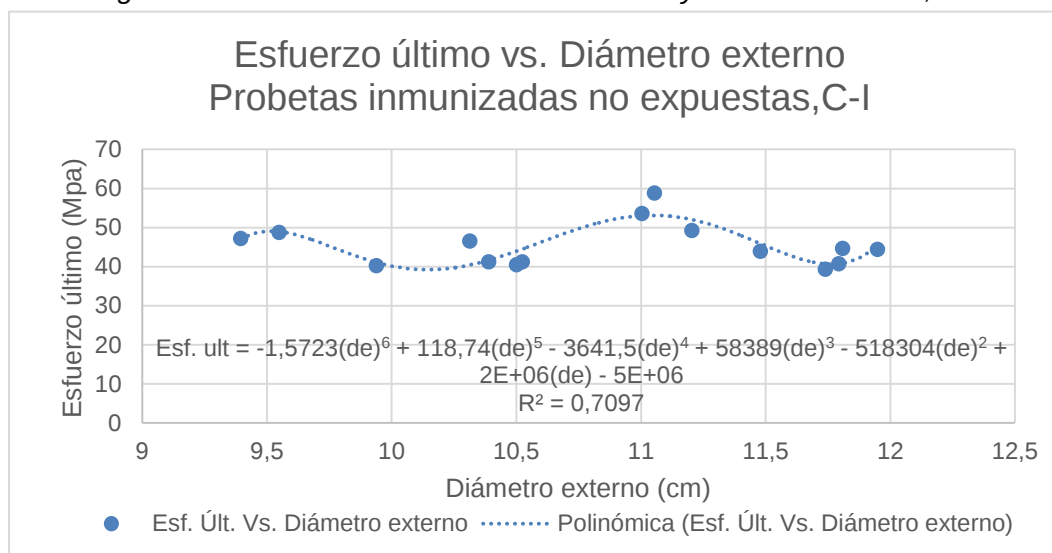
cuenta la desviación de los valores para cada grupo muestral, es una aproximación aceptable y es relativamente confiable.

Figura 7.1. Correlación entre esfuerzo último y diámetro externo, C-M.



Fuente: Propia.

Figura 7.2. Correlación entre esfuerzo último y diámetro externo, C-I.



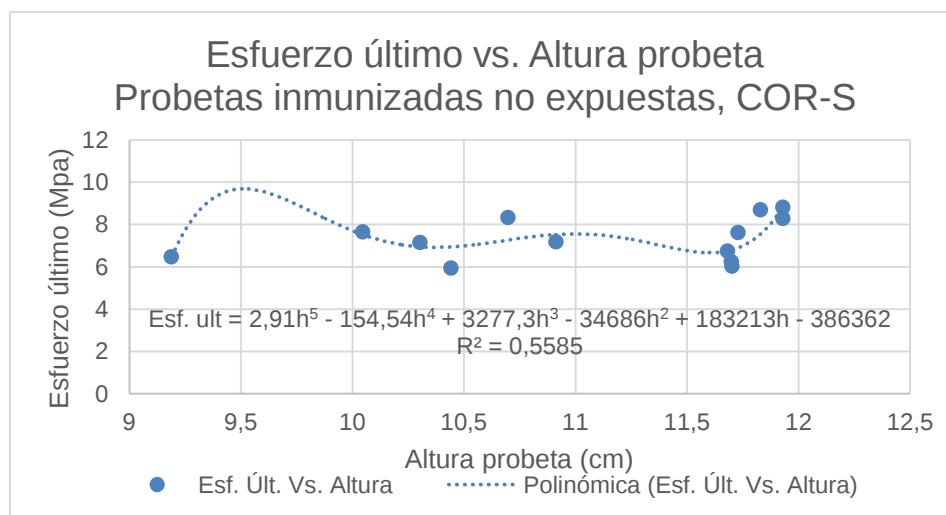
Fuente: Propia.

7.2. Esfuerzo último vs. Altura probeta y Diámetro externo (Corte)

Para esta sollicitación de carga se realizaron diferentes correlaciones entre los esfuerzos últimos y las características físicas de las probetas, obteniendo como resultado aproximaciones aceptables en las relaciones que se presentan a

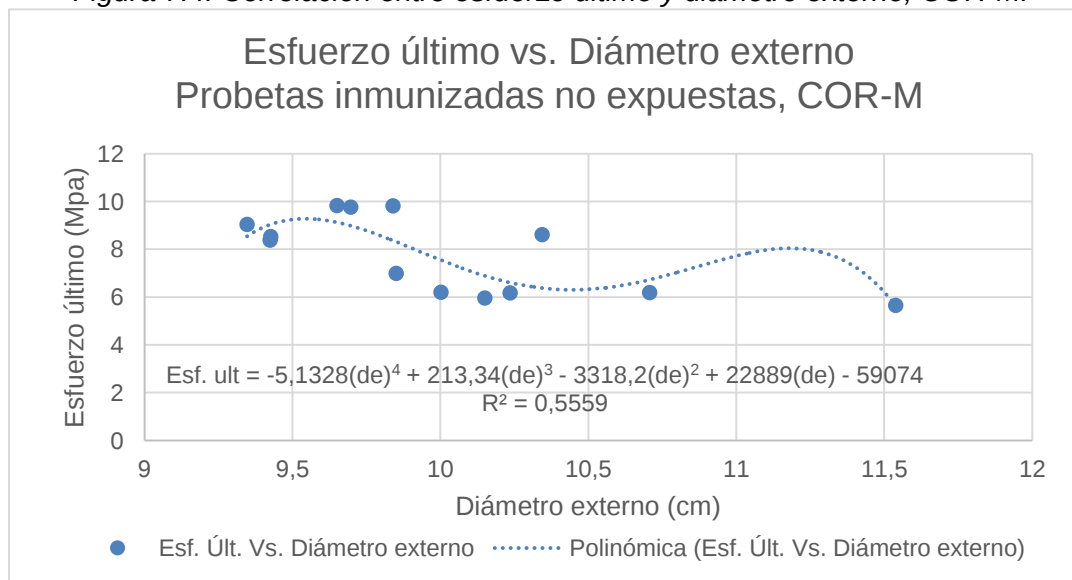
continuación. La correlación entre el esfuerzo último y la altura de la probeta para la parte media de la guadua arroja un coeficiente de ajuste menor al 10% por lo que no será presentada, y en su lugar fue comparada con otra propiedad geométrica como lo es su diámetro externo.

Figura 7.3. Correlación entre esfuerzo último y altura, COR-S.



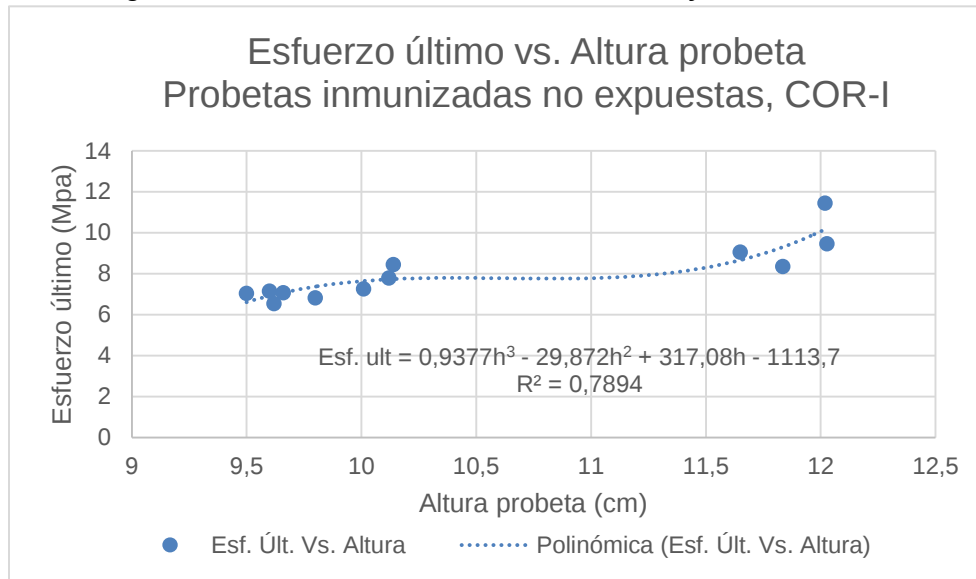
Fuente: Propia.

Figura 7.4. Correlación entre esfuerzo último y diámetro externo, COR-M.



Fuente: Propia.

Figura 7.5. Correlación entre esfuerzo último y altura, COR-I.

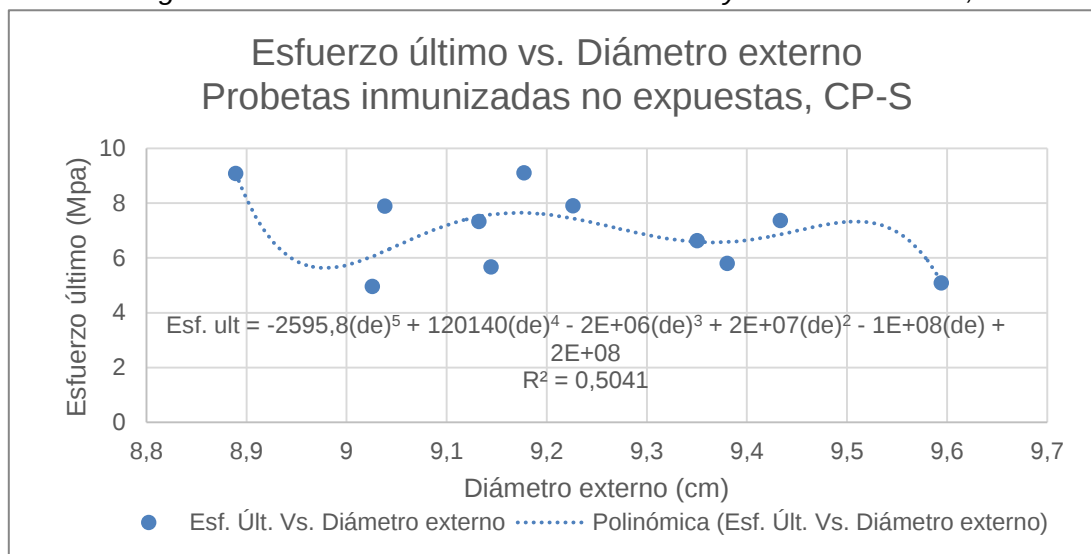


Fuente: Propia.

7.3. Esfuerzo último vs. Diámetro externo (Compresión perpendicular)

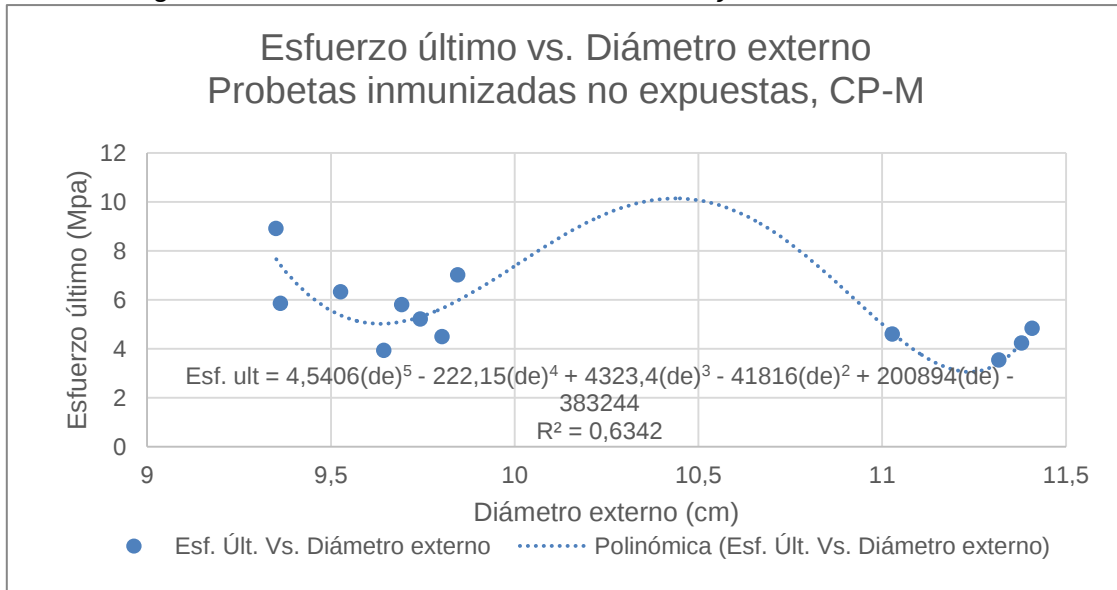
Para este tipo de ensayo, se descartan las correlaciones con la altura, ya que es la característica geométrica menos influyente en el comportamiento del material bajo esta solicitud de carga, por lo que se opta por evaluar los esfuerzos últimos obtenidos en relación a los diámetros externos de las probetas ensayadas. En las siguientes gráficas se presentan los resultados obtenidos.

Figura 7.6. Correlación entre esfuerzo último y diámetro externo, CP-S.



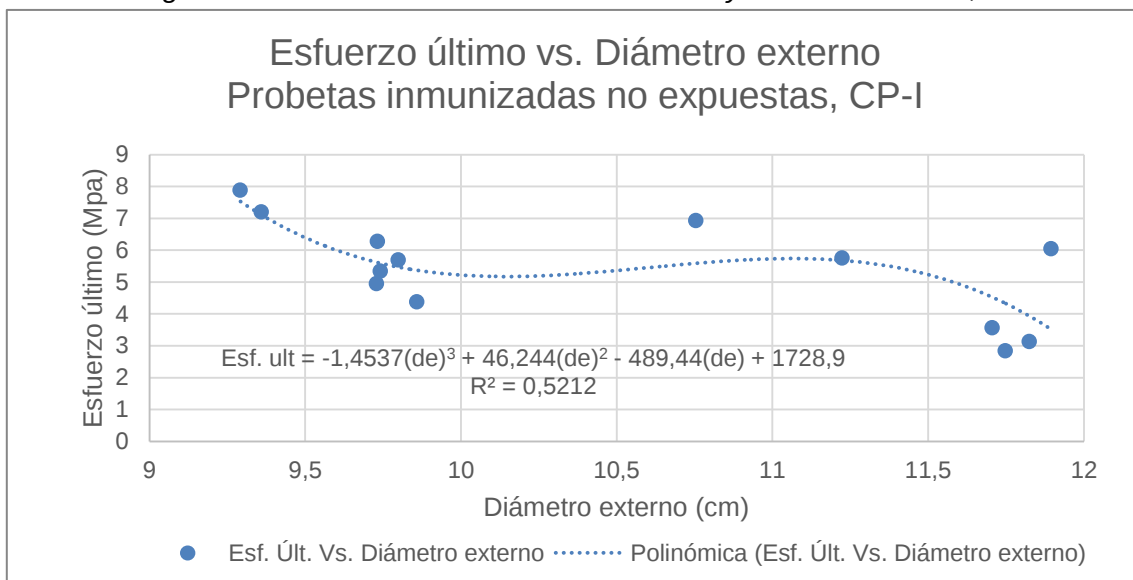
Fuente: Propia.

Figura 7.7. Correlación entre esfuerzo último y diámetro externo, CP-M.



Fuente: Propia.

Figura 7.8. Correlación entre esfuerzo último y diámetro externo, CP-I.



Fuente: Propia.

8. Conclusiones

Como primera conclusión, se puede asegurar que los resultados de la caracterización físico mecánica de la guadua *angustifolia Kunth* obtenidos en este proyecto de investigación distan de manera considerable con los obtenidos en otros trabajos, lo cual confirma la necesidad de evaluar elementos de diferentes guaduales para obtener resultados más acercados a la realidad y poder ejecutar un diseño más eficiente.

A continuación, se presenta un resumen de todos los ensayos realizados en esta investigación:

		Esfuerzos últimos (MPa)								
		IN - Tiempo cero			IN - Tiempo 1 año			NA - Tiempo 1 año		
Prueba	Pos. culmo	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.
Compresión paralela	S	50,6	40,1	28,4	28,4	22,8	11,7	22,8	14,4	7,3
	M	58,5	45,7	30,9	38,3	16,0	1,7	26,3	15,4	4,3
	I	53,5	44,4	39,3	32,8	13,9	1,8	30,1	18,0	7,9
Corte paralelo	S	8,8	7,3	5,9	7,9	3,7	1,5	6,0	3,5	0,9
	M	9,8	7,8	5,7	5,1	3,8	1,9	5,6	3,4	1,7
	I	9,5	7,7	6,5	4,7	4,0	3,1	5,2	3,7	1,5
Compresión perpendicular	S	10,1	7,2	5,0	5,8	3,6	1,9	6,4	1,3	0,9
	M	7,0	5,1	3,5	5,5	2,9	1,0	4,3	3,1	1,9
	I	7,9	5,4	2,8	4,9	2,6	1,5	8,3	2,1	0,2
Tracción paralela	S	123,7	98,6	66,0	-	-	-	-	-	-
	M	137,2	107,6	98,5	-	-	-	-	-	-
	I	99,7	87,7	73,3	-	-	-	-	-	-
Flexión a luz corta	S	71,1	57,9	41,2	44,8	38,8	31,5	-	-	-
	M	77,3	61,5	46,2	52,6	43,4	32,4	-	-	-
	I	93,0	72,0	54,4	43,0	31,6	19,9	-	-	-
Flexión a luz larga	S	107,8	77,7	59,7	43,0	39,4	32,3	64,9	39,6	13,8
	I	100,0	75,1	58,6	42,4	33,6	26,1	62,1	46,2	35,2

Por otro lado, la reducción presentada en los esfuerzos últimos para las probetas que fueron expuestas a la intemperie es casi la misma para probetas inmunizadas y naturales (un promedio de 49.6% y 56.3%, respectivamente) existiendo casos en los que la disminución de resistencia fue mayor para las probetas inmunizadas (especialmente en los ensayos a flexión, donde la diferencia

alcanza valores de hasta el 16.8%), con lo cual se puede concluir que este proceso de inmunizado no es tan eficiente como se esperaría ya que, si bien el aspecto estético de las probetas es notoriamente diferente, el comportamiento del material ante las diferentes solicitaciones de carga es muy similar teniendo en cuenta que fueron expuestas a las mismas condiciones ambientales. Cabe destacar que la variación obtenida para la segunda etapa de ensayos (probetas expuestas) fue considerablemente alta, por lo que estos valores deben ser usados con un factor de seguridad muy elevado que asegure que la carga de diseño no supere la capacidad del elemento.

En cuanto a los esfuerzos últimos, se obtuvo los resultados esperados para las probetas que no fueron expuestas a la intemperie, ya que los valores admisibles para los diferentes esfuerzos fueron muy cercanos a los relacionados en la norma sismo-resistente, mientras que para las probetas que estuvieron contenidas en el ambiente de exposición arrojaron esfuerzos admisibles que no son válidos ni confiables, por lo que no deben ser usados en diseños de ningún tipo. Esto se dio debido a la naturaleza de las ecuaciones contenidas en la norma para calcular los esfuerzos admisibles, **ya que estas castigan fuertemente si la cantidad de ensayos realizados es menor a 20, o si la desviación estándar es muy elevada.**

En lo que a correlaciones se refiere, este proyecto de investigación arrojó algunas que servirán como herramientas útiles para conocer de manera aproximada los esfuerzos últimos del material solo con conocer algunas propiedades geométricas, lo que dará una idea al lector de la capacidad de un espécimen sin necesidad de someterlo a diferentes ensayos. Sin embargo, y como ya se mencionó anteriormente, no es un material con resultados estandarizados, por el contrario, presenta grandes variaciones de una zona geográfica a otra, por lo que estas correlaciones solo serán confiables para probetas extraídas de un sector cercano a la zona de estudio y con similar período de cosecha.

En la siguiente tabla se resumen las correlaciones obtenidas en este trabajo de investigación, así como su coeficiente de ajuste:

Correlación	Ecuación	R ²
$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa) vs Diámetro externo (cm) (C-M)	$3335,6(\text{de})^6 - 195199(\text{de})^5 + 5\text{E}+06(\text{de})^4 - 6\text{E}+07(\text{de})^3 + 5\text{E}+08(\text{de})^2 - 2\text{E}+09(\text{de}) + 3\text{E}+09$	0,6944
$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa) vs Diámetro externo (cm) (C-I)	$-1,5723(\text{de})^6 + 118,74(\text{de})^5 - 3641,5(\text{de})^4 + 58389(\text{de})^3 - 518304(\text{de})^2 + 2\text{E}+06(\text{de}) - 5\text{E}+06$	0,7097
$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa) vs Altura (cm) (COR-S)	$2,91h^5 - 154,54h^4 + 3277,3h^3 - 34686h^2 + 183213h - 386362$	0,5585
$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa) vs Diámetro externo (cm) (COR-M)	$-5,1328(\text{de})^4 + 213,34(\text{de})^3 - 3318,2(\text{de})^2 + 22889(\text{de}) - 59074$	0,5559
$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa) vs Altura (cm) (COR-I)	$0,9377h^3 - 29,872h^2 + 317,08h - 1113,7$	0,7894
$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa) vs Diametro externo (cm) (CP-S)	$-2595,8(\text{de})^5 + 120140(\text{de})^4 - 2\text{E}+06(\text{de})^3 + 2\text{E}+07(\text{de})^2 - 1\text{E}+08(\text{de}) + 2\text{E}+08$	0,5041
$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa) vs Diametro externo (cm) (CP-M)	$4,5406(\text{de})^5 - 222,15(\text{de})^4 + 4323,4(\text{de})^3 - 41816(\text{de})^2 + 200894(\text{de}) - 383244$	0,6342
$\sigma_{\text{últ}}$ (MPa) vs Diametro externo (cm) (CP-I)	$-1,4537(\text{de})^3 + 46,244(\text{de})^2 - 489,44(\text{de}) + 1728,9$	0,5212

Finalmente, el investigador considera que este trabajo posiciona a la guadua como un material altamente eficiente para la construcción, que además es eco-amigable y de fácil manejo, y que el conocimiento sobre su uso como elemento de bio-ingeniería debe ser profundizado en futuras investigaciones con el fin de acotar de manera más exacta sus alcances y capacidades y poder llevar a cabo diseños más eficientes que superen el uso artesanal al que se limitan actualmente.

9. Futuras líneas de investigación

Como principal recomendación a futuros proyectos de investigación que sigan esta línea, se sugiere principalmente revisar el tamaño muestral, ya que se encontraron numerosos inconvenientes con la disponibilidad del tiempo y el espacio, así como el personal encargado de manejar los equipos de ensayos, además de que escoger un tamaño muestral menor puede facilitar la labor del investigador al tener un campo de acción más pequeño y especializado.

Como consecuencia de lo anterior, el investigador podrá realizar labores que aportarán de manera importante al valor de la investigación como, por ejemplo, llevar un control diario del porcentaje de humedad de las probetas en exposición a la intemperie, evaluación de diferentes métodos de inmunización (o el

mismo método aplicado por diferentes proveedores), estudio de probetas de diferentes guadales, entre otros.

Finalmente, será interesante evaluar diferentes variables propias del material (como su densidad y humedad), y su cambio durante la exposición a este tipo de condiciones desfavorables, así como el efecto que esto genere en la resistencia del material.

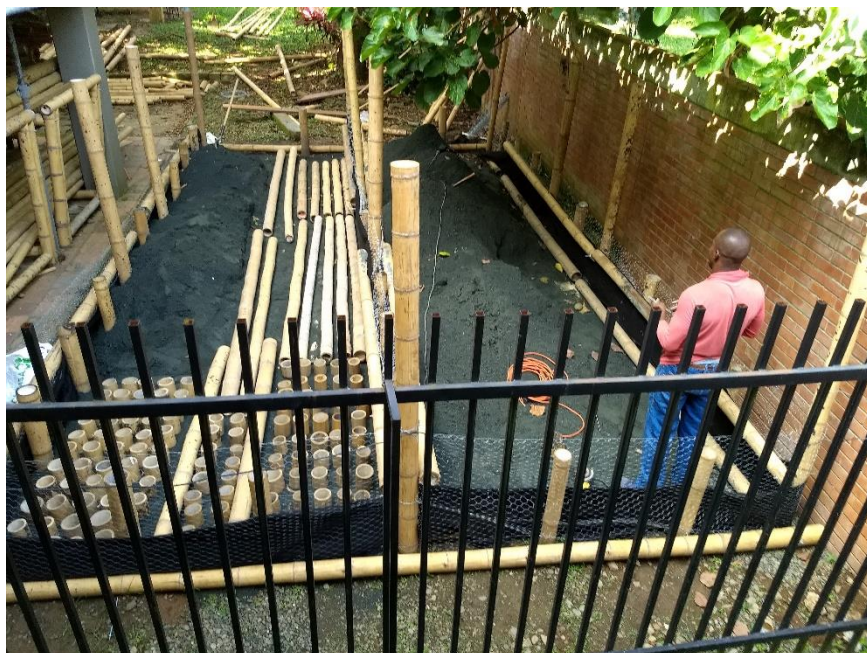
Anexos



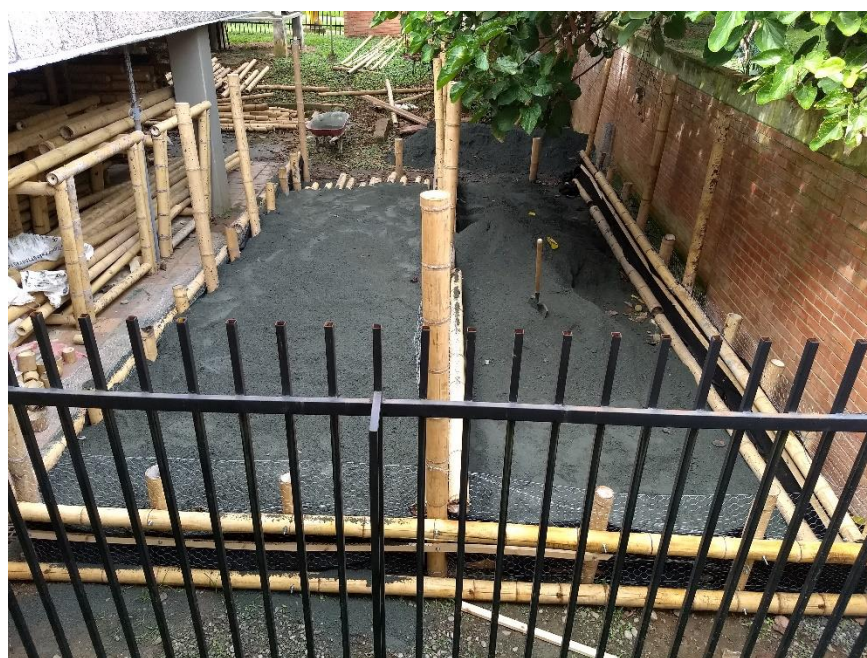
Anexo 1. Disposición del material de estudio.



Anexo 2. Construcción del ambiente de exposición a la intemperie.



Anexo 3. Construcción del ambiente de exposición a la intemperie.



Anexo 4. Construcción del ambiente de exposición a la intemperie.



Anexo 5. Falla por aplastamiento en ensayo a flexión (inválido).



Anexo 6. Falla longitudinal en ensayo a flexión.



Anexo 7. Montaje ensayo a tracción paralela a las fibras.



Anexo 8. Ausencia de rigidez debido a la pérdida de la matriz conglomerante de fibras.



Anexo 9. Ausencia de rigidez debido a la pérdida de la matriz conglomerante de fibras.



Anexo 10. Falla longitudinal en múltiples puntos en ensayo a flexión.

Referencias bibliográficas

- Alfredo, L., Moreno, C., Geovany, W., & Rojas, H. (2012). Caracterización de la Guadua Angustifolia Kunth cultivada en Miraflores (Boyacá) de acuerdo con la NSR-10. *Revista Facultad de Ingeniería UPTC*, 21(33), 53–71.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). (2010). Título G-Estructuras de madera y estructuras de guadua. NSR-10. *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*, 158.
- Carvajal, W., Ortegón, W., & Romero, C. (1981). Elementos estructurales en bambú. *Bogotá*.
- Castaño, F., & Moreno, R. D. (n.d.). Guadua para todos: Cultivo y aprovechamiento. *Proyecto Manejo Sostenible de Bosques de Colombia*.
- Castrillón Valdés, B. M., & Malaver Zapata, D. M. (2004). Procedimientos de ensayo para la determinación de las propiedades físico mecánicas de la guadua, 94. Retrieved from <http://www.guadua.biz/documentos/07.pdf>
- Ciro, H. J., Osorio, J. A., & Vélez, J. M. (2005). Determinación de la resistencia mecánica a tensión y cizalladura de la Guadua angustifolia Kunth. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 58(1), 2709–2715.
- Correal, J. F., Echeverry, J. S., Ramírez, F., & Yamín, L. E. (2014). Experimental evaluation of physical and mechanical properties of Glued Laminated Guadua angustifolia Kunth. *Construction and Building Materials*, 73, 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.056>
- García, J. J., Rangel, C., & Ghavami, K. (2012). Experiments with rings to determine the anisotropic elastic constants of bamboo. *Construction and Building Materials*, 31, 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.089>
- Harries, K. A., Glucksman, R., Vieira, J., Liu, T., & Morán, R. (n.d.). *Equipo portátil para ensayos de bambú*.
- Instituto Nacional de Normas Técnicas. (2007a). NTC 5301, *Preservación y secado del culmo de Guadua angustifolia Kunth*.
- Instituto Nacional de Normas Técnicas. (2007b). NTC 5525, *Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua angustifolia Kunth*.
- Instituto Nacional de Normas Técnicas. (2008). NTC5300, *Cosecha y postcosecha del culmo de Guadua angustifolia Kunth*.
- International Organization for Standardization. (2004). *ISO 22157-1, Bamboo - Determination of Physical and Mechanical Properties*.
- Londoño, X. (2011). El bambú en Colombia. *Biotecnología Vegetal*, 11(3), 143–154.

- Lozada Aspiazu, C. N., & Gómez, E. (2012). Determinación experimental de la durabilidad de tableros derivados de bambú (*Guadua angustifolia* Kunth), mediante pruebas de envejecimiento aceleradas. *Universidad de Guayaquil*.
- Luna, P., Lozano, J., & Takeuchi, C. (2014). Determinación experimental de valores característicos de resistencia para *Guadua angustifolia* / Experimental determination of characteristics values for *Guadua angustifolia*. *Maderas. Ciencia y Tecnología VO* - 16, (1), 77. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2014005000007>
- Morales, D., & Kleinn, C. (2004). Inventario de las existencias de *Guadua angustifolia* en el Eje Cafetero de Colombia. *Memorias Simposio Internacional Guadua*, 85–105.
- Pantoja Trujillo, N. H., & Acuña Jiménez, D. F. (2005). Resistencia al corte paralelo a la fibra de la *Guadua angustifolia*. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Prieto, E., & Sánchez, J. (2000). *Comportamiento de la Guadua angustifolia sometida a flexión*.
- Takeuchi, C. P. (2014). Caracterización mecánica del bambú *Guadua* Laminado para uso estructural, 1.
- Takeuchi, C. P., & González, C. E. (2007). Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* y determinación del módulo de elasticidad. *Ingeniería y Universidad*, 11(1), 89–103. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2001000100005>
- Torres, L. A., Ghavami, K., & García, J. J. (2007). A transversely isotropic law for the determination of the circumferential young's modulus of bamboo with diametric compression tests. *Latin American Applied Research*, 37(4), 255–260.
- Uribe Vallejo, M., & Durán Contreras, A. (2002). *Estudio de elementos solicitados a compresión armados por tres Guaduas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Villegas González, F. (2005). Comparación consumos de recursos energéticos en la construcción de vivienda social: *Guadua* vs. Concreto. *Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales*, 114. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/988/1/felipevillegasgonzalez.2005.pdf>
- Xu, Q., Harries, K., Li, X., Liu, Q., & Gottron, J. (2014). Mechanical properties of structural bamboo following immersion in water. *Engineering Structures*, 81, 230–239. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.09.044>
- Zaragoza-Hernández, I., Borja de la Rosa, A., Zamudio Sánchez, F. J., Ordóñez-Candelaria, V. R., & Bárcenas-Pazos, G. M. (2014). Anatomía del culmo de bambú. *Madera y Bosques*, 20, 87–96.