Evaluación de conexiones clavadas y atornilladas madera a madera de la especie *Cedrelinga cateniformis* Ducke sometidas a carga lateral según las normas AWC/NDS 2018 y NSR-10

Laura Ximena Uriza Cruz

Director

PhD Cesar Augusto Polanco Tapia

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Programa de Ingeniería Forestal

2025

Nota de Aceptación

Evaluación de conexiones clavadas y atornilladas madera a madera de la especie *Cedrelinga cateniformis* Ducke sometidas a carga lateral según las normas AWC/NDS 2018 y NSR 10

_____

Nombre Director de Trabajo de Grado

_____ _____

Jurado Jurado

2025

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN 7
2. PROBLEMA DE INVESTIGACION 8
2.1 Planteamiento del problema 8
2.2 Formulación del problema 9
2.3 Sistematización del problema 9
3. JUSTIFICACIÓN 10
4. OBJETIVOS 12
4.1 Objetivo General 12
4.3 Objetivos Específicos 12
5. ANTECEDENTES 13
6. MARCO DE REFERENCIA 16
6.1 Normatividad aplicable al diseño 16
6.2 Tipo de conexiones 17
6.3 Diseño de conexiones 17
6.4 Comportamiento estructural de las conexiones en la madera 19
6.5 Propiedades estructurales de la madera 21
6.6 22
Achapo Cedrelinga cateniformis Ducke 22
7. MATERIALES Y METODOS 24
7.1 Procedencia de materiales 24
7.1.1 Origen de la madera 24
7.1.2 Conectores 25
7.2 Seguimiento y medición del contenido de humedad 26
7.3 Dimensionamiento de probetas para armado 27
7.4 Determinación de propiedades físicas 28
7.5 Cálculo de densidades 29
7.6 Determinación del número de conectores por tratamiento 31
7.7 33
Diseño de configuración de conexiones 33
7.7.1 Configuración para clavos 4x40 34
7.7.2 Configuración para tornillos 8x100 34
7.8 36
Combinación de piezas y ensamble de probetas 36
7.9 38
Montaje y ensayo de probetas 38
7.9.1 Máquina de ensayos Universal MTS 38
7.9.2 Procedimiento de ensayo 38
7.10 Procesamiento y análisis de los resultados 40
8. RESULTADOS Y DISCUSION 42
8.2 Análisis del contenido de humedad 42
8.3 Propiedades físicas de la madera de Achapo; Cedrelinga cateniformis 44
8.4 Densidades de probetas 47
8.5 Valores experimentales y teóricos 50
8.6 Resultados teóricos y experimentales para la conexión con clavos 50
8.7 Resultados teóricos y experimentales para la conexión con tornillos 53
8.8 Valores teóricos 55
Resultados con respecto a la densidad anhidra 57
Resultados con respecto a la densidad anhidra 57
8.9 Evaluación comparativa entre valores experimentales y teóricos de las uniones 58

8.10 Análisis modos de fallas 62
8.11 Prueba estadística 65
9 CONCLUSIONES 68
10 RECOMENDACIONES 69
11 REFERENCIAS 70

Lista de Figuras

Figura 1. Conexión pernada simple cizallamiento (a) y doble cizallamiento (b). Adaptado de NDS-201818
Figura 2. Modos de fluencia en conexiones clavadas y atornilladas sometidas a cortante simple. Adaptado de AWC-NDS-2018 19
Figura 3. Montaje de madera Cedrelinga cateniformis en secado. Fuente (Propia) 25
Figura 4. Geometría y características mecánicas de los conectores; Izq. Clavo 4*40; Der. Tornillo 8*100. Adaptado de (Rothoblaas, 2023) 26
Figura 6. Seguimiento y medición del contenido de humedad. Fuente (Propia) 26
Figura 7. a) Dimensionamiento de probetas para armado Corte transversal en sierra circular, b) dimensionado con cepillo de espesor, c) cepillado de caras, d) alineado y escuadrado con cepillo superficie 28
Figura 8. Desarrollo de procesos para el cálculo de densidad a través de las propiedades físicas. a) probetas en horno; b) probetas en condiciones ambiente; c) probetas sumergidas 29
Figura 9. Procesos para el cálculo de densidad a través de las propiedades físicas. a) probetas en horno; b) probetas en condiciones ambiente; c) probetas sumergidas 29
Figura 11. Diseño de configuración para clavos en la configuración 20*40*20 y conector 4*40. Fuente (propia) 34
Figura 12. Diseño de configuración para clavos en la configuración 40*40*40 y conector 8*100. Fuente (propia) 35
Figura 13. Combinación de piezas y ensamble de piezas para pruebas de resistencia en donde: a) separación de piezas a partir de su densidad (de menor a mayor); b) combinación de piezas en pachas de densidad similar; c) pretaladrado de piezas en la matriz; d) ensamble de piezas. Fuente (Autora) 36
Figura 14. Montaje y ensayo de probetas en donde: a) Maquina de Ensayos Universal MTS; b) software Flex Test 60, c) Unidad de potencia hidráulica. Fuente (Autora) 39
Figura 15. Grafica para interpretación de resultados de acuerdo con la norma ASTM D1761-20 40
Figura 16. Evolución del promedio de humedad (%) registrado en 61 probetas durante 6 semanas consecutivas. Fuente (Autores) 42
Figura 17. Gráfico boxplot por semana. Fuente (Autores) 43
Figura 18. Correlaciones de las variabilidades analizadas. Fuente (Propia) 45
Figura 19. Correlación de las variables analizadas de las gráficas. Fuente (Autores) 46
Figura 20. Análisis de densidad promedio por tipo. Fuente (Autor) 48
Figura 21. Comparación de densidades promedio por tipo. Fuente (Autores) 49
Figura 20. Curvas de carga vs desplazamiento para el tratamiento de uniones clavadas 51
Figura 21 Curvas de carga vs desplazamiento para el tratamiento de uniones atornilladas 54
Figura 22. Valores de carga y diseño con densidad básica según la NDS-18 y la NSR-10 para uniones clavadas y atornilladas 55
Figura 26 Valores de carga y diseño con densidad anhidra según la NDS-18 y la NSR-10 para uniones clavadas y atornilladas 57
Figura 30. Relación experimental-teórica del comportamiento mecánico de las uniones clavadas. Fuente (Autora) 59
Figura 32 Modos de falla para el tratamiento con clavos. Fuente (Autores) 66
Figura 33 Modos de falla para el tratamiento con tornillos. Fuente (Autores) 66

Lista de Tablas

Tabla 1Ecuaciones modos de falla para conexiones de simple cizallamiento. Adaptado de (AWC-NDS, 2018) 20
Tabla 2. Ecuaciones factor K. Adaptado de (AWC-NDS, 2018) 20
Tabla 3 Propiedades fisicas de Cedrelinga cateniformis (Ducke) proveniente del bosque natura. Fuente (Arostegui, 1982) 23
Tabla 4 Propiedades mecánicas de Cedrelinga cateniformis (Ducke) de bosque natural. Fuente (Arostegui, 1982) 23
Tabla 5 Dimensiones y características de conectore. Adaptado de (Rothoblaas, 2023) 26
Tabla 6. Diseño experimental ya caracterización del número de conectores a partir de la descripción del material de acuerdo con la norma NDS-24. Adaptado de (AWC-NDS, 2018) 32
Tabla 7. Diseño experimental y caracterización de los modos de falla para el cálculo del número de conectores de acuerdo con la NDS-24. Adaptado de (AWC-NDS, 2018) 33
Tabla 8. Espaciamiento mínimo adaptado de (AWC-NDS, 2018) 33
Tabla 8. Densidad de probetas obtenidas para armado de las pachas. Fuente (Autora) 47
Tabla 10. Valores experimentales y teóricos para conexiones clavadas 59
Tabla 11. Valores experimentales y teóricos para conexiones atornilladas 60
Tabla 9Anlisis ANOVA de un factor utilizando los valores de ratio para los conectores clavos y tornillos. 65

1. INTRODUCCIÓN

La madera es uno de los materiales estructurales más antiguos utilizados por el ser humano y, en las últimas décadas, ha recobrado relevancia debido a su bajo impacto ambiental, su capacidad de almacenamiento de carbono y su eficiencia mecánica en comparación con otros materiales de construcción. En América Latina, y especialmente en los países tropicales, la disponibilidad de especies maderables con potencial estructural constituye una oportunidad para desarrollar modelos de construcción sostenible adaptados a las condiciones locales.

Sin embargo, el uso estructural de maderas tropicales enfrenta un desafío técnico: la mayoría de las normas de diseño y de cálculo estructural, como la NDS-24 (National Design Specification for Wood Construction) y la NSR-18 (Norma Sismo Resistente Colombiana), han sido elaboradas con base en especies de zonas templadas, con propiedades físicas y mecánicas diferentes. Esto limita la aplicación directa de los factores de diseño y de los modelos de comportamiento en especies tropicales como la Cedrelinga cateniformis (achapo), cuyo uso industrial se ha incrementado en la región amazónica y en los clústeres de transformación de madera de Bogotá-Cundinamarca.

El presente trabajo tiene como propósito evaluar el comportamiento estructural de uniones en madera de achapo mediante el análisis comparativo entre los resultados experimentales obtenidos en laboratorio y los valores teóricos calculados según las normas NDS-24 y NSR-18. Para ello, se diseñaron y ensayaron probetas ensambladas con conectores tipo clavo y tornillo, determinando sus cargas de fluencia, límites elásticos y factores de eficiencia estructural.

Este estudio aporta evidencia técnica sobre el desempeño de una especie tropical poco documentada en la literatura estructural, contribuyendo al conocimiento sobre la adaptabilidad de las normas internacionales al contexto tropical, y fortaleciendo las bases para una industria maderera sostenible y tecnológicamente competitiva en Colombia.

2. PROBLEMA DE INVESTIGACION

2.1 Planteamiento del problema

La madera ha sido utilizada a través de la historia en la construcción debido a su disponibilidad y propiedades mecánicas favorables. Sin embargo, la eficiencia y seguridad de las estructuras en madera dependen en gran medida del comportamiento de sus conexiones, especialmente cuando estas son sometidas a cargas (Ricardo, Sf). Las conexiones con clavos y tornillos son comunes en las construcciones en madera y su rendimiento bajo cargas laterales es crucial para la integridad estructural. Estudios han demostrado que la capacidad de carga y la rigidez de estas conexiones dependen de factores como el tipo de madera, la densidad, el diámetro de los conectores y la orientación de las fibras (Garzón, 2022).

En Colombia, la normativa de construcción en madera se basa en estándares internacionales tales como: “Norma de Diseño para la construcción en Madera” (NDS, por sus siglas en ingles) y la “Norma Colombiana de Construcción Sismorresistente” NSR-10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 1997). Estas normas proporcionan lineamientos para el diseño y construcción de estructuras de madera, pero están principalmente orientadas a especies de madera de uso común en mercados internacionales, como el Pino y Abeto (AWC, 2018).

Dada la falta de información nacional de la especie *Cedrelinga cateniformis* sobre sus propiedades físico-mecánicas y su comportamiento en uniones estructurales a partir de la evaluación de conectores en este caso clavos y tornillos; surge como una limitante en aplicaciones estructurales (Torres, Propiedades fisico mecanicas de la especie "Tornillo" Cedrelinga cateniformis Ducke proveniente de plantaciones en fajas del bosque nacional Alexander Von Humboldt-UCAYALI, 2010). La escasez de estudios como los realizados en Perú en los cuales se ha caracterizado las propiedades físico-mecánicas de esta especie y sugieren su aptitud para suso estructurales, nos motiva a diseñar y evaluar el comportamiento de dichas uniones a la luz de NRS-10 y NDS permitiendo probar la capacidad de la madera y las uniones para ser aplicados en diseños estructuras

2.2 Formulación del problema

¿Qué comportamiento presentan las conexiones madera a madera de *Cedrelinga cateniformis* Ducke utilizando clavos y tornillos sometidos a carga lateral y cómo puede adaptarse la metodología de la norma NDS y la NSR-10 a sus propiedades específicas?

2.3 Sistematización del problema

La especie *Cedrelinga cateniformis* Ducke, conocida comúnmente como Achapo, es de gran importancia en Colombia debido a su distribución en regiones Amazónicas y su uso en la industria maderera. Esta especie se encuentra principalmente en departamentos como Putumayo, Caquetá, Guaviare y Amazonas, donde su aprovechamiento ha sido tradicionalmente orientado a la producción de madera aserrada para muebles, construcciones y carpintería en general (Lozano, Sf), Sin embargo, a pesar de su disponibilidad y calidad estructural, su aplicación en sistemas constructivos sigue siendo limitada debido a la falta de estudios específicos sobre su comportamiento mecánico en conexiones estructurales (Bellido, 2003).

En Colombia, la normativa NSR-10 regula el diseño uso de materias en construcción, pero su aplicación en madera se ha desarrollado principalmente con especies comerciales como *Pinus patula* y *Eucalyptus grandis.* De acuerdo a (Torres, Propiedades fisico mecanicas de la especie "Tornillo" Cedrelinga cateniformis Ducke proveniente de plantaciones en fajas del bosque nacional Alexander Von Humboldt-UCAYALI, 2010) en contraste, la NDS presenta metodologías más avanzadas para evaluar y diseñar estructuras en madera, incluyendo conexiones sometidas a carga lateral. Sin embargo, la aplicabilidad de estas normativas en especies tropicales como Achapo no ha sido estudiada, lo que representa un obstáculo para su uso en la ingeniería estructural.

3. JUSTIFICACIÓN

El creciente interés por el uso de la madera en la construcción responde tanto a la necesidad de materiales sostenibles como a la búsqueda de soluciones con menor huella de carbono frente a alternativas tradicionales como el concreto o el acero (Rosemarie Garay-Moena, 2022). En este escenario, la especie amazónica Cedrelinga cateniformis (Achapo) se presenta como una alternativa estratégica debido a sus propiedades físico-mecánicas, su amplia distribución en la Amazonia Colombiana y su potencial para el desarrollo de cadenas de valor forestal sostenible (SINCHI, 2022).

La especie *Cedrelinga cateniformis*; Achapo en América Latina es de gran importancia no solo por sus atributos ecológicos y económicos; sino también por su ubicación especialmente porque se encuentra en la región Amazónica del país, en zonas tropicales húmedas. Su explotación a través de la historia ha sido controlada bajo métodos de conservación. A pesar de ser una especie de crecimiento rápido, son resistencia mecánica alta, alta durabilidad y versatilidad; lo que la convierte en un recurso valioso para la industria forestal de manera específica en la ingeniería de estructuras, no se ha sabido potenciar sus características para otros usos.

En este caso al tratarse de especies forestales nativas en el diseño de estructuras requiere de estudios específicos lo que permite su inclusión dentro de las normativas estructurales nacionales e internacionales (Fundacion Natura, 2023). Uno de los principales retos en la ingeniera de la madera es la caracterización del comportamiento de las uniones sometidas a carga lateral, dado que estas determinan la capacidad de una estructura para resistir eventos dinámicos como sismos y cargas de vientos (M, 2013). No obstante, la falta de datos sobre el comportamiento de especies nativas en sistemas estructurales limita su implementación en proyectos de sostenibilidad ambiental.

A pesar de dichas limitaciones las estructuras en madera a nivel nacional e internacional han tenido un aumento de 15% en la última década, impulsada por su durabilidad y resistencia. En Colombia, la industria forestal depende en gran medida de especies tradicionales, mientras que el Achapo sigue subutilizado en el sector estructural (Fedemaderas, 2021). En países como Brasil y Perú, la especie ha

sido usada en puentes y edificaciones rurales, sin embargo, estas no han sido respaldadas a través de normativas de resistencia estructural.

La caracterización de la resistencia y rigidez de uniones con conectores metálicos en Achapo, bajo metodologías estandarizadas como la ASTM D1761 para resistencia lateral, es fundamental para adaptar los procedimientos de diseño de normas internacionales como la National Design Specification for Wood Construction (NDS-18); al contexto colombiano. Este proceso no solo permitirá evaluar la aplicabilidad de los modelos de fluencia y de carga-desplazamiento en esta especie, sino que también proporcionará bases técnicas sólidas para sustentar la actualización de la NSR-10, generando mayor seguridad y confiabilidad en los proyectos de construcción con madera.

El presente estudio, fortalece la investigación en maderas tropicales amazónicas a partir de resultados experimentales inéditos sobre Cedrelinga cateniformis y por otro contribuye a los esfuerzos de consolidación de un sector forestal sostenible, en el que el comportamiento técnico impulse el uso de especies nativas, reduzca la presión sobre especies tradicionales y promueva el desarrollo económico local mediante la diversificación de materias primas forestales.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento estructural de las conexiones de la especie Achapo (*Cedrelinga cateniformis* Ducke), utilizando clavos y tornillos comparándolo con los valores establecidos en la NDS y NSR-10, con el propósito de aportar al conocimiento del recurso forestal Amazónico y promover alternativas para uso sostenible, con especial interés en la aplicación estructural.

4.3 Objetivos Específicos

Diseñar uniones en madera utilizado los conectores propuestos (clavos y tornillos) a partir de una carga de referencia definida, considerando las propiedades específicas de la madera de *Cedrelinga cateniformis* y las condiciones de uso en el contexto colombiano.

Determinar los valores de resistencia mecánica de las conexiones propuestas a través de un proceso sistémico de ensayos en laboratorio, para evaluar el comportamiento estructural de las uniones bajo diferentes condiciones de carga.

Comparar los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio con los valores establecidos en la NSR-10 y NDS, con la finalidad de bridar información a los modelos de diseño de conexiones de madera.

5. ANTECEDENTES

La madera es, por excelencia, el material utilizado en construcción desde tiempos inmemoriales. Por su naturaleza de esbeltez y resistencia ha sido la estructura portante principal de gran cantidad de edificaciones, así como en muchas ocasiones, material base de formación de paramentos. Su carácter de fácil transformación y cualidades indudables para la resistencia

De acuerdo con (SINCHI, 2025) la especie Cedrelinga cateniformis es una especie Amazónica de gran porte, distribuida desde el sur de Colombia, Venezuela, Bolivia y Brasil; ampliamente registrada en la Amazonia Colombiana por el Instituto SINCHI en las que sus fichas técnicas documentan la ecología, distribución y usos en carpintería y construcción ligera, siendo vista como un recurso maderable relevante para la región. Esta especie se encuentra distribuida en Colombia en las regiones de Vaupes, Putumayo, Caqueta y otras áreas de la Orinoquia y Amazonia. Es por ello por lo que la investigación sobre maderas tropicales ha cobrado relevancia en América Latina en las últimas décadas, impulsada por el interés en diversificar el uso de especies nativas en la construcción y reducir la dependencia de materiales importados o de especies templadas. En este contexto, la especie *Cedrelinga cateniformis* Ducke ha sido objeto de diversos estudios en Perú, Brasil y Colombia, que destacan tanto sus propiedades físico y mecánicas como su potencial de aprovechamiento sostenible.

Desde el punto de vista tecnológico algunos estudios de maderas tropicales en Colombia y Latinoamérica; se describe las propiedades físicas y mecánicas de la especie Cedrelinga cateniformis. De acuerdo a (Minambiente, 2020) se trata de una madera de densidad media, con valores en el rango de 0,68-0,71 g/cm^3 esta característica la ubica en un grupo de especies con buena relación entre peso y resistencia, lo que se traduce en un material suficientemente liviano para el manejo y al mismo tiempo, con una capacidad portante competitiva frente a otras especies tropicales y templadas.

En cuanto a su comportamiento mecánico, los registros técnicos reportan módulos de elasticidad (MOE) superiores a los 12.000 MPa y módulos de ruptura (MOR) que alcanzan valores entre 70 y 90 MPa, lo cual refleja una resistencia adecuada a la flexión estática. Así mismo, se han documentado valores de compresión paralela a la fibra superiores a 40 MPa, y resistencias en corte paralelo cercanas a

7-8 MPa, indicadores que confirman la capacidad de las especies para soportar solicitaciones en aplicaciones estructurales (ITTO, Sf).

Mas allá de la caracterización básica, investigaciones recientes han estudiado la influencia del contenido de humedad desde condición verde hasta niveles del 12%, la resistencia en compresión paralela, corte y flexión puede incrementarse hasta en un 30% (Torres, Propiedades fisico mecanicas de la especie "Tornillo" Cedrelinga cateniformis Ducke, proveniente de plantaciones en fajas del bosque nacional Alexander Von Humboldt-UCAYALI, 2010), evidenciando la importancia del control higroscópico en el comportamiento estructural evidenciando la importancia del control higroscópico en el comportamiento estructural del achapo.

Para el desarrollo normativo de la construcción en madera en Colombia, regido por la NSR-10 en su título G ha incorporado procedimientos basados en la NDS de estados unidos. No obstante, dichas normativas han sido diseñadas principalmente para especies templadas como *Pinus* y *Abies*, lo que genera un vacío de información aplicable a especies tropicales como Cedrelinga cateniformis. esta brecha normativa ha sido identificada como una de las principales limitaciones para el uso estructural de maderas amazónicas en el contexto colombiano.

Las conexiones en estructura de madera desempeñan un papel crucial en la estabilidad y resistencia de la construcción. Los conectores utilizados en uniones incluyen pernos, clavos, tornillos y placas metálicas, cada uno con propiedades mecánicas distintas que afectan la capacidad, distribuyendo las cargas a lo largo de la unión. Su comportamiento está regido por la flexión del conector y la resistencia de la madera a cortante (Perez, 1979) Los clavos por otro lado, ofrecen una solución más rápida y económica, aunque con menor resistencia comparada con los pernos

Las conexiones en estructuras de madera pueden realizarse mediante clavijas, pernos, adhesivos o ensamblajes tradicionales. Estas dependen de la rigidez del conector y de la resistencia al aplastamiento de la madera (Green, 1999). En estudios recientes, se ha demostrado que el uso de pernos y clavos en maderas tropicales puede mejorar significativamente la capacidad de carga y la ductilidad de la conexión (Perez, 1979).

El desempeño de las uniones en madera es un tema ampliamente documentado en la literatura internacional, dado que estas constituyen los puntos críticos de las estructuras, donde se concentran esfuerzos y se definen la rigidez y la ductilidad. Algunos trabajos muestran que la capacidad de carga lateral depende principalmente de la densidad de la madera y de los modos de falla de los conectores, los cuales combinan deformación plástica en el metal y aplastamiento en la madera (Forest Products Laboratory, 2010).

Para las especies tropicales, investigaciones realizadas en Sudamérica han demostrado que maderas de densidad media y alta presentan un aumento de la capacidad lateral en uniones atornilladas respecto a especies templadas, aunque con una menor ductilidad en algunos casos. Sin embargo, aún no se dispone de estudios publicados que documenten este comportamiento en Cedrelinga cateniformis, lo cual constituye un vacío de conocimiento crítico (Minambiente, 2022).

La información compilada en estos catálogos constituye, por tanto, una base empírica y referencial para avanzar hacia la caracterización experimental de sus propiedades en conexiones mecánicas. Dicho proceso resulta indispensable para consolidar el Achapo como alternativa a especies tradicionales de mayor presión comercial, como el Pino y el Eucalipto, y para fundamentar su incorporación en el diseño estructural colombiano con parámetros específicos y verificables.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1 Normatividad aplicable al diseño

Las normas técnicas que regulan el diseño estructural en madera y la construcción sismo-resistente son pilares para asegurar seguridad, durabilidad y cumplimiento legal en obras. En este caso la NDS es una especificación técnica especializada para materiales y métodos de diseño en madera desarrollada por la industria y reconocida por ANSI; por otra parte, la NSR-10 es un reglamento nacional colombiano orientado a la resistencia sísmica y las exigencias minimas de diseño para todo tipo de materiales y sistemas estructurales empleables en Colombia (ANSI, 2024). A través del estudio de estas normas se tomará como base los valores de diseño en su capítulo acerca de conexiones (perforación, anclaje) cortante, flexión, comprensión, tensión, así como factores de ajuste por duración de carga, humedad, tamaño y repetitividad (ANSI, 2015).

La NSR-10 es el reglamento colombiano de construcción sismo resistente expedido por decreto 926 de 2010 a través de la actualización del reglamento anterior NSR-98. Este tiene el propósito de establecer requisitos técnicos mínimos para construcciones sismo-resistentes en Colombia y obliga el cumplimiento para permisos de obra y diseño estructural en el país (Departamento administrativo de la funcion publica, 2010). En específico se desarrollará en su título G; en el cual se especifican los requerimientos para estructuras en madera y en guadua; en esta se regulan los criterios específicos para el diseño y uso de madera detalle de exigencias para los elementos estructurales de madera (SIS, 2010)

El presente trabajo se analiza a la luz de la Norma Sismo Resistente Colombiana (NSR-10) puesto que esta nos da a conocer las especificaciones para los cálculos de diseño y proceso constructivo de conexiones mecánicas, focalizándola en los conectores, para este caso clavos y tornillos. No obstante, se contrastará con las especificaciones Nacionales de Diseño (NDS-18) en su apartado denominado "*conexiones mecánicas*" y "*conectores tipo pasador*".

6.2 Tipo de conexiones

Las conexiones son elementos que se interceptan en un nodo con el fin de trasmitir esfuerzos entre sí, apegándose a las condiciones del modelo ideal de la estructuración, las conexiones pueden ser unidas mediante tornillos y clavos de alta resistencia (Chazaro, Tipos de conexiones para estructuras de acero, 2021).

Existen diferentes criterios para definir el tipo de unión estructural a emplear; principalmente se dividen en dos grandes grupos, en función del elemento utilizado en la unión. Las uniones simples y las uniones mecanizadas. En el desarrollo de este proyecto nos focalizaremos hacia las uniones mecánicas; que son aquellas donde se emplean elementos denominados herrajes para el acople de diferentes piezas de la estructura que les permite transmitir esfuerzos (Moreno, 2021).

Los medios de fijación mecánicos son usados en uniones madera a madera, este se caracteriza por su sencillez de colocación, rapidez y limpieza. Esta no altera intrínsecamente la cualidad de los componentes que unen. Los principales son el clavado, grapado y el atornillado; estas primero resisten tracciones por rozamiento, en el que se introducen una lámina en espiral que transforma la tracción en compresión sobre la base. Las conexiones absorben además las tolerancia, errores y deformaciones diferenciales de las piezas que unen. Dichas uniones cuantos menores sean y más separadas responden mejor a las exigencias mecánicas puesto que la adherencia está en función de la superficie de contacto (Peraza, 1995). Finalmente, los tipos de uniones se dividen de acuerdo con el material de conexión. En específico las uniones clavadas usadas en el desarrollo de este proyecto se usan para esfuerzos muy bajos entre elementos de madera aserrada y guadua, este tipo de unión debe realizarse para la unión de dos o más elementos, ya que la penetración y el impacto de los clavos produce fisuración.

6.3 Diseño de conexiones

Uno de los aspectos más importantes en el diseño de estructuras es la elección adecuada de las diversas conexiones para dar estabilidad a dichas estructuras. La conexión de elementos estructurales depende de muchos factores, tales como: criterio, forma y tamaño de las piezas a conectar, la magnitud y distribución de los esfuerzos actuantes en los elementos estructurales afectando, tipo de unión y

características físicas y mecánicas del material de los miembros estructurales (Chazaro, Diseño de conexiones, Sf).

En el diseño de conexiones de madera, se utiliza el esfuerzo de aplastamiento entre el conector, estos dos parámetros y la geometría de la conexión, se puede calcular los distintos modos de falla para carga lateral cortante. En la NDS-24, se identifican ecuaciones empíricas para el cálculo de F, si no se determina experimentalmente.

En las estructuras de madera, las propiedades de deformación de las conexiones desempeñan un papel fundamental, en ellas depende tanto la estabilidad de la estructura como la adecuada distribución de los esfuerzos internos. El comportamiento mecánico de una conexión se caracteriza principalmente por su relación carga- desplazamiento, la cual presenta un comportamiento no lineal. Esta relación describe como varia la carga transmitida por la conexión en función del desplazamiento relativo que se produce entre los elementos ensamblados, reflejando así su rigidez, ductilidad y capacidad de disposición de energía.

De acuerdo con la norma NSR existen dos tipos de conexiones de cizallamiento; simple (a) con un miembro principal y un miembro secundario y doble (b); con un miembro principal y dos secundarios:

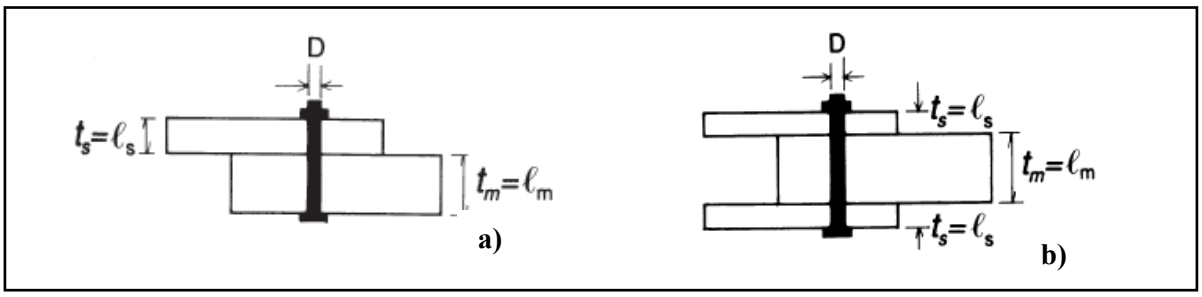


Figura 1. Conexión pernada simple cizallamiento (a) y doble cizallamiento (b). Adaptado de NDS-2018

La determinación de las cargas admisibles en conexión de cizallamiento simple, es necesario conocer las dimensiones del conector en milímetros (mm), junto con la densidad básica de la madera.

6.4 Comportamiento estructural de las conexiones en la madera

El comportamiento de los elementos de conexión incrementa la capacidad portante y maximiza la disipación de energía. Los criterios de diseño consideran dos posibles modos de rotura de la conexión, estando uno caracterizado por el aplastamiento de la madera y el otro por la flexión del elemento de fijación (J.C, 2014). Las conexiones de madera mecánicamente se han estudiado ampliamente en la literatura, la mayoría de las conexiones en forma de punta, como tornillos o clavos, son rápidas y no requieren de un equipo de instalación sofisticado. La ductilidad y la capacidad de disipar energía, cruciales en el diseño sísmico, es una de las ventajas de las conexiones con clavos y tornillos.

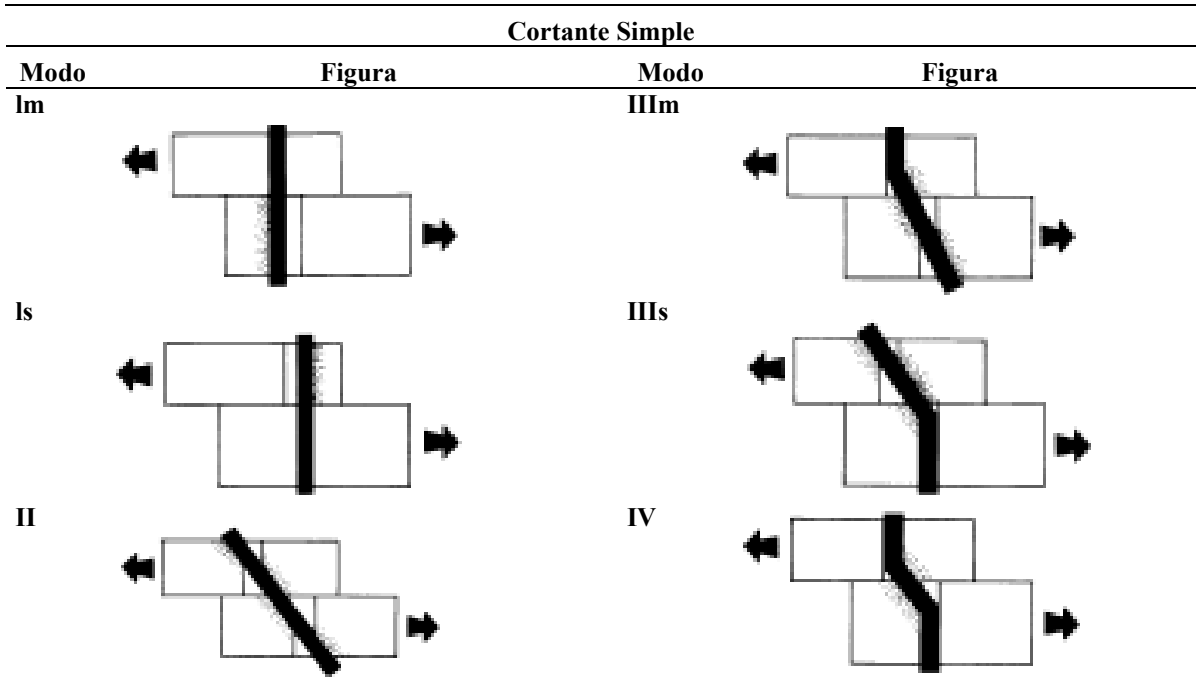


Figura 2. Modos de fluencia en conexiones clavadas y atornilladas sometidas a cortante simple. Adaptado de AWC-NDS-2018

El comportamiento de todos los tipos de uniones de madera exhibe una parte de deslizamiento inicial, seguida de un comportamiento lineal para deslizamiento relativamente pequeños, pero la rigidez de la conexión disminuye a medida que aumenta la carga y el comportamiento global en todo el rango de carga es no lineal. Los principales modos de fallas se dan principalmente por fracturas y rupturas de los elementos de acero (Bruzzone, 2025).

Para determinar la resistencia al corte en cada modo de falla, se debe calcular el valor de Z aplicando las ecuaciones establecidas en las tablas 1 y 2; según corresponda a la configuración de la conexión. El valor más bajo obtenido entre los modos de falla se considera como la capacidad resistente de la conexión. Cada modo de falla posee una ecuación especifica, la cual varía dependiendo del tipo de conexión; aplicado a la presente investigación nos enfocamos a conexiones sencillas aplicadas para los conectores usados (clavos y tornillos) (AWC-NDS, 2018).

MODO DE FALLA	ECUACIÓN
IM	$Z = \frac{DI_m F_{em}}{R_d}$
IS	$Z = \frac{2DI_s F_{es}}{R_d}$
II	$Z = \frac{k_1 Dl_s F_{em}}{R_d}$
IIIM	$Z = \frac{k_2 Dl_m F_{em}}{(1+R_e)R_d}$
IIIS	$Z = \frac{k_3 Dl_s F_{em}}{(2+R_e)R_d}$
IV	$Z = \frac{D^2}{R_d}\sqrt{\frac{2F_{em}F_{yb}}{3(1+R_e)}}$

Tabla 1Ecuaciones modos de falla para conexiones de simple cizallamiento. Adaptado de (AWC-NDS, 2018)

K	ECUACIÓN
K_1	$\sqrt{\frac{R_e 2R_e^2(1+R_t+R_t^2)+R_t^2R_e^3-R_e(1+R_t)}{(1+R_e)}}$
K_2	$-1+\sqrt{2(1+R_e)\frac{2F_{yb}(1+2R_e)D^2}{3f_{emlm}^2}}$
K_3	$-1+\sqrt{\frac{2(1+R_e)}{R_e}+\frac{2F_{yb}(2+R_e)D^2}{3F_{emlm}^2}}$

Tabla 2. Ecuaciones factor K. Adaptado de (AWC-NDS, 2018)

Adicionalmente, el valor de Z obtenido debe ajustarse considerando los factores que influyen en la capacidad resistente de la conexión, dando como resultado el valor de Z; corresponde al valor de diseño lateral de referencia ajustado. Dicho valor depende directamente del tipo y configuración de la conexión utilizada.

$$Z' = Z * C_D * C_M * C_t * C_g * C_\Delta * C_{eg} * C_{di} * C_{tn}$$

Donde:
C_D=Coeficiente de modificación por duración de la carga
C_M=Coeficiente de modificación por contenido de humedad
C_t=Coeficiente de modificación por factor de temperatura
C_g=Coeficiente de modificación por acción de grupo
C_Δ=Coeficiente de modificación por geometría
C_{eg}=Coeficiente de modificación por factor de fibra final
C_{di}=Coeficiente de modificación por diafragma
C_{tn}=Coeficiente de modificación por factor Toe-Nail

6.5 Propiedades estructurales de la madera

Las propiedades mecánicas son características importantes pues determina la resistencia que tendrá la madera en aplicaciones donde está sometida a cargo a altos esfuerzos. Las propiedades mecánicas, son aquellas propiedades que permiten diseñar estructuralmente un producto en madera (ONF, s.f.).

La madera es un material natural con características particulares que la diferencian de la mayoría de los materiales utilizados en construcción. Su comportamiento estructural esta influenciado por factores intrínsecos, como la orientación de las fibras y su naturaleza anisotrópica, los cuales determinan en gran medida sus propiedades mecánicas. En consecuencia, tanto la resistencia como el modulo de elasticidad son considerablemente mayores en la dirección paralela a las fibras que en la dirección perpendicular a ellas (Mecanica, Sf).

Algunas características básicas de los cuerpos de madera y la reacción cuando son sometidos a la acción de cargas externas se deben a:

- Densidad: todas las propiedades mecánicas de las maderas están estrechamente vinculados a esta propiedad el cual varía de acuerdo con el estado de la madera; seca el valor de densidad es mínimo y el máximo cuando se encuentra saturada.
- Límite de elasticidad: las maderas poseen comportamiento elástico en un cierto rango de carga aplicada, el cual oscila entre 0,5 y 07 de la correspondiente carga a rotura. A estos valores máximos del comportamiento elástico se los denomina "límite de elasticidad de la madera f_{we}y por debajo de ellos, las cargas producen deformaciones que son totalmente recuperables. En las maderas se pueden definir tres modulos de elasticidad diferentes, que corresponden a tres direcciones del tronco no coplanares; módulo de elasticidad longitudinal E_{wl}; modulo de elasticidad radial E_{wR} y modulo de elasticidad tangencial E_{wT}. Superando el límite de elasticidad, los cuerpos de madera comienzan a tener deformaciones irreversibles debido a que las fibrillas de celulosa de las paredes celulares comienzan a modificar su dirección tendiendo a ponerse paralelas al eje de crecimiento (Lima, La madera como material estructural certezas, conjeturas, incognitas y perspectivas, 2018)
- Grado de heterogeneidad: la relación entre la resistencia a esfuerzos normales de tracción o compresión según las fibras (resistencia longitudinal) y la perpendicular a esta (resistencia transversal) puede llegar a 20 o más según el tipo de madera de que se trate. Bajo una compresión perpendicular a las fibras, luego de deformaciones significativas, sigue resistiendo; denominado un comportamiento plástico.
- Corte: compresión perpendiculares a las fibras y efectos de deslizamiento relativo paralelos a ellas, estos son los hechos que define el valor de la resistencia a corte (Lima, La madera como material estructural certeza, conjeturas, incognitas y perspectivas, 2018)

6.6 Achapo Cedrelinga cateniformis Ducke

Actualmente se considera la especie forestal nativa más promisoria en la Amazonia, con características maderables valiosas. Se considera entre las cinco especies forestales más apreciadas por el

poblador Amazónico desde el punto de vista económico y comercialmente es una de las maderas más utilizadas. La madera es de densidad media ($0.46 {}^{g}/_{cm^3}$) esta es usada en estructuras, carpinteria, construcciones navales, carrocerías, muebeles, ebanistería, puntales y jugueteria (Mengual, s.f.). Es una de las especies forestales nativas más promisorias en la Amazonia Colombiana, es una especie forestal con caracteristicas maderables. Este tipo de madera cuando ha sido secado al aire es moderadamente rápido, esta tiende a torceduras y arquearse. Las propiedades físicas y mecánicas.

Propiedades fisicas	
Densidad Basica (gr/cm3)	0,45
Contraccion (%) Radial (verde al 12% CH)	4,27
Contraccion (%) Tangencial (verde al 12%CH)	6,9
Contraccion (%) Longitudinal (verde al 12% CH)	0,29
Contraccion (%) Volumetrica (verde al 12% CH)	10,7
Relacion T/R (verde al 12% CH)	1,62

Tabla 3 Propiedades fisicas de Cedrelinga cateniformis (Ducke) proveniente del bosque natura. Fuente (Arostegui, 1982)

Flexión estática (kg/cm2)	
ELP	349,00
MOR	576,00
MOE*1000	108,00
Compresión paralela (kg/cm2)	
ELP	222,00
RM	283,00
MOE*1000	0,00
Compresión perpendicular (kg/cm2)	
ELP	57,00
Cizallamiento (kg/cm2)	
Tangencial	81,00
Tenacidad (kg-m)	
Tangencial	3,00

Tabla 4 Propiedades mecánicas de Cedrelinga cateniformis (Ducke) de bosque natural. Fuente (Arostegui, 1982)

7. MATERIALES Y METODOS

7.1 Procedencia de materiales

7.1.1 Origen de la madera

La madera utilizada para la elaboración de las uniones corresponde a la especie Cedrelinga cateniformis Ducke, comúnmente conocida como “Achapo” (Minambiente, 2022). Esta especie es nativa de la Amazonia Colombiana y está presente en el departamento del Guaviare (Kew, 2023). En donde es usada comúnmente en construcción estructural, carpintería, ebanistería, moldaduras y otros elementos donde es usada por su, trabajabilidad y moderada resistencia (Forestal Maderero, 2024).

En estudios forestales locales se reporta que su densidad básica fluctúa entre aproximadamente 0.37 y 0.47 $^{g}/_{cm^3}$ (Minambiente, 2022).

El material que se utilizo fue extraído en forma de tablas en una zona forestal autorizada del departamento del Guaviare, con trazabilidad mediante las guías de movilización correspondientes (Minambiente, 2022). Las piezas se trasladaron en el año 2025 a la carpintería de la Universidad Distrital Francisco José de Calda, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, sede vivero. Allí permanecieron bajo condiciones de secado natural al aire (bajo cubierta) entre la semana del 13 de abril y 24 de mayo del presente año, hasta alcanzar un contenido de humedad de equilibrio apropiado para su mecanizado. Llegado al punto de estabilidad de humedad se seleccionaron las tablas para la fabricación de las probetas del estudio.



Figura 3. Montaje de madera Cedrelinga cateniformis en secado. Fuente (Propia)

7.1.2 Conectores

Los conectores empleados en las uniones corresponden a clavos y tonillos suministrados por la empresa Rothoblaas (Figura 4). Los clavos utilizados son del tipo adherencia mejorada, con un diámetro de 4mm y una longitud de 40mm, mientras que los tornillos son de cabeza avellanadas, con un diámetro de 6 mm y una longitud de 80mm. Ambos elementos están fabricados en acero al carbón electro galvanizado, garantizando una adecuada resistencia a la corrosión y un buen desempeño mecánico en aplicaciones estructurales (Rothoblaas, 2023).

Tanto los clavos como los tornillos cuentan con Evaluaciones Técnicas Europeas (ETA) que certifican su calidad y conformidad con los estándares internacionales de diseño estructural. Los clavos poseen la ETA-22-0002 y los tornillos la ETA-11-0030, otorgadas por la European Organisation for Technical Assessment (EOTA), lo que respalda su idoneidad para el uso en uniones de madera sometidas a cargas estructurales (Rothoblaas, 2023).

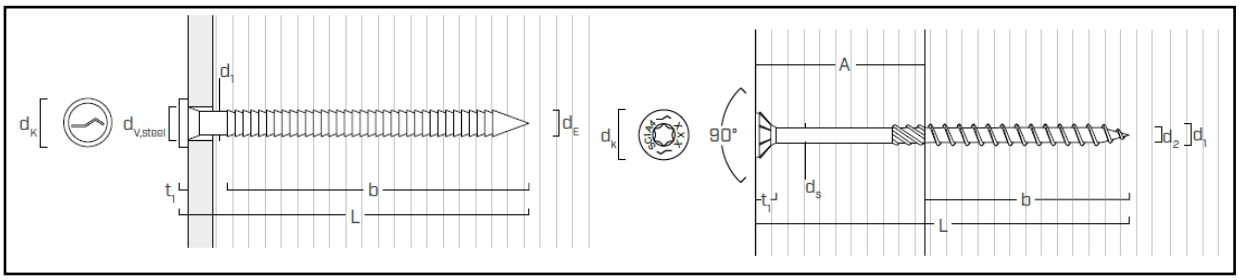


*Figura 4. Geometría y características mecánicas de los conectores; Izq. Clavo 4*40; Der. Tornillo 8*100. Adaptado de (Rothoblaas, 2023)*

		Medida	
Conector	**Código**	**Diámetro (mm)**	**Largo (mm)**
Clavos	LBA-440	4	40
Tornillos	HBS-8100	8	100

Tabla 5 Dimensiones y características de conectore. Adaptado de (Rothoblaas, 2023)

7.2 Seguimiento y medición del contenido de humedad

Se realizo el seguimiento del contenido de humedad durante un periodo de cuatro semanas, comprendido entre el 13 de marzo y el 03 de abril de 2025, sobre un total de 60 muestras totales. Cada pieza fue marcada con un código y seccionada con tres líneas con el fin de registrar la humedad en estas secciones. Dichas mediciones fueron tomadas con el higrómetro de contacto Merlin HM8-WS25 como se evidencia en la figura 6.

El registro de la humedad se realizó con el fin de observar el secado en condiciones ambiente hasta que descendiera a 20% o menos.



Figura 5. Seguimiento y medición del contenido de humedad. Fuente (Propia)

7.3 Dimensionamiento de probetas para armado

La madera utilizada se encontraba inicialmente en tablas de aproximadamente de 1,00mx 0, 45 m 0,85 cm. De acuerdo con los requerimientos establecidos para el diseño de las probetas y el armado y la configuración de las conexiones, se fabricaron piezas con dimensiones finales de 30,0 cm x8,0 cm x4,0 cm.

Inicialmente se cortaron las tablas en secciones de 30,0 cm; asignando un código posterior a la inicial. Posteriormente, las piezas fueron cepilladas superficialmente con el fin de identificar defectos visibles, como nudos, fisuras o irregularidades estructurales. Aquellas tablas que presentaron un estado desfavorable fueron descartadas para evitar fallas mecánicas o físicas durante los ensayos. Seguido se procedió al dimensionado del canto, realizando un corte longitudinal con sierra circular para ajustar el ancho final de 8,0 cm. Teniendo en cuenta las piezas que, tras el proceso de cepillado, resultaron con un espesor de aproximadamente 2,0 cm fueron unidas mediante encolado, aplicando entre 4 – 8 g de adhesivo tipo Carpincol, a una tasa de 200-400 $^{g}/_{m^2}$. El adhesivo fue distribuido uniformemente para luego ensamblar y prensar las piezas hasta alcanzar una unión firme y homogénea.

Una vez completado el secado del adhesivo, las piezas fueron sometidas a un último proceso de dimensionado en la sierra, garantizando las medidas finales requeridas de 30,0 x 8,0 x 4,0 cm.

Finalmente, el ensamble de las conexiones se realizó utilizando tres miembros de madera: dos elementos laterales y un miembro principal, todos elaborados con las dimensiones previamente especificadas. Este procedimiento permitió obtener probetas uniformes y estructuralmente estables para su posterior ensayo.

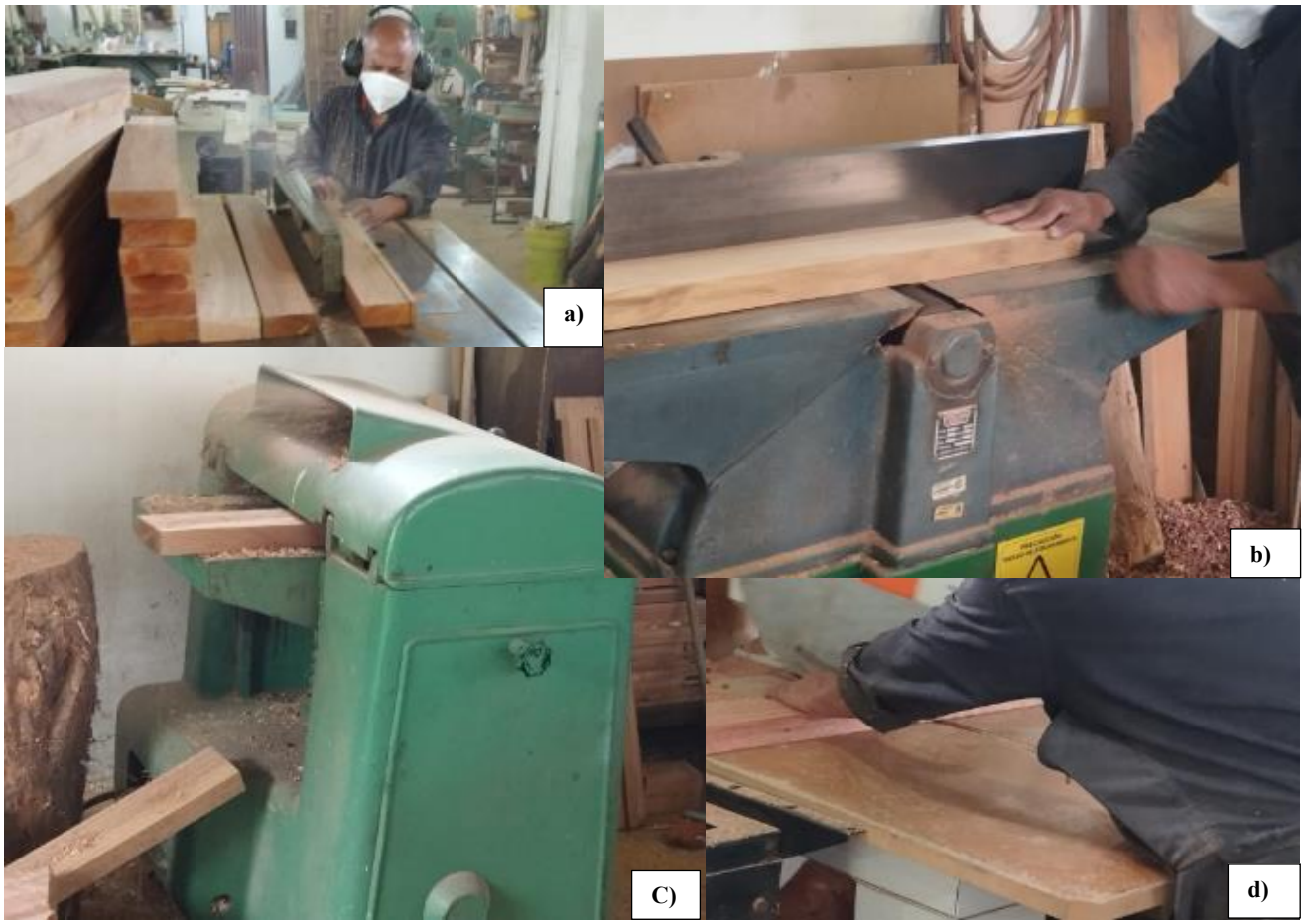


Figura 6. a) Dimensionamiento de probetas para armado Corte transversal en sierra circular, b) dimensionado con cepillo de espesor, c) cepillado de caras, d) alineado y escuadrado con cepillo superficie

7.4 Determinación de propiedades físicas

El estudio evaluó las propiedades físicas de a madera mediante 45 probetas de 2cm x 2 cm x 8 cm en tres tratamientos experimentales cada tratamiento conto con 15 probetas las cuales fueron:

a) Secado en horno a 103°C (estado anhidro)

b) Condición ambiente normal (referencia)

c) Inmersión en agua (saturación)

Las variables medidas fueron peso, humedad y espesor; registradas periódicamente con balanza analítica, higrómetro Merin HM8-WS25 y calibrador Pie de Rey. Posteriormente se invirtieron los tratamientos ($horno \leftrightarrow agua$) para determinar el punto de histéresis, es decir, la capacidad de la madera para recuperarse o perder humedad según el tratamiento. El seguimiento de dichas variables se realizó

entre el 29 de julio y el 21 de agosto mostro que hacia la semana del 4 de agosto los valores se estabilizaron.

Se obtuvo una densidad promedio de 0,53 $^{g}/_{cm^3}$, con un rango entre 0,31 y 0,69 $^{g}/_{cm^3}$, indicando alta variabilidad anatómica (vasos, fibras, prenquima). Los percentiles muestran que el 50% de las probetas se ubican entre 0,46-0,60 $^{g}/_{cm^3}$; cabe resaltar que estos valores coinciden con rep

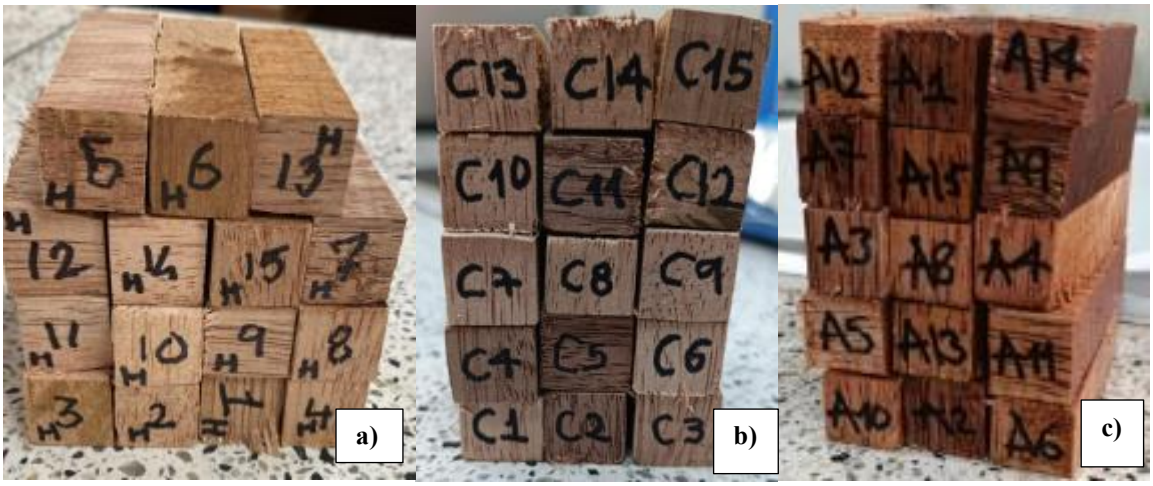


Figura 7. Desarrollo de procesos para el cálculo de densidad a través de las propiedades físicas. a) probetas en horno; b) probetas en condiciones ambiente; c) probetas sumergidas



Figura 8. Procesos para el cálculo de densidad a través de las propiedades físicas. a) probetas en horno; b) probetas en condiciones ambiente; c) probetas sumergidas

7.5 Cálculo de densidades

Con el fin de obtener probetas lo más homogéneas posibles en cuento a su densidad, se calcularon las densidades anhidras de todas las piezas de madera dimensionadas y se organizaron en grupos de tres con densidades iguales o lo más similares posibles. Para ello, inicialmente se tomaron las dimensiones de

espesor y ancho de tres puntos en cada una de las piezas con ayuda de un pie de rey. A su vez se midió el largo para ambas caras con un flexómetro Posteriormente a esto, se pesó cada probeta en la balanza de precisión. Así se obtuvo la densidad y el volumen para cada pieza

Para obtener el volumen se usó la siguiente ecuación:

$$V_{sa} = L * B * e$$

Donde:
V_{sa} : Volumen seco al aire expresado en cm^3
e: Espesor promedio en cm
B: Ancho promedio de cada pieza en cm
L: longitud promedio de cada pieza en cm

A través de la obtención del peso seco al aire de cada una de las probetas, que, junto con el resultado del volumen seco al aire, se logra calcular la densidad seca al aire a partir de la siguiente ecuación.

$$D_{sa=}\frac{\rho_{sa}}{V_{sa}}$$

Donde:
D_{sa} : Densidad seco al aire en $^{gr}/_{cm^3}$
P_{sa}: Peso seco al aire en gr
V_{sa}: Volumen seco al aire en cm^3

Obteniendo el peso seco al aire y el contenido de humedad, calcularemos el peso anhidro, como se describe en la siguiente ecuación.

$$P_0 = \frac{P_{sa}}{1 + \frac{CH}{100}}$$

Donde:
P_0 : Peso anhidro en gr
P_{sa}: Peso seco al aire en gr
CH: Contenido de humedad en %

Con el resultado del peso anhidro y del peso del agua, calculamos el volumen anhidro a través de la diferencia entre estos.

$$V_0 = V_{sa} - P_{H_2O}$$

Donde:
P_0 : Peso anhidro en gr

V_{sa}: Volumen seco al aire en gr
P_{H_2O}: Peso del agua en gr

Con los valores de peso y volumen anhidros determinados para cada pieza, se procede al cálculo de la densidad anhidra individual, para posteriormente obtener el promedio correspondiente a las tres probetas. Este valor promedio representa la densidad anhidra de referencia, necesaria para el cálculo de los modos de fluencia teóricos.

$$D_0 = \frac{P_0}{V_0}$$

Donde:
D_0 : Densidad anhidra en $^{gr}/_{cm^3}$
P_0: Peso anhidro en gr
V_0: Volumen anhidro en cm^3

Posteriormente, se determinó la densidad básica con el propósito de calcular los modos de fluencia teóricos correspondientes a cada tipo de unión. Finalmente, las piezas fueron clasificadas en orden creciente de densidad, seleccionándose de forma aleatoria y agrupándolo de a tres piezas, las cuales conforman las probetas.

7.6 Determinación del número de conectores por tratamiento

La determinación del número de conectores en cada tratamiento se realizó con base en los criterios de diseño de conexiones en madera establecidos por la NDS-24 y las disposiciones de la NSR-18 en su título G. El objetivo fue definir la cantidad de conectores necesaria para que la capacidad lateral total de la unión alcanzara o superara la carga de diseño aplicada, garantizando simultáneamente la seguridad estructural.

Main member		
Material	Wood	
Wood/Steel Type	ACHAPO	
G	0,53	(-)
Fe parallel	5161	(psi)
Fe Perpendicular	5161	(psi)

Side member		
Material	Wood	
Wood/Steel Type	Spruce-pine Fir	
G/Fe	0,53	(-)
Fe parallel	5161	(psi)
Fe Perpendicular	5161	(psi)
Fastener		
Fy	200000	(psi)

Tabla 6. Diseño experimental ya caracterización del número de conectores a partir de la descripción del material de acuerdo con la norma NDS-24. Adaptado de (AWC-NDS, 2018)

Para cada tipo de conector; clavos de 4x40 mm y tornillos de 8x100 mm, se calculó la resistencia lateral de referencia (Z), dicha resistencia depende de la densidad básica de la madera en este caso G=0.53, el diámetro del conector y el tipo de modo de falla. Posteriormente, se aplicaron los factores de ajuste C_D, C_M, C_T obteniendo asi la resistencia lateral de diseño (Z´) para cada uno de los conectores

Con los valores de Z´ se calculó el número teórico de conectores requeridos, el resultado se redondeó hacia el número entero superior para garantizar una capacidad total igual o superior. Así mismo, se verifico las condiciones geométricas mínimas establecidas por la NDS-24 y la NSE-18, asegurando que los espaciamientos entre conectores y la distancia a los bordes cumplieran las proporciones requeridas. Para las probetas con clavos (4x40 mm), se determinó que la configuración optima correspondía a 10clavos por cara, dispuestos en una sola fila con separación uniforme, cumpliendo con las condiciones de espaciamiento y borde.

Para las probetas con tornillos (8x100 mm), la capacidad individual de cada conector resulto significativamente mayor, por lo que fueron suficientes 3 tornillos por cara para satisfacer la carga de diseño y mantener la simetría del sistema.

Estas configuraciones finales fueron confirmadas mediante los resultados de las hojas de cálculo y se adaptaron como valores de diseño en los ensayos experimentales. En este sentido, el número de conectores definido no solo satisface los criterios de la NDS, sino también las condiciones prácticas y experimentales requeridas para garantizar la validez de los resultados.

Cavos (20x40x20) 4x40			Tornillo (40x40x40) 8x100		
Yield Modes, Z			Yield Modes, Z		
I_m	581,8427	(lbs)	I_m	736,0655	(lbs)
I_s	581,8427	(lbs)	I_s	1635,7010	(lbs)
II	120,5036	(lbs)	II	437,8421	(lbs)
III_m	781,2660	(lbs)	III_m	5904,9122	(lbs)
III_s	322,8372	(lbs)	III_s	941,5082	(lbs)
IV	418,2174	(lbs)	IV	1170,0789	(lbs)
ASD Capacity, Z'	121	(lbs)	ASD Capacity, Z'	438	(lbs)
	0,54	KN		1,9	
18,7	20	# de clavos	5,19	6	# De conectores
	10			3	

Tabla 7. Diseño experimental y caracterización de los modos de falla para el cálculo del número de conectores de acuerdo con la NDS-24. Adaptado de (AWC-NDS, 2018)

7.7 Diseño de configuración de conexiones

El diseño de las conexiones estructurales en madera constituye uno de los aspectos más críticos ya que este garantiza la resistencia y estabilidad de los sistemas de unión, ya que las conexiones son los puntos donde se encuentran los esfuerzos de corte, tracción y compresión entre los elementos. En esta investigación se emplearon configuraciones de conexión de un solo corte, de acuerdo con la clasificación establecida por la NDS-24, para evaluar el comportamiento de uniones realizadas con clavos y tornillos estructurales.

	DISTANCIA MÍNIMA	
ORIENTACIÓN	**CLAVOS**	**TORNILLOS**
Entre conectores	5D	5D
Entre filas	5D	5D
Al borde cargado	10D	10D
Al borde descargado	5D	5D
Al borde	2D	2D

Tabla 8. Espaciamiento mínimo adaptado de (AWC-NDS, 2018)

7.7.1 Configuración para clavos 4x40

El diseño analizado corresponde a una conexión madera- madera en la que el elemento principal; es decir el miembro que recibe la carga y el elemento secundario presentan espesores nominales de 40mm y 20mm respectivamente, unidas mediante un arreglo lineal de clavos de sección circular, diámetro nominal de 4mm y longitud 40mm. El montaje se diseñó como corte siempre, es decir, cada clavo está llamado a transferir la carga entre el miembro principal mediante esfuerzos de cortante en el vástago y esfuerzos de aplastamiento en la superficie de la fibra de la madera bajo la cabeza y el flanco del clavo

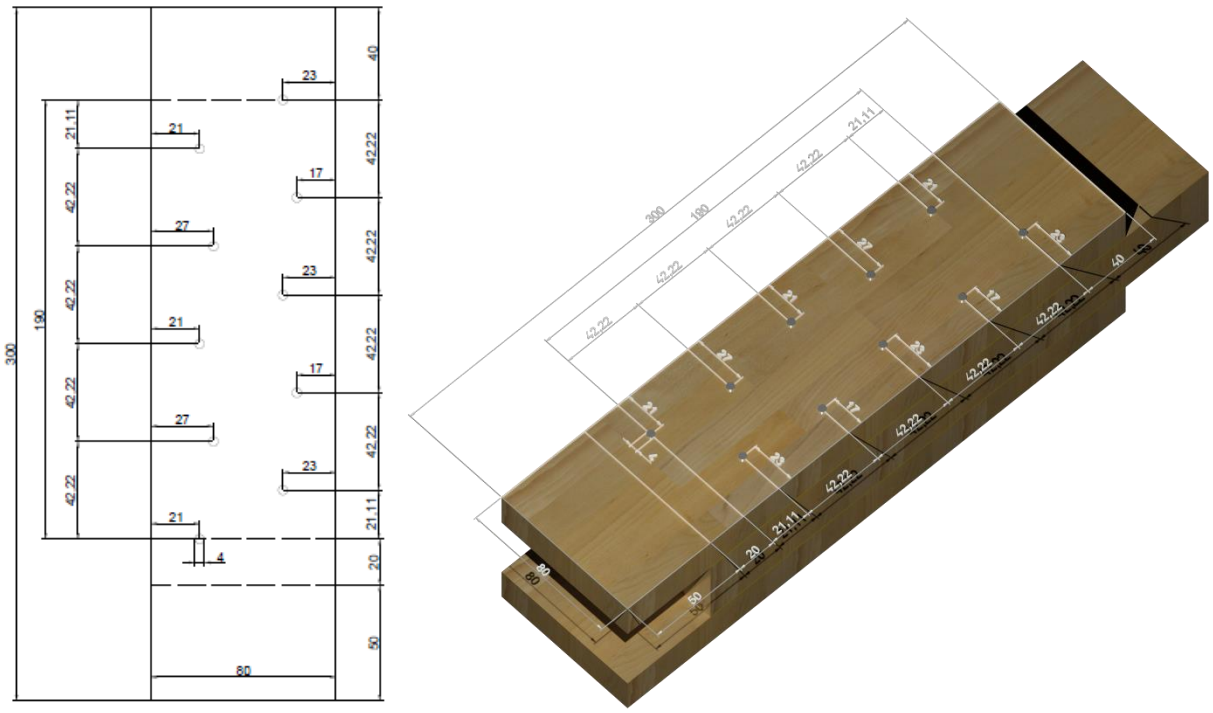


*Figura 9. Diseño de configuración para clavos en la configuración 20*40*20 y conector 4*40. Fuente (propia)*

7.7.2 Configuración para tornillos 8x100

Representa una conexión de tipo madera-madera reforzada, utilizando tornillos estructurales de 8mm de diámetro y 100 mm de longitud, en un sistema también de corte simple. El procedimiento de cálculo es análogo al caso de los clavos, pero incorpora las condiciones de resistencia de un conector roscado, con mayor capacidad de anclaje y menor holgura. El procedimiento de diseño sigue los parámetros descritos en la tabla 3.

Si bien el cálculo detallado de la resistencia se rige por la NDS-24, la NSR-10. En la cual se establece en su título G; que el diseño deberá considerar la capacidad de los elementos de unión y la integridad de los miembros conectados. Esta norma indica que los métodos de diseño deben seguir especificaciones internacionalmente reconocidas, tales como las normas de NDS, siempre que los valores de diseño utilizados correspondan a especies de madera caracterizadas y ensayadas en Colombia.

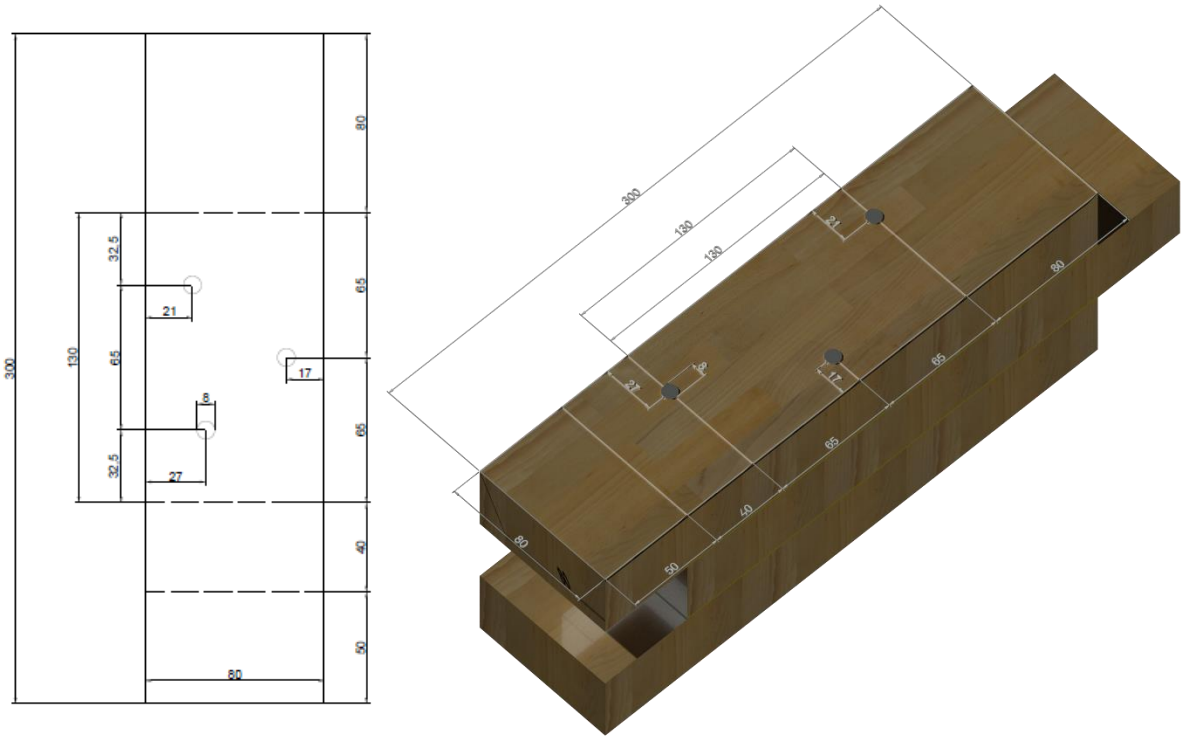


*Figura 10. Diseño de configuración para clavos en la configuración 40*40*40 y conector 8*100. Fuente (propia)*

Estas configuraciones deben comprender y controlar expresamente las siguientes variables geométricas y de proceso, ya que condicionan el comportamiento estructural de las uniones: Longitud de penetración efectiva (ℓ_e), relación diámetro/longitud (d/ℓ), espaciado entre conectores y distancia a borde y estado higrométrico y densidad de la madera.

7.8 Combinación de piezas y ensamble de probetas



Figura 11. Combinación de piezas y ensamble de piezas para pruebas de resistencia en donde: a) separación de piezas a partir de su densidad (de menor a mayor); b) combinación de piezas en pachas de densidad similar; c) pretaladrado de piezas en la matriz; d) ensamble de piezas. Fuente (Autora)

Cada probeta fue conformada por elementos de madera con espesores específicos de acuerdo con el tipo de conexión:

- Para la configuración 4x40mm, se utilizaron piezas de 20mm x 40 mm de espesor ensambladas en disposición madera a madera con clavos de 4mm x 40 mm.

- Para la configuración 8x100, se emplearon piezas de 40mm x 40 mm, unidas mediante tornillos estructurales de 8 mm x 100mm.

Las dimensiones fueron definidas para cumplir las proporciones geométricas establecidas por la norma NDS en la sección 12.4, la cual determina los espesores mínimos de los miembros conectados y las distancias de borde y espaciamiento entre conectores. Este control geométrico evita modos de falla prematuros como el aplastamiento local o la división de la madera (ANSI, 2024). Previo al ensamblaje, las superficies de contacto se pretaladraron siguiendo las recomendaciones de la norma, en la tabla 12.3.1, que sugieren un diámetro de orificio entre el 70% y 90% del diámetro nominal del conector, dependiendo del tipo de madera y contenido de humedad.

Para el inicio del ensamble de las probetas, se realizó primero la verificación de la densidad de las piezas de madera con el propósito de garantizar la mayor similitud posible entre ellas y evitar sesgos en el comportamiento mecánico durante el ensayo. Esta práctica asegura que las diferencias en resistencia o rigidez no sean atribuibles a variaciones del material, sino al tipo de conector y su disposición.

Posteriormente, se elaboró una plantilla guía con el diseño y ubicación exacta de los conectores, tanto para los clavos como para los tornillos, siguiendo las dimensiones establecidas en los planos de configuración de conexión

El proceso de perforación se apoyó en una matriz de posicionamiento, diseñada para mantener alineadas las tres piezas de madera durante el pretaladrado, evitando desplazamientos o desajustes en el arreglo. El pretaladrado se ejecutó hasta una profundidad equivalente al 80% de la longitud del conector, con el fin de reducir la resistencia a la inserción y prevenir fisuras longitudinales

En el caso de las piezas laterales, los orificios fueron avellanados durante el pretaladrado, procedimiento que cumple una función estructural importante; ya que este proceso distribuye uniformemente la presión ejercida por la cabeza del conector, evitando concentraciones de esfuerzo que podrían causar fisuras radiales o aplastamiento localizado en la superficie de la madera. Asimismo, el avellanado contribuye a mantener la capacidad de apriete a lo largo del tiempo, ya que la cabeza del tornillo se poya sobre una superficie firme y plana, conservando la presión de contacto.

Cada una de las piezas fue marcada e identificada antes del ensamble, para conservar el orden del diseño ye vitar errores de posición durante los movimientos en la matriz o el proceso de perforación. Esto también permitió garantizar la trazabilidad y coherencia en la organización de los ensambles, minimizando la perdida de material.

Finalmente, el ensamble de las probetas se llevó a cabo según el tipo de conector:

- Para las probetas configuradas con clavos de 4x40 mm, la inserción se realizó manual y controladamente mediante martillo, asegurando una penetración uniforme.
- En el caso de las probetas con tornillos de 8x100 mm, el montaje se ejecutó con taladro eléctrico a baja velocidad, manteniendo la alineación axial y evitando el sobrecalentamiento del conector, lo cual podría afectar el contacto con la madera.

7.9 Montaje y ensayo de probetas

7.9.1 Máquina de ensayos Universal MTS

El montaje y los ensayos de las probetas se realizaron en el laboratorio de estructuras ML-029 de la universidad de los Andes, empleando la Maquina de Ensayos Universal MTS, de procedencia estadounidense (*MTS Systems Corporation, Eden Prairie, Minnesota, USA*). Este equipo cuenta con una unidad de potencia hidráulica que alimenta tres actuadores de 50KN, 350 KN y 1000KN; respectivamente, cada uno con sensores individuales de carga, desplazamiento y deformación. El sistema opera bajo control digital mediante el software *Flex Test 60,* que permite programar ensayos en modo de carga o desplazamiento controlado, registrar datos en tiempo real y generar curvas esfuerzo- deformación de alta precisión (Universidad de los Andes, 2011).

7.9.2 Procedimiento de ensayo

Las pruebas se realizaron conforme a las especificaciones establecidas en la norma ASTM D1761-20, Standard Test Methods for Mechanical Fasteners in Wood, y en las disposiciones de la NDS-2024, capitulo 12, relacionadas con la evaluación del comportamiento de conexiones sometidas a carga lateral. Cada probeta fue colocada en el actuador correspondiente, asegurando la correcta alineación de los ejes de carga para evitar esfuerzos excéntricos. La aplicación de carga se realizó a una velocidad

constante de desplazamiento controlado 2,54 mm/s, con el objetivo de obtener una respuesta cuasi estática y poder registrar de manera continua la curva carga- deformación hasta la falla del conjunto.

Durante el ensayo, se registraron las siguientes variables:

- Carga aplicada (N): Obtenida mediante la celda de carga del actuador.
- Desplazamiento (mm): medido con los sensores de desplazamiento lineal (LCDT) integrados al sistema MTS
- Modo de falla: Documentado visualmente, identificando deformaciones, fisuras o desprendimientos en la zona de conexión.



Figura 12. Montaje y ensayo de probetas en donde: a) Maquina de Ensayos Universal MTS; b) software Flex Test 60, c) Unidad de potencia hidráulica. Fuente (Autora)

La configuración de montaje permitió reproducir las condiciones de carga lateral aplicada sobre las uniones madera-madera con clavos (4x40 mm) y tornillos (8x100mm), tal como se definió en los diseños experimentales. Una vez finalizado el ensayo, los datos fueron procesados utilizando el software

MTS Test Suite para la obtención de los valores de carga máxima, desplazamiento ultimo y módulo de rigidez. Estos parámetros fueron posteriormente comparados con los valores teóricos calculados según la NDS-2024, permitiendo validar experimentalmente las capacidades de diseño de las conexiones evaluadas.

7.10 Procesamiento y análisis de los resultados

El procesamiento y análisis de los datos registrados por el sistema digital de la máquina de ensayos Universal MTS, fueron exportados a formato numérico y tratados mediante hojas de cálculo, eliminando valores atípicos y organizando las series de carga- deformación para cada tipo de conector y tratamiento. Posteriormente, se determinaron los valores característicos de carga máxima, desplazamiento ultimo y rigidez, conforme a las recomendaciones de la norma ASTM D1761-20 y los criterios de la NDS-2024 para conexiones de carga lateral.

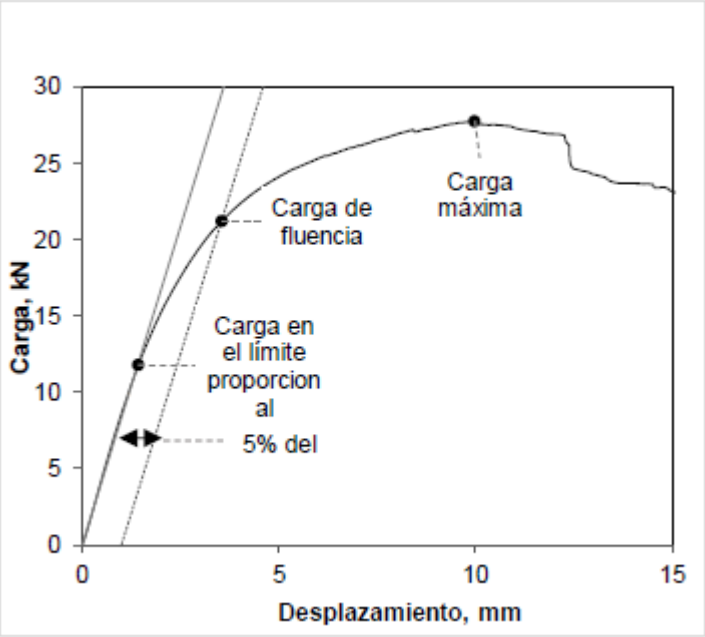


Figura 13. Grafica para interpretación de resultados de acuerdo con la norma ASTM D1761-20

El análisis considero tanto la respuesta individual de cada probeta como el comportamiento promedio de los grupos de ensayos, con el propósito de identificar tendencias, dispersión de resultados y

posibles diferencias asociadas al tipo de conector: clavos y tornillos. De igual forma, se efectuó la comparación entre los valores experimentales y los valores teóricos.

La interpretación de los resultados experimentales se basó en el análisis de las curvas carga-desplazamiento como se evidencia en la figura 15; obtenidas para cada probeta durante los ensayos de carga lateral. Este método permite identificar los puntos característicos del comportamiento estructural de la unión, tales como el límite proporcional, la carga de fluencia y la carga máxima; los cuales reflejan las etapas de respuesta elástica y de falla del sistema conector-madera.

8. RESULTADOS Y DISCUSION

8.2 Análisis del contenido de humedad

El comportamiento del contenido de humedad en las probetas de *Cedrelinga cateniformis* evidencio un proceso de secado característico de las maderas tropicales, en el cual la perdida de agua libre ocurre rápidamente en las primeras semanas y posteriormente se estabiliza al aproximarse al contenido de equilibrio higroscópico.

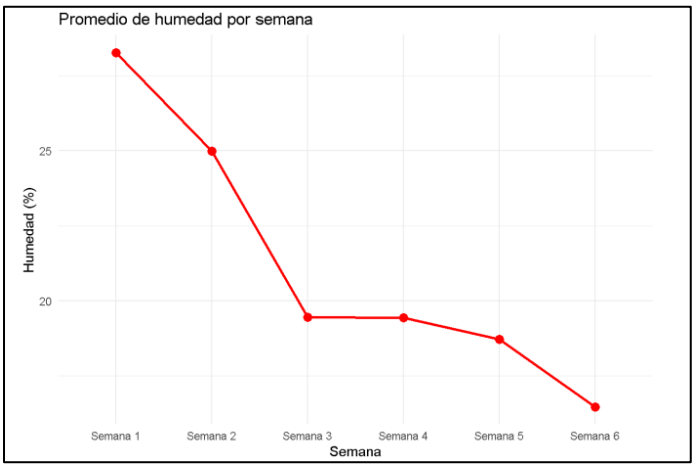


Figura 14. Evolución del promedio de humedad (%) registrado en 61 probetas durante 6 semanas consecutivas. Fuente (Autores)

La figura 16 muestra la evolución promedio del contenido de humedad (%) a lo largo de seis semanas de seguimiento. Los resultados registraron una disminución sostenida desde un valor promedio inicial de 28.27% en la semana 1 hasta 16.47% en la semana 6, lo que representa una reducción total de 41.7% respecto al valor inicial. Este patrón coincide con la curva típica de secado descrita para especies tropicales de poro abierto, donde el proceso es inicialmente rápido por la evacuación del agua libre y luego se ralentiza cuando la humedad interna se aproxima al punto de saturación de las fibras (laboratory, Forest Products, 2010).

Durante las semanas 1 a 3, la pendiente de descenso fue más pronunciada, indicando un secado activo favorecido por las condiciones ambientales (temperatura media de 22-24°C y baja humedad relativa). A partir de la semana 3, la curva tiende a estabilizarse, lo cual sugiere que las probetas

alcanzaron un estado próximo al equilibrio higroscópico (16% y 18%) reportados para maderas tropicales de densidad media como el achapo (G=053) (Natalia Perez, 2011)

La ligera variación evidenciada en la semana 4, donde algunas probetas incrementarían temporalmente su humedad, puede atribuirse a fluctuaciones en las condiciones de ventilación y precipitación durante ese periodo en el que los cambios de humedad ambiental influyen directamente en el contenido de humedad de equilibrio de la madera expuesta. Finalmente, en términos estadísticos, la reducción fue significativa ($(p < 0.05)$ según el análisis ANOVA confirmando que la perdida de humedad no fue producto del azar, sino de un proceso real de secado.

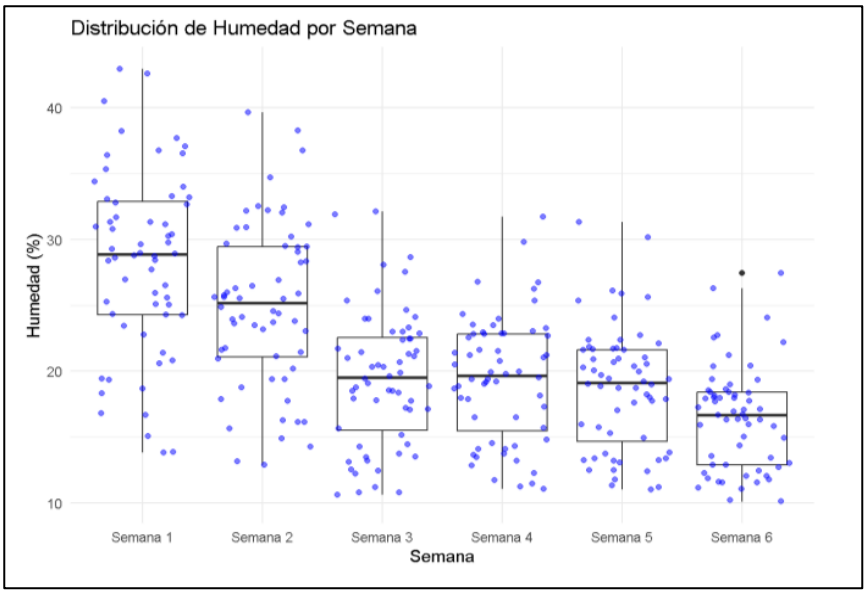


Figura 15. Gráfico boxplot por semana. Fuente (Autores)

La ilustración 17, presenta la distribución semanal del contenido de humedad (%) para las 61 probetas a lo largo de seis semanas. Por medio de este grafico se resume de forma compacta la tendencia central, la dispersión, simetría y la presencia de valores extremos en cada semana, que se describen a continuación:

La tendencia central del contenido de humedad disminuye semana a semana, confirmando la tendencia decreciente observada en la gráfica de promedios. La línea central dentro de cada caja muestra que el valor típico de humedad se reduce desde la semana 1 hasta la semana 6. Así mismo la rápida caída

de la mediana entre las semanas 1y 3 indica que más de la mitad de las muestras alcanzaron niveles cercanos al equilibrio en ese lapso.

La dispersión del 50% centrales. En el semanal es notablemente mayor, lo que implica heterogeneidad en las condiciones iniciales de las probetas. A partir de la semana 3 se reduce y se estabiliza, lo que indica una homogenización progresiva del contenido de humedad entre las probetas; la mayor parte de las muestras convergen hacia un mismo rango de humedad.

El rango efectivo de variación; en la semana 1 aparecen bigotes largos que denotan extremos superiores entre el 50%, mientras que en la semana 6 los bigotes son mucho más cortos, indicando la reducción de la variabilidad total. Esta disminución de rango total sugiere que las diferencias anatómicas iniciales sean por nudos, variaciones de densidad, grosor de piezas; tienen menor influencia una vez las probetas se acercan a su equilibrio higroscópico bajo las condiciones ambientales del ensayo.

Finalmente, la simetría y el sesgo, en la semana 1 y 2, las cajas tienden a mostrar sesgo positivo, coherente con la presencia de muestras muy húmedas. En las semanas finales la distribución tiende a ser más simétrica.

8.3 Propiedades físicas de la madera de Achapo; Cedrelinga cateniformis

El estudio de las propiedades físicas de la madera de Achao permite comprender su comportamiento higroscópico y dimensional frente a las variaciones de humedad, temperatura y procesos de secado. Estas propiedades, entre las cuales resaltamos la densidad, la contracción, la absorción y la relación entre contenido de humedad, masa y volumen.

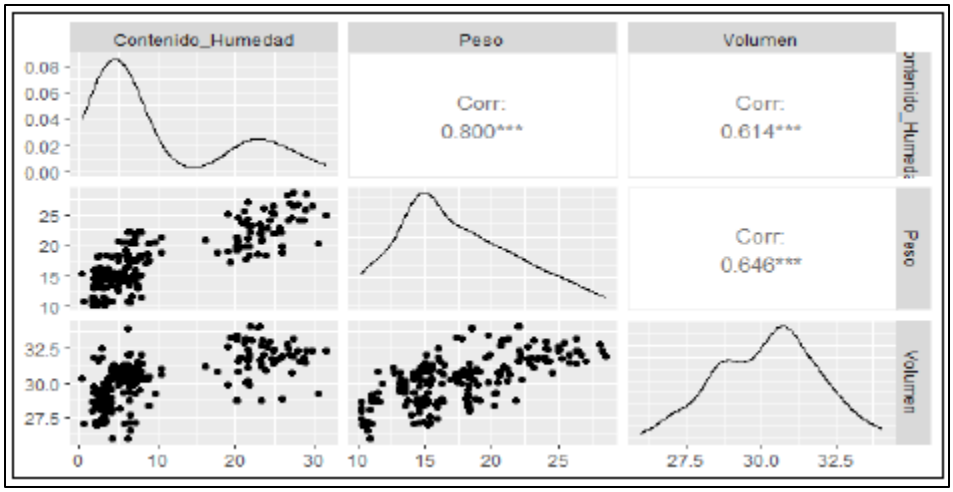


Figura 16. Correlaciones de las variabilidades analizadas. Fuente (Propia)

Las variables físicas analizadas a través de este grafico son: el contenido de humedad, peso y volumen. Este tipo de análisis permite visualizar simultáneamente las relaciones lineales y los niveles de asociación entre las propiedades físicas de la madera, revelando la coherencia interna del comportamiento higroscópico del material.

De la ilustración 18 los resultados mostraron una correlación positiva fuerte entre el contenido de humedad y el peso (r=0.800) y moderadas entre humedad-volumen (r=0.614) y peso volumen (r=0.646). estas asociaciones reflejan un patrón físico bien documentado en la literatura: la madera, al ser un material higroscópico, absorbe agua del ambiente o la libera en función de las condiciones de humedad relativa, provocando variaciones simultaneas en masa y dimensiones.

En la fase de absorción, hay expansión volumétrica, por lo tanto, el peso como el volumen se incrementan a medida que crece el contenido de humedad. En la fase de secado ocurre el proceso inverso; se libera el agua libre y parte del agua higroscópica reduciendo así la estructura celular y la masa.

La fuerte relación entre la humedad- peso (r=0.800) confirma que los cambios de masa son más sensibles a la humedad que los cambios de volumen, lo cual coincide con lo reportado por quienes señalan que la variación dimensional es menos pronunciada que la gravimétrica antes de alcanzar el punto de saturación de fibra (PSF ≈ 30%). Por encima de este punto, las variaciones de humedad afectan

inicialmente la masa, mientras que por debajo del PSF se inician los procesos de contracción o hinchamiento.

Finalmente, el análisis de correlación valida el carácter higroscópico del Achapo y demuestra su comportamiento coherente con el modelo físico de la madera: los cambios en humedad explican directamente las variaciones en masa y volumen.

Ahora bien, a partir de la ilustración 6, se muestra el comportamiento de contracción de las probetas durante el proceso de secado posterior a la inmersión en agua, en la cual se evidencia la pérdida progresiva de humedad y la consecuente reducción dimensional del material, proceso directamente relacionado con el carácter higroscópico y anatómico de la especie.

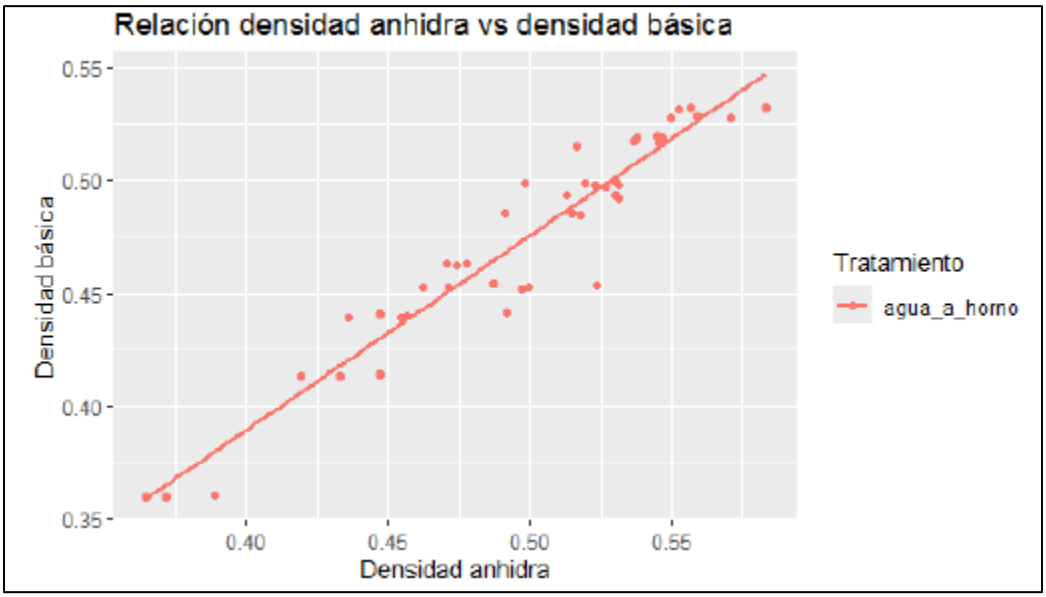


Figura 17. Correlación de las variables analizadas de las gráficas. Fuente (Autores)

La contracción se inicia cuando el contenido de humedad desciende por debajo del punto de saturación de la fibra (PSF), estimado entre 28% y 30% para el Achapo. Por encima de ese valor, la perdida de agua libre en los lúmenes no genera cambios volumétricos apreciables; sin embargo, una vez el agua ligada en las paredes celulares comienza a evaporarse, se produce un acortamiento de las microfibrillas de celulosa, resultando en una reducción medible del volumen y de la masa.

Durante las primeras etapas de secado, la contracción es no lineal, con una tasa inicial rápida debido a la liberación de agua en los poros más grandes, seguida de una fase más lenta conforme se alcanza el equilibrio higroscópico. El valor medio del contenido de humedad en equilibrio tras el proceso de secado fue de 31.2% con un intervalo de confianza del 95% entre 16.7% y 45.7%, lo que refleja la variabilidad natural entre probetas y la influencia de diferencias anatómicas. El análisis ANOVA reporto un efecto significativo del tratamiento (p=0.0125), confirmando que las condiciones de horno e inmersión afectan de forma diferenciada la respuesta física del material.

A partir de la perspectiva tecnológica, este comportamiento indica que la madera de Achapo posee una estabilidad dimensional media; aunque experimenta contracción notable al secarse, tiende a estabilizarse tras alcanzar el contenido de equilibrio, lo que le hace apta para usos estructurales o de carpintería siempre que se aplique un secado controlado y gradual.

8.4 Densidades de probetas

Tipo de densidad	Mínimo	Promedio	Máximo	Desviación estándar
Do (Anhidra)	0,30	0,51	1,57	0,158632316
Dsa (Saturada)	0,34	0,59	1,80	0,188533254
Db (Básica)	0,23	0,33	0,61	0,050464858

Tabla 9. Densidad de probetas obtenidas para armado de las pachas. Fuente (Autora)

En el análisis de densidades se realizó para sesenta (60) probetas de Cedrelinga cateniformis utilizadas en ellos ensayos, considerando tres tipos de densidad: anhidra (D_0), saturada (D_{sa}) y básica (D_b), expresadas en $^{g}/_{cm^3}$.

La densidad anhidra (D_0) presentó un valor promedio de 0,508 g/cm³, con una desviación estándar de 0,159. La densidad saturada (Dsa) mostró un promedio superior de 0,589 g/cm³, mientras que la densidad básica (Db) registró un valor medio de 0,332 g/cm³

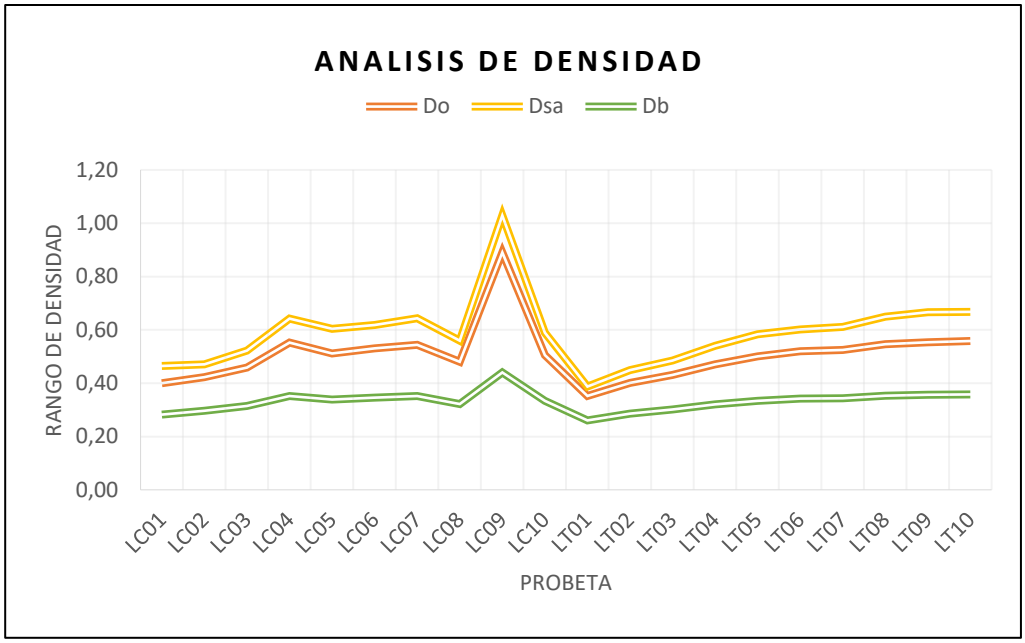


Figura 18. Análisis de densidad promedio por tipo. Fuente (Autor)

Estos resultados evidencian una reducción progresiva de densidad desde el estado saturado hasta el anhidro, atribuible a la perdida de agua libre y parte del agua ligada durante el secado, lo que concuerda con el comportamiento físico típico de las maderas tropicales de densidad media (Forest Products Laboratory, 2010).

La distribución de la densidad en las diferentes probetas evidencia una distribución normal para D_0 y Dsa, mientras que la densidad básica Db presenta menor dispersión y una concentración de valores entre 0.30 y 0.36 g/cm³. La mayor amplitud de D_0 y Dsa con valores extremos superiores a 1.5 g/cm³ y 1.8 g/cm respectivamente puede asociarse a variaciones anatómicas dentro del mismo lote de madera, posiblemente vinculadas a zonas de mayor contenido o diferencias en la orientación del grano.

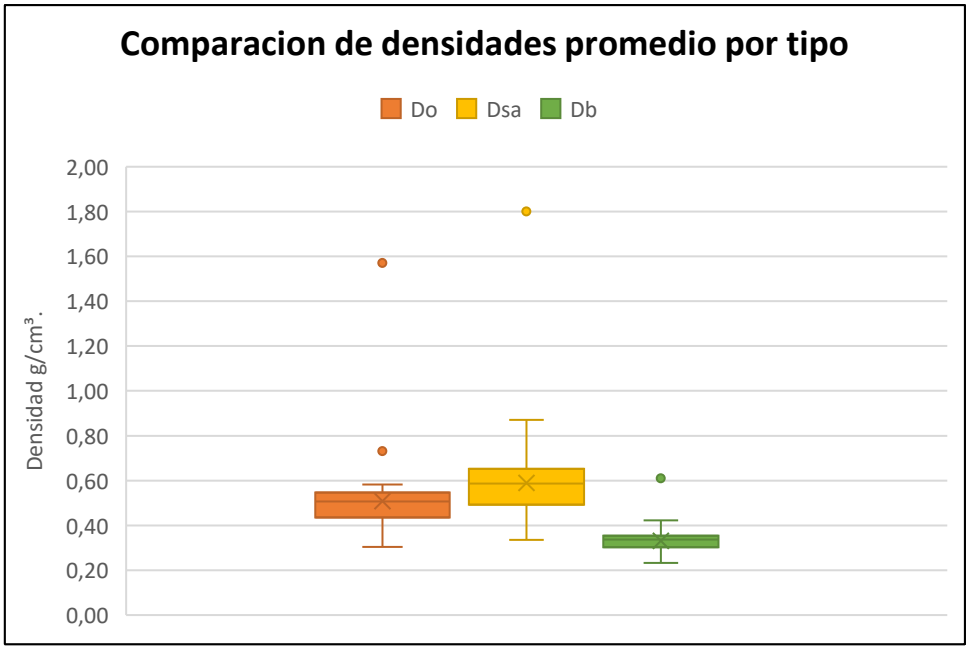


Figura 19. Comparación de densidades promedio por tipo. Fuente (Autores)

Así mismo al comprar los tres tipos de densidad. Se observa que la densidad saturada Dsa posee la media más alta y mayor variabilidad, lo que indica, que las probetas presentan diferentes grados de absorción de agua, posiblemente por diferencias de porosidad o estructura anatómica. Por otra parte, la densidad básica Db es la más estable y menos dispersa, representando la relación más fiel entre masa anhidra y volumen saturado y por tanto el valor de referencia para caracterizar la especie. Finalmente, la relación entre D_0 y Db se aproxima a un factor de 1.53; lo cual está dentro de los limites teóricos establecidos por la literatura para maderas tropicales con contenido inicial de humedad entre 25% y 35%. Este valor indica un proceso de secado eficiente y controlado, sin perdidas de masa estructural significativas por degradación (Perpiñan, 1992).

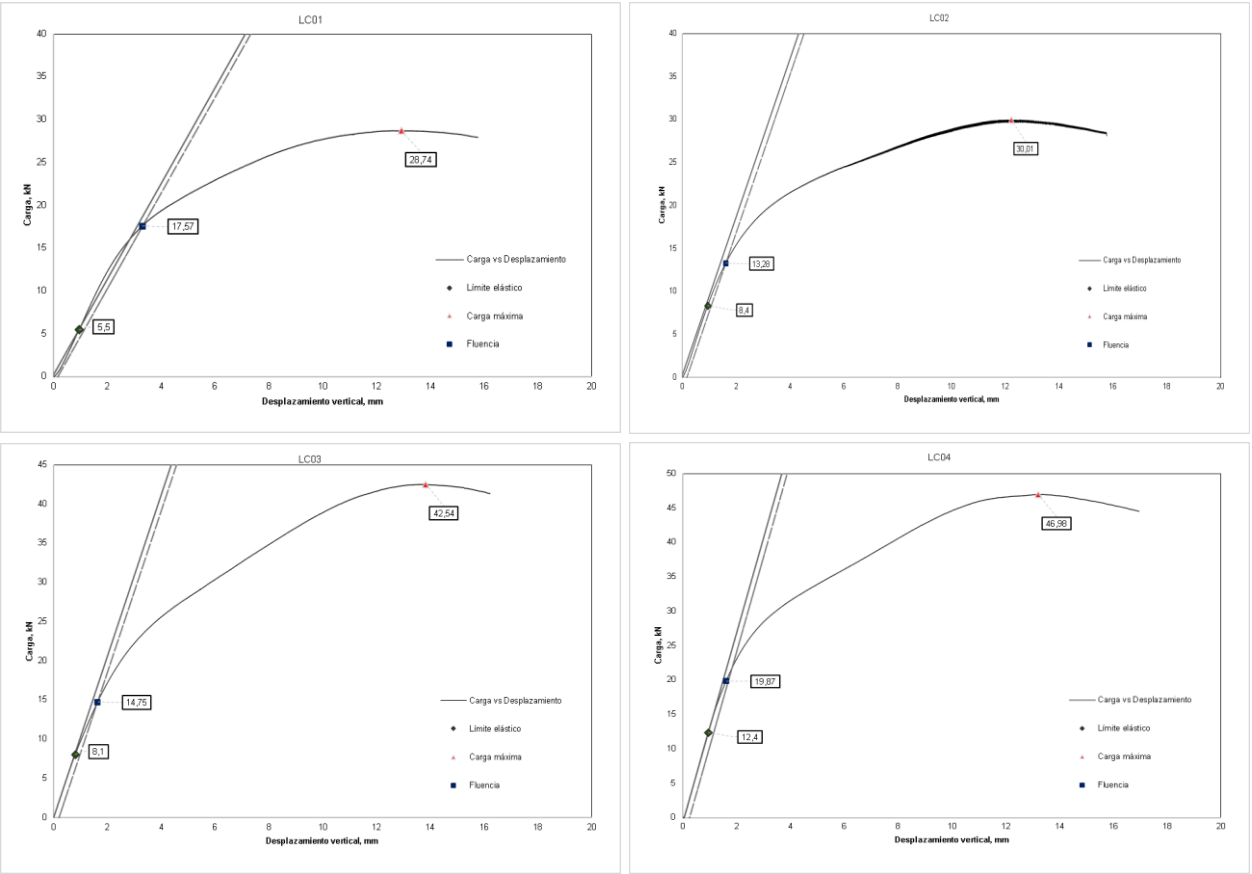
En general, los valores obtenidos son coherentes con los reportados por (talavera, 2007) y corroboraron que Cedrelinga cateniformis es una especie de densidad media con comportamiento estable durante el secado y propiedades adecuadas para aplicaciones estructurales ligeras y en carpintería.

8.5 Valores experimentales y teóricos

El propósito de este análisis fue evaluar la capacidad portante real de las conexiones mecánicas y determinar si las configuraciones de unión, tanto con clavos de 4x40mm como con tornillos de 8x100mm, cumplen o exceden los factores de seguridad establecidos por dichas normativas. Los valores experimentales representados en las gráficas como las cargas en el límite elástico (Le) y las cargas de fluencia (F) fueron ajustados según las curvas carga-desplazamiento obtenidas en los ensayos de laboratorio, mientras que las líneas horizontales indican las cargas admisibles de diseño para la NDS-24 y la NSR-18, utilizadas como referencia de comparación.

Estas cargas admisibles actúan como limites normativos de seguridad estructural, definidos mediante factores de reducción que contemplan las condiciones de servicio, variaciones de humedad, duración de la carga y dispersión del material (AWC-NDS, 2018).

8.6 Resultados teóricos y experimentales para la conexión con clavos



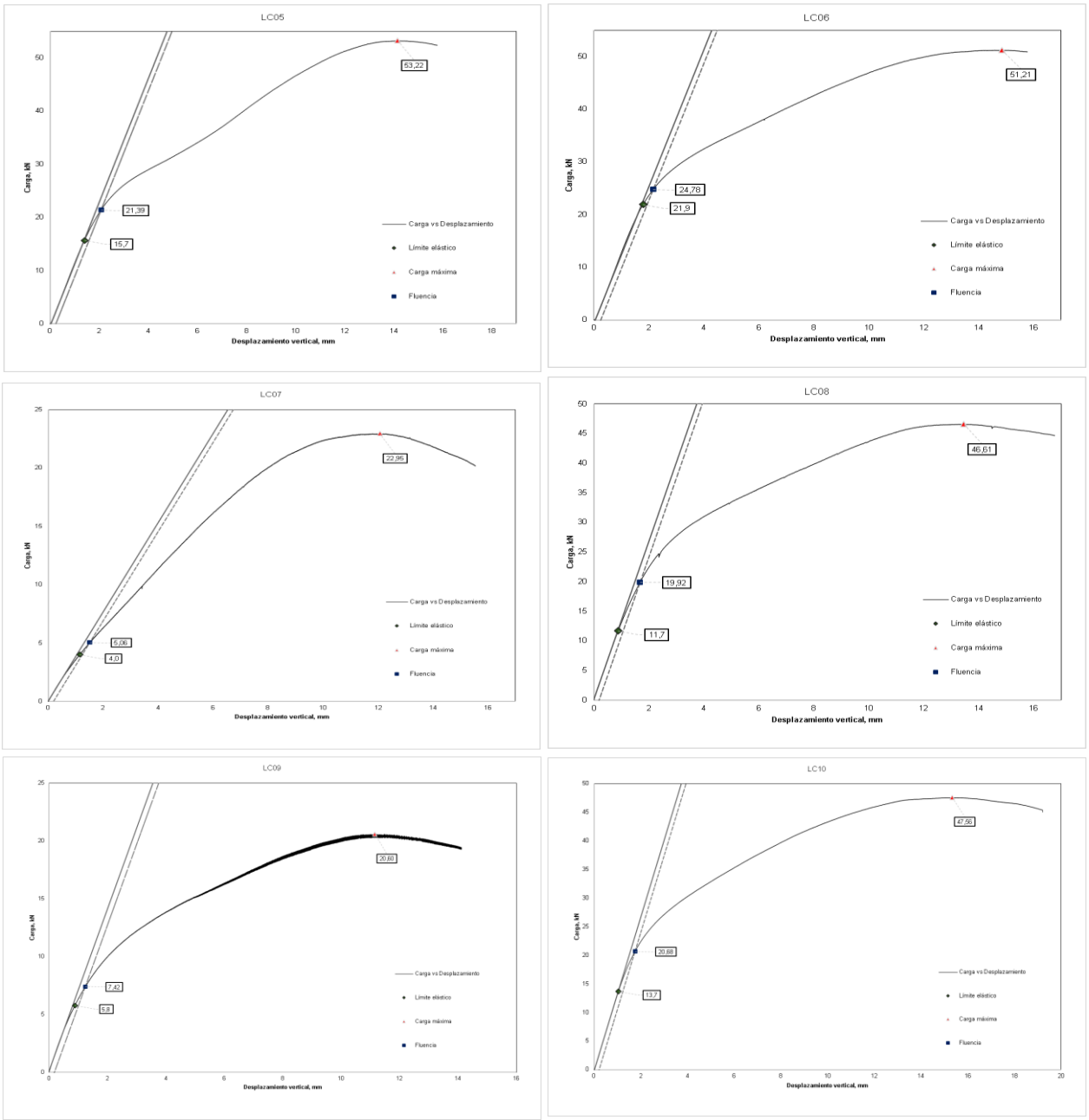


Figura 20. Curvas de carga vs desplazamiento para el tratamiento de uniones clavadas

Los ensayos realizados para el conector “clavos” presento una respuesta lineal inicial entre carga y deformación hasta aproximadamente el 70% de la carga máxima, seguida por una fase de fluencia progresiva, en la que las fibras de madera comenzaron a experimental aplastamiento típica de uniones con clavos de diámetro reducido. Los valores experimentales de carga máxima (F) oscilaron entre 13.28 kN y 24.78 kN, con un promedio general de 20.68 KN, mientras que las deformaciones reales registradas

estuvieron entre 2.44 mm y 4.97 mm, indicando una ductilidad moderada y un comportamiento consistente entre probetas.

Los valores teóricos de resistencia calculados mediante la NDS-24 presentaron un promedio de Z=3.05 kN, mientras que los valores según la NSR-18 fueron ligeramente superiores con Z=2.19 kN. Al comparar estos valores con las cargas experimentales, se evidencio que las resistencias reales superaron ampliamente las estimaciones teóricas, con una relación promedio experimental vs teórico (F/Z) de 5.52 para la NDS-24 y 3.13 para la NSR-18.

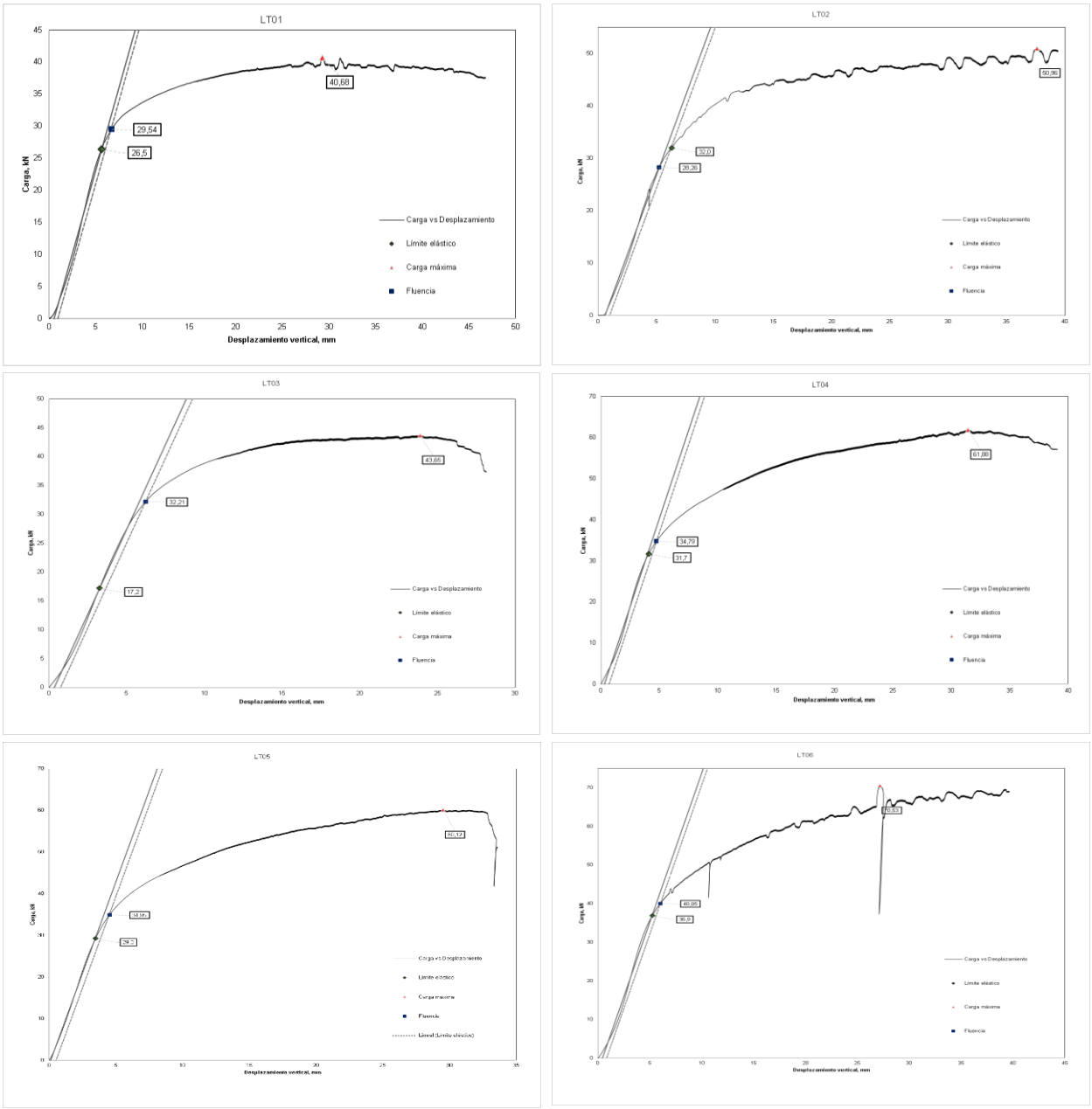
La carga máxima obtenida de los ensayos experimentales fue de 53.22 kN, la mayor carga en el límite elástico fue de 21.90 kN, mientras que la mayor carga de fluencia fue de 24.78, el primero presente para la probeta LC05 y LC06. Los valores mínimos, con el límite elástico de 4.07 kN en la probeta, caga de fluencia 5.06 kN estos dos en la probeta LC07 y para la menor carga obtenida fue de 20.60 kN en la probeta LC09

Las ilustraciones 22, 23, 24 y 25 representan las conexiones clavadas mostrando la comparación entre las cargas experimentales; en el límite elástico y de fluencia, evaluados con las cargas de diseño de las normas NDS-24 y NSR-18. Los resultados experimentales evidencian que, para la mayoría de las probetas, la carga de fluencia (F) supera la carga en el límite elástico (Le), como es esperando en un comportamiento dúctil. Sin embargo, no todas las probetas lograron sobrepasar los valores de diseño normativo establecidos por la NDS-24 (4.0KN) ni la NSR (5.0KN), el comportamiento de los resultados se puede atribuir; primero al número y la disposición de conectores lo cual influye directamente en la capacidad de carga; en este caso se usaron 10clavos por cada probeta lateral con una penetración insuficiente en el miembro central siendo menor al 50% del espesor de la pieza. De acuerdo con la (AWC-NDS, 2018) en la sección 11.3.2; la resistencia por cortante lateral de los clavos depende linealmente de la profundidad de anclaje efectiva, reduciendo así la capacidad portante.

Por otra parte, la densidad básica usada: 0.45 g/cm³; 0.33 g/cm³ y anhidra 0.53 g/cm³; 0.37 g/cm³ tanto promedio como característico respectivamente. El cual representa un valor intermedio para densidades de especies tropicales que oscila entre 0.65 g/cm³ (Minambiente, 2020) la NDS-24 establece

que la resistencia lateral de los conectores metálicos se incrementa con la densidad del sustrato, debido a una mejor distribución de esfuerzos y menor aplastamiento local.

8.7 Resultados teóricos y experimentales para la conexión con tornillos



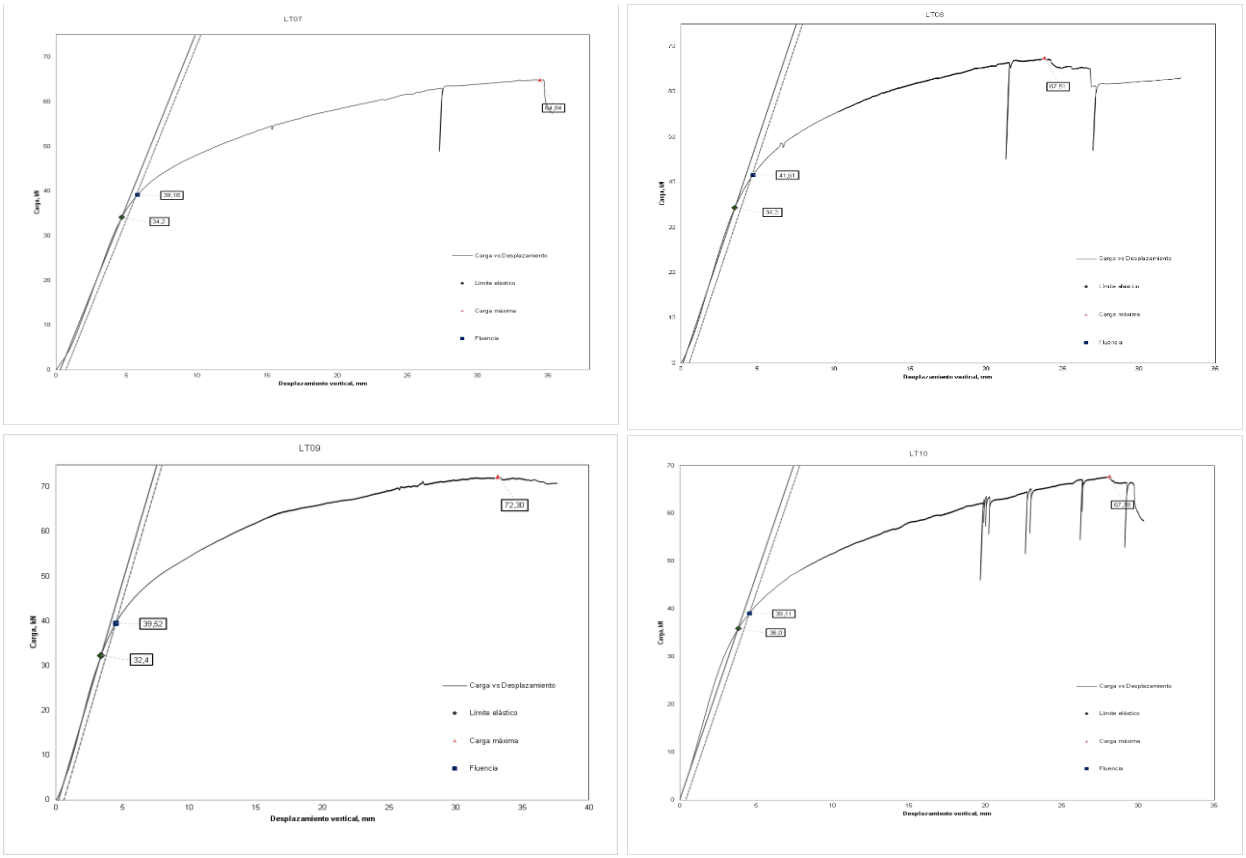


Figura 21 Curvas de carga vs desplazamiento para el tratamiento de uniones atornilladas

Durante los ensayos, las conexiones con tornillos mostraron un comportamiento más rígido y estable que los de clavos, con menores deformaciones y una carga máxima promedio superior. El rango de cargas experimentales (F) oscilo entre 17.22 kN y 39.11 kN, con un promedio general de 3.52 kN, mientras que las deformaciones reales variaron entre 1.54 mm y 3.62 mm, indicando una mayor rigidez axial y una disminución de la ductilidad relativa respecto a las conexiones con clavos. Con respecto a la fase elástica se extendió hasta aproximadamente el 85% de la carga máxima, con un comportamiento casi lineal en la relación carga-deformación. La falla se presentó por deslizamiento y aplastamiento localizado en las fibras de la madera en contacto con el tornillo, sin desprendimiento ni fractura del conector, evidenciando una transferencia de esfuerzos eficaz y progresiva.

Los valores teóricos calculados mediante la NDS-24 mostraron resistencias, promedio de Z=3.26 kN, mientras que los obtenidos con la NSR-18 fueron de Z=2.27 kN, ambos considerablemente inferiores a las cargas experimentales. Al comparar los resultados, se evidencio que los valores experimentaron

superaron entre 3.5 y 4 veces los valores teóricos de la NSR-10 y entre 2.5 y 3 Las ilustraciones 22, 23, 24 y 25 representan las conexiones clavadas.

8.8 Valores teóricos

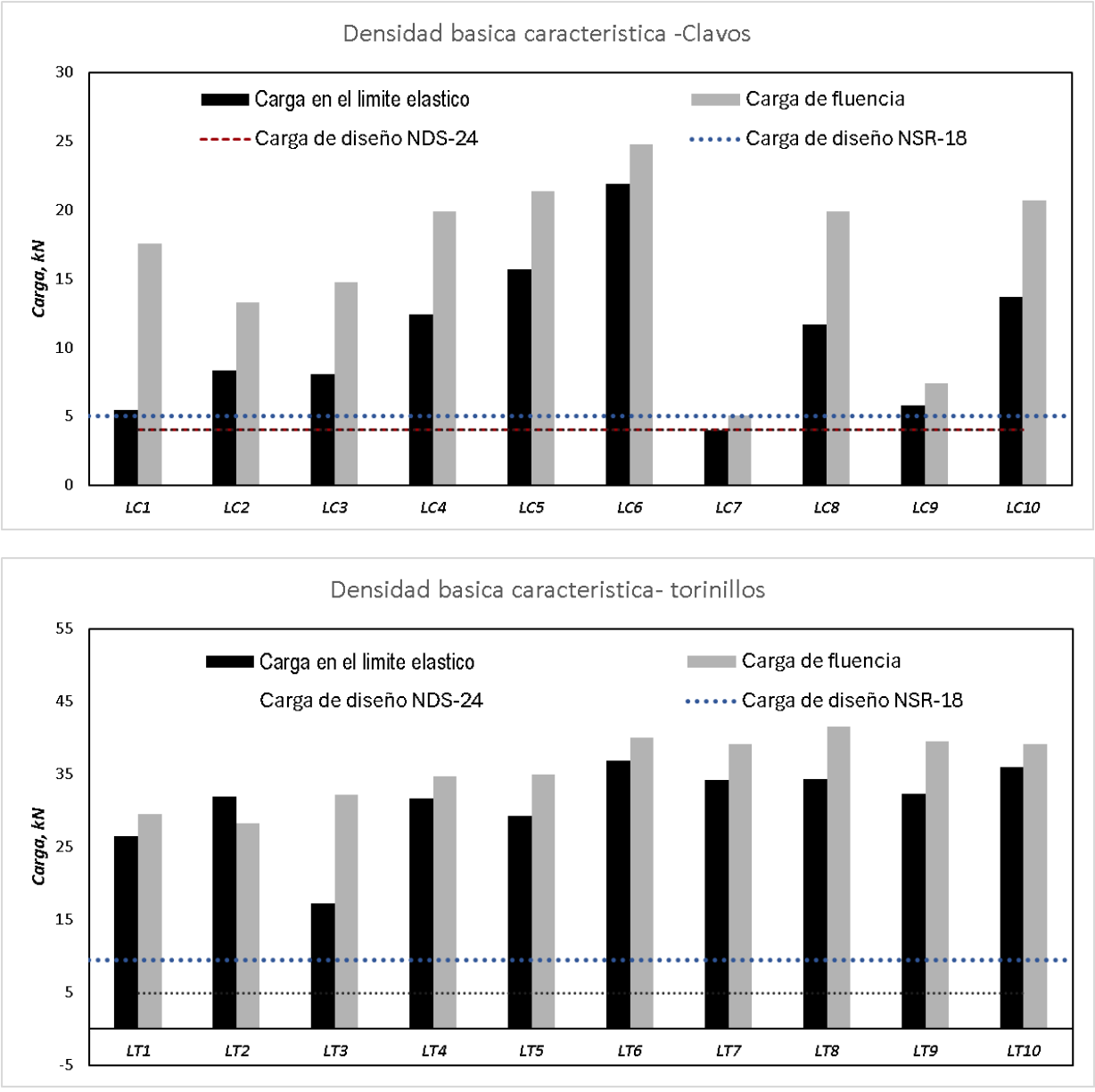
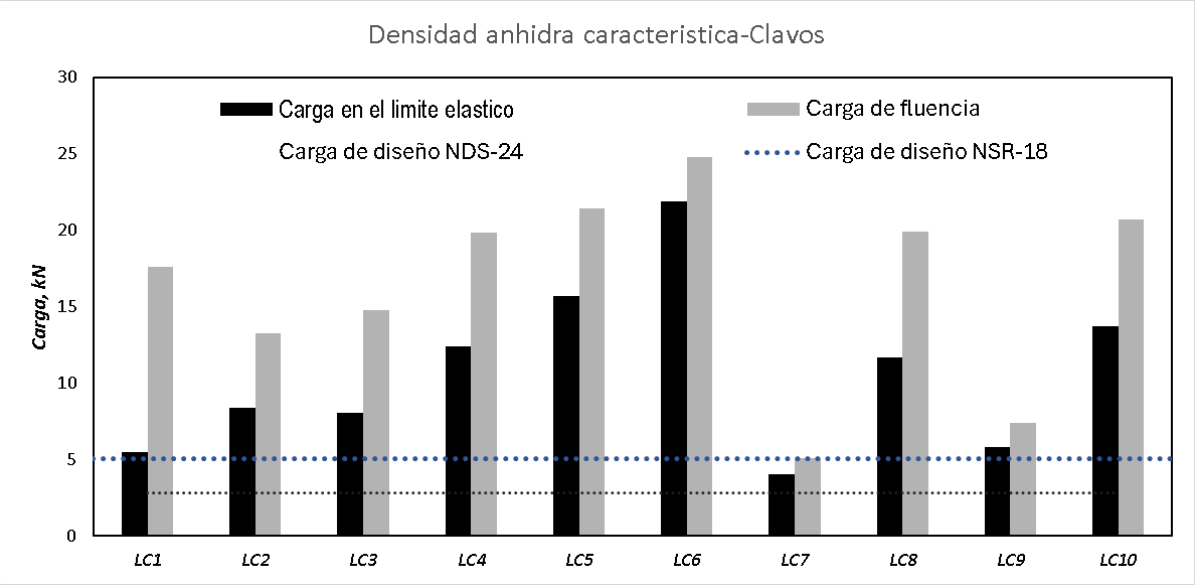


Figura 22. Valores de carga y diseño con densidad básica según la NDS-18 y la NSR-10 para uniones clavadas y atornilladas

Los resultados experimentales evidencian que, para la mayoría de las probetas, la carga de fluencia (F) supera la carga en el límite elástico (Le), como es esperando en un comportamiento dúctil. Sin embargo, no todas las probetas lograron sobrepasar los valores de diseño normativo establecidos por

la NDS-24 (4.0kN) ni la NSR (5.0KN), el comportamiento de los resultados se puede atribuir; primero al número y la disposición de conectores lo cual influye directamente en la capacidad de carga; en este caso se usaron 10clavos por cada probeta lateral con una penetración insuficiente en el miembro central siendo menor al 50% del espesor de la pieza. De acuerdo con la (AWC-NDS, 2018) en la sección 11.3.2; la resistencia por cortante lateral de los clavos depende linealmente de la profundidad de anclaje efectiva, reduciendo así la capacidad portante. Por otra parte, la densidad básica usada: 0.45 g/cm³; 0.33 g/cm³ y anhidra 0.53 g/cm³; 0.37 g/cm³ tanto promedio como característico respectivamente. El cual representa un valor intermedio para densidades de especies tropicales que oscila entre 0.65 g/cm³ (Minambiente, 2020) la NDS-24 establece que la resistencia lateral de los conectores metálicos se incrementa con la densidad del sustrato, debido a una mejor distribución de esfuerzos y menor aplastamiento local



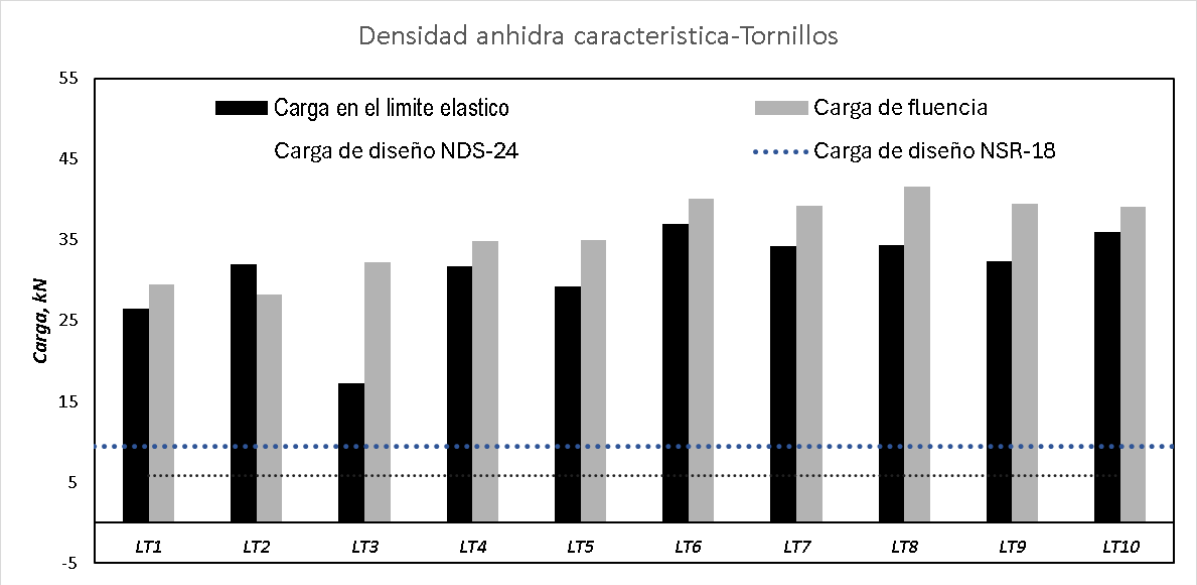


Figura 26 Valores de carga y diseño con densidad anhidra según la NDS-18 y la NSR-10 para uniones clavadas y atornilladas

La figura 26, representan las conexiones atornilladas muestran la comparación entre las cargas experimentales; en el límite elástico y de fluencia, evaluados con las cargas de diseño de las normas NDS-24 y NSR-18. Los resultados experimentales evidencian que, todas de probetas, la carga de fluencia (F) supera la carga en el límite elástico (Le), sin embargo, la carga en el límite elástico llega a alcanzar hasta el 85% de la carga de fluencia, lo que indica que la fase elástica es mayor y por ende la durabilidad del conector es alta. Así mismo podemos evidenciar que todas las probetas sobrepasaron los valores de diseño normativo establecidos por la NDS-24 (3.43 kN) y en la NSR-18 (4.35 kN) para la densidad básica promedio y característica respectivamente; al igual que NDS-24 (9.43kN) y la NSR-18 (5.79kN) para la densidad anhidra promedio y característica.

A partir de los resultados obtenidos del tratamiento con clavos y tonillos, se puede describir que el comportamiento en los dos tratamientos inicialmente inicia con un tramo elástico la cual actúa entre la fibra neutra y la posición del límite elástico seguido rápidamente de un tramo elastoplástico el cual comprende entre la posición del límite elástico y el borde superior de la probeta; seguido por la rotura frágil en tracción, pero donde ya ha ocurrido plastificación en la parte comprimida. A partir de la carga

aplicada en el límite elástico probada a flexión cuando este se encuentra por debajo del 40% de la carga de rotura está asegurado el comportamiento de la madera.

Se observó también, para las 8 graficas, que la pendiente que define el módulo de elasticidad medio a compresión se hacía negativa si los tramos se acortaban, de modo que el incremento de carga fuese pequeño con respecto a la carga que definía el límite de un tramo. Aunque este fenómeno se asemeja a una de las teorías de modo de distribución de tensiones en madera sometida a flexión (Bazan, 1980), éste suele producirse en un solo tramo, es decir, entre el límite elástico y la rotura, lo que difiere de lo obtenido en los ensayos experimentales, donde el fenómeno ocurre en cada cambio de tramo (Baño & Cetrabgolo, 2014).

8.9 Evaluación comparativa entre valores experimentales y teóricos de las uniones

Los resultados de las ratios para las probetas con clavos muestran valores medios de (Le/P_e) de 1,23 ($D_o$min) y 1,11 ($D_o$prom) bajo la norma NDS-18, mientras que para la NSR-10 los promedios fueron 1,67 y 1,08 respectivamente. En el caso de la ratio (F/f_z), los valores medios alcanzaron 2,21 y 1,99 (NDS-18), y 3,01 y 2,23 (NSR-10). Aunque algunos ensayos alcanzaron valores experimentales superiores al diseño teórico, la tendencia general muestra que las uniones con clavos presentan un desempeño menos consistente, especialmente en las probetas LC07, LC08 y LC09, donde las ratios son inferiores a 1.0, indicando que no se alcanzó el nivel de seguridad requerido por las normas de diseño.

Esto puede asociarse a factores como: Penetración insuficiente del clavo: en este caso, los clavos no alcanzaron a penetrar al menos la mitad del segundo miembro, reduciendo la capacidad de anclaje y la transmisión de carga (FPL, 2010). Distribución desigual de la carga entre los conectores, causada por ligeras variaciones en la densidad y el contenido de humedad de la madera. Influencia de la densidad: las ratios más altas corresponden a las probetas con densidades anhidras (D_o), confirmando que una menor humedad mejora el contacto madera–metal y, por ende, la rigidez lateral.

De acuerdo con la NDS-24 (AWC, 2024), las cargas admisibles se calculan con un factor de seguridad que incluye efectos de servicio y duración de carga. El hecho de que las ratios (Le/P_e) sean mayores a 1 en algunos casos indica que la unión supera los requisitos mínimos; sin embargo, las ratios <

1 observados en LC07–LC09 evidencian que la conexión no garantiza seguridad estructural bajo condiciones de diseño críticas, coincidiendo con observaciones experimentales similares reportadas por Nocetti et al. (2016) en ensambles de baja densidad.

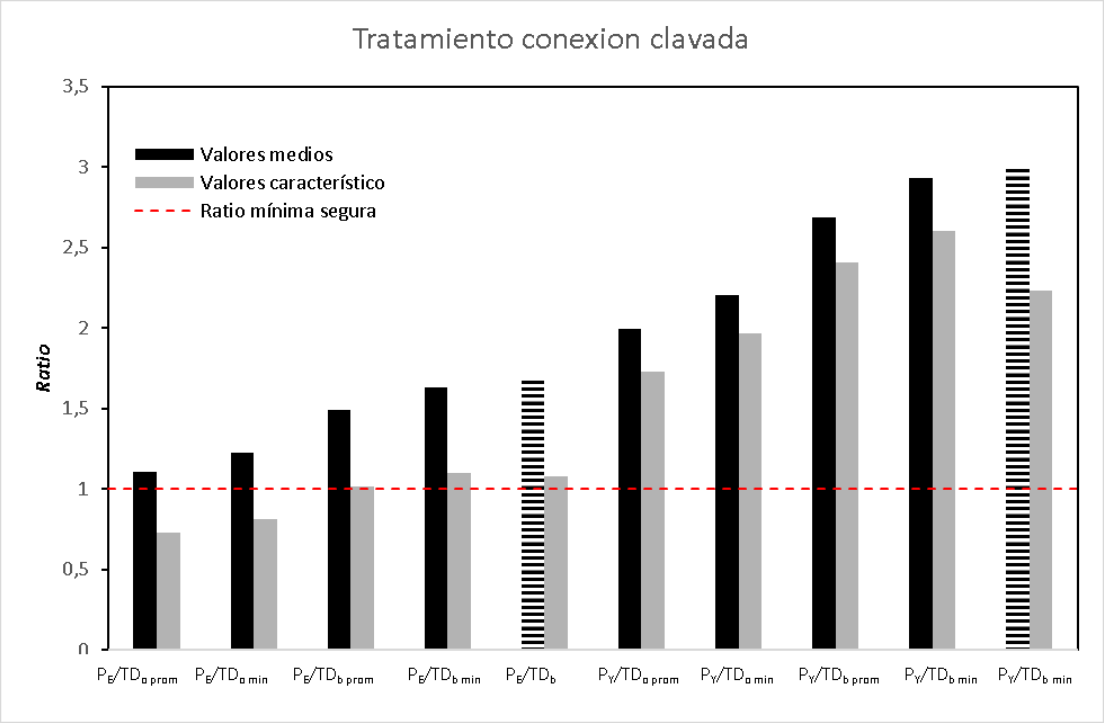


Figura 27. Relación experimental-teórica del comportamiento mecánico de las uniones clavadas. Fuente (Autora)

Conector	Probeta	Ratio (Le/z)					Ratio (F/z)				
		NDS-18				NSR-10	NDS-18				NSR-10
		Do min	Do prom	Db min	Db prom	Pe	Do min	Do prom	Db min	Db prom	Py
Clavos	LC01	1,08	1,01	1,36	1,28	1,02	2,09	1,95	2,64	2,48	1,98
	LC02	1,26	1,19	1,67	1,56	1,38	2,31	2,18	3,07	2,86	2,53
	LC03	1,76	1,58	2,28	2,08	2,00	2,73	2,45	3,52	3,21	3,09
	LC04	1,49	1,30	1,96	1,76	2,00	2,34	2,06	3,10	2,78	3,16
	LC05	1,14	1,03	1,52	1,40	1,65	2,16	1,95	2,89	2,65	3,14
	LC06	0,96	0,88	1,29	1,20	1,46	2,07	1,90	2,78	2,59	3,15
	LC07	0,88	0,82	1,19	1,12	1,37	2,03	1,88	2,74	2,57	3,16
	LC08	0,76	0,66	1,02	0,93	1,15	1,92	1,65	2,58	2,35	2,89
	LC09	1,56	1,37	2,10	1,89	2,41	2,38	2,09	3,21	2,88	3,68
	LC10	1,40	1,25	1,90	1,73	2,26	2,04	1,83	2,77	2,53	3,31
	Promedio	**1,23**	**1,11**	**1,63**	**1,49**	**1,67**	**2,21**	**1,99**	**2,93**	**2,69**	**3,01**
	Característico	**0,81**	**0,73**	**1,10**	**1,01**	**1,08**	**1,97**	**1,73**	**2,60**	**2,41**	**2,23**

Tabla 10. Valores experimentales y teóricos para conexiones clavadas

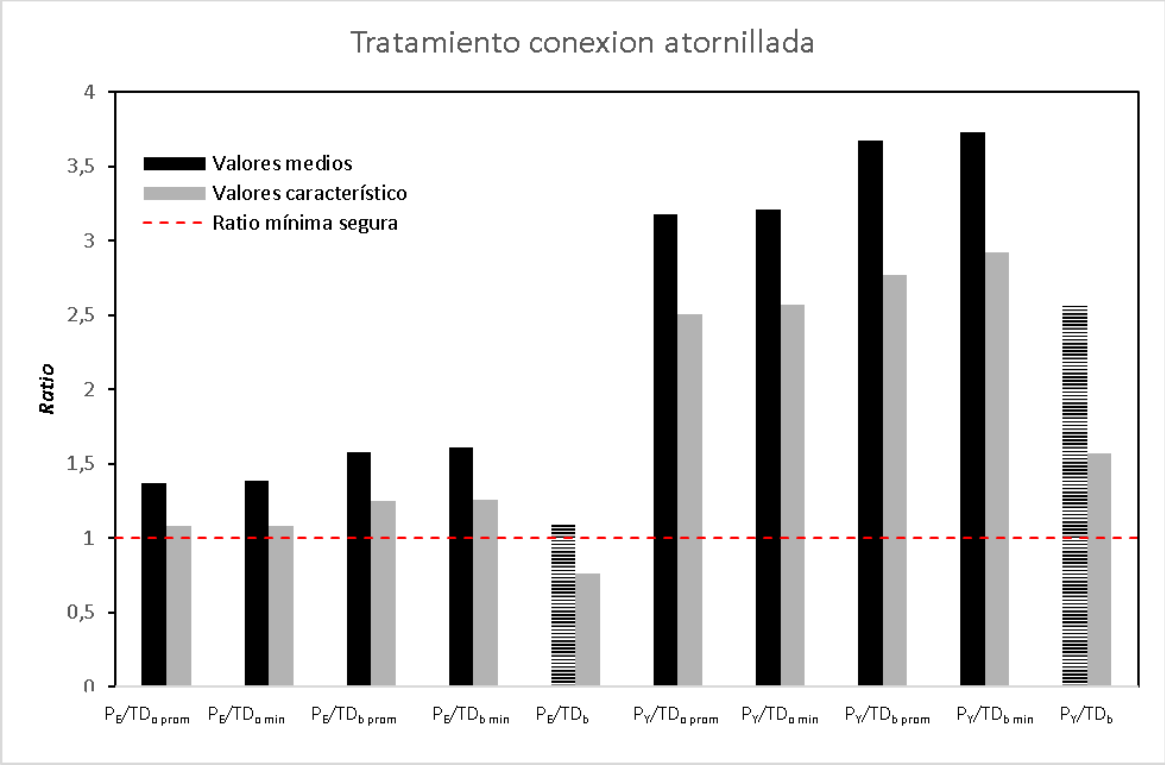


Figura 28. Relación experimental-teórica del comportamiento mecánico de las uniones atornilladas. Fuente (Autora)

Conector	Probeta	Ratio (Le/z)					Ratio (F/z)				
		NDS-18				NSR-10	NDS-18				NSR-10
		Do min	Do prom	Db min	Db prom	Pe	Do min	Do prom	Db min	Db prom	Py
Tornillos	**LT01**	1,55	1,53	1,71	1,69	0,80	3,25	3,20	3,59	3,54	1,69
	LT02	1,38	1,32	1,55	1,49	0,84	2,43	2,33	2,72	2,63	1,48
	LT03	1,09	1,08	1,24	1,23	0,73	3,96	3,93	4,49	4,47	2,66
	LT04	1,74	1,74	2,02	2,02	1,38	3,42	3,42	3,97	3,96	2,70
	LT05	1,53	1,52	1,77	1,64	1,26	2,74	2,71	3,17	2,93	2,24
	LT06	1,43	1,42	1,67	1,66	1,19	3,47	3,45	4,05	4,03	2,87
	LT07	1,36	1,35	1,61	1,60	1,23	3,21	3,18	3,79	3,77	2,90
	LT08	1,08	1,08	1,28	1,28	1,01	2,98	2,97	3,55	3,54	2,79
	LT09	1,26	1,25	1,50	1,49	1,20	3,27	3,26	3,90	3,89	3,11
	LT10	1,44	1,43	1,72	1,71	1,37	3,36	3,34	4,01	3,99	3,20
	Promedio	**1,39**	**1,37**	**1,61**	**1,58**	**1,10**	**3,21**	**3,18**	**3,73**	**3,67**	**2,56**
	Característico	**1,08**	**1,08**	**1,26**	**1,25**	**0,76**	**2,57**	**2,50**	**2,93**	**2,77**	**1,57**

Tabla 11. Valores experimentales y teóricos para conexiones atornilladas

Los conectores con tornillos mostraron ratios considerablemente más altos y consistentes. El promedio de (Le/P_e) fue 1,39 ($D_o$min) y 1,37 ($D_o$prom), mientras que para (F/f_z) alcanzó 3,21 (NDS-18) y 2,56 (NSR-10). Los tornillos ofrecen una capacidad portante y rigidez lateral superior a los clavos, lo que se atribuye a su mayor diámetro efectivo, mayor penetración y la presencia de rosca, que mejora el anclaje en el segundo miembro.

La variación entre $D_o$min y $D_o$prom es mínima (<4%), lo que indica que los tornillos son menos sensibles a las variaciones en la densidad que los clavos, una tendencia también descrita por Johansen (1949) y validada por ASTM D1761-20.

En la gráfica, las cargas teóricas de diseño (líneas NDS-24 y NSR-18) se mantienen muy por debajo de los valores experimentales, indicando que el modelo teórico es conservador, garantizando la seguridad incluso bajo condiciones extremas. Este comportamiento es característico de las uniones con tornillos en maderas semipesados (como Cedrelinga cateniformis), cuya estructura anatómica facilita la resistencia a la compresión perpendicular a la fibra y el anclaje de los filetes metálicos (Forest Products Laboratory, 2010).

8.10 Análisis modos de fallas

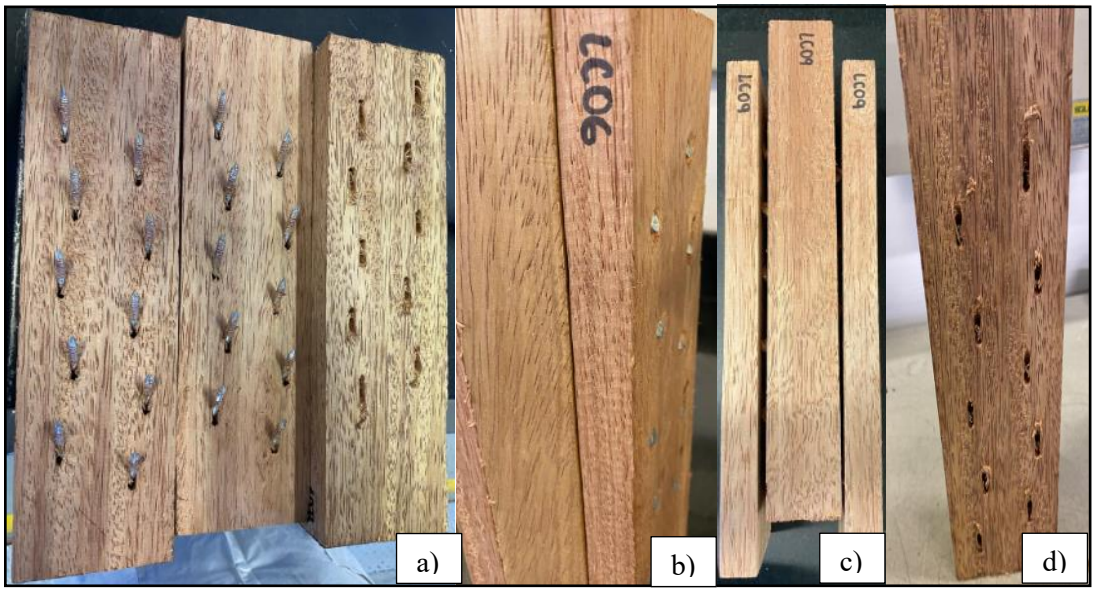


Figura 29. Modos de falla para el tratamiento con clavos LC06 a)tratamiento visto en cada una de las probetas; by c) vista lateral; c) vista frontal. Fuente (Autores)

Las probetas provistas con clavos de diámetro 4 mm y longitud 40 mm presentaron predominantemente el Modo II (aplastamiento simultáneo de ambos miembros). La clasificación se realizó mediante inspección visual (deformación localizada en ambas caras y ausencia de doblamiento del clavo) y el análisis de las curvas carga–desplazamiento (pico definido y caída abrupta en post-pico).

El diámetro del clavo es un parámetro crítico, ya que determina la capacidad de transmisión de esfuerzos de contacto entre el conector y la madera. En clavos delgados el área de contacto efectiva es reducida, concentrando las tensiones de compresión en una zona pequeña. Esto genera tensiones locales elevadas en el plano de unión, que sobrepasan rápidamente la resistencia a compresión perpendicular a la fibra de la madera, originando el aplastamiento del material antes de que el clavo alcance deformación plástica significativa. La influencia de la longitud del conector es limitada ya que no alcanza un valor normado, ocasionando que las tensiones de compresión se concentren en una región reducida y no se distribuyen uniformemente. Finalmente, la densidad de la madera un determinante fundamental muestra que con densidades mas altas presentan mayores valores de carga de falla (Fz), evidenciando una relación positiva entre la densidad y la capacidad resistente. Sin embargo, aunque la densidad aumenta la

resistencia local al aplastamiento, el diámetro reducido del clavo sigue siendo insuficiente. Así como en la madera de baja densidad se evidencia, el aplastamiento ocurre de manera mas abrupta y profunda y las curvas carga-desplazamiento muestran picos tempranos y pendientes iniciales, lo que nos indica una respuesta más frágil y menos rígida.

De acuerdo con la figura 29, las probetas muestran hundimiento a nivel de cabeza y vástago del clavo, con signos ocasionales de fisuración longitudinal que amplifican la pérdida de capacidad. Estos indicios confirman el carácter relativamente frágil de la falla en Modo II para el conector estudiado; por tanto, en aplicaciones estructurales se recomienda evaluar el uso de conectores de mayor diámetro o tornillería para mejorar ductilidad y capacidad resistente

Como se evidencia en la figura 29 el modo de falla que se evidenciaron se da por aplastamiento local: la cabeza del clavo comprime las fibras del segundo miembro; se aprecia hundimiento local bajo la cabeza y perdida de sección efectiva en la zona de contacto. Deslizamiento: el clavo se desplaza axialmente sin que el conector falla, la unión pierde capacidad para movilidad del conector. Fisuración radial: grietas que parten desde el punto de inserción hacia el borde, a menudo en dirección radial

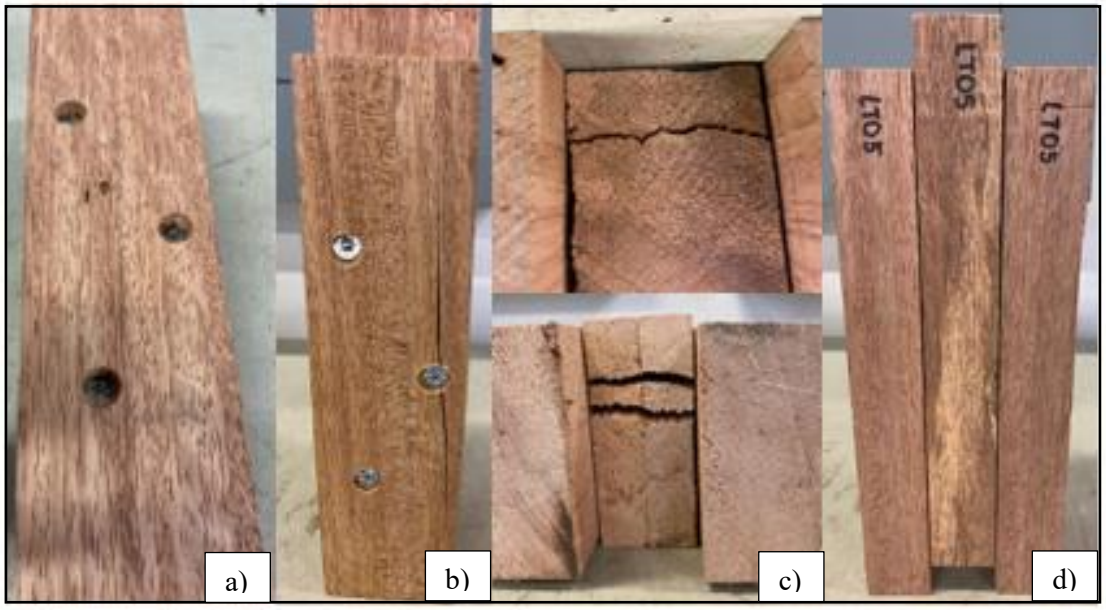


Figura 30. Modos de falla para el tratamiento con tornillos. Pueba LT05 a y b) vista lateral; c) vista inferior; d) vista frontal.

En las uniones atornilladas se observaron dos mecanismos de fallo principales: modo II (aplastamiento controlado por la madera) y modo IIIm (formación de una rotura plástica en el tornillo acompañada de aplastamiento del miembro principal). La aparición de cada modo depende de la interacción entre diámetro efectivo del tornillo, longitud de incrustación y densidad de la madera.

Los tornillos al tener un mayor diámetro y mayor longitud efectiva favorecen el desarrollo de momento plástico en el conector, incrementado la probabilidad de modo lllm caracterizado por una mayor capacidad ultima y ductilidad. En particular, la longitud efectiva aumenta la resistencia por fricción y por reparto de esfuerzos, lo que permite que el conector plastifique antes que la madera falle por aplastamiento.

Por otra parte, las probetas con densidades bajas se registró el modo ll; en el cual la madera de por compresión perpendicular a la fibra y el tonillo permanece casi recta; estas uniones presentan comportamientos más frágiles.

Estadísticamente, las muestras clasificadas como Modo lllm mostraron medias de carga máxima superiores y mayor energía absorbida que las clasificadas como Modo ll.

De acuerdo con la figura 30 los modos de falla dominantes en probetas con tornillos 8x100 mm que se evidenciaron en las pruebas realizadas inicialmente se evidencia:

Se evidencia aplastamiento controlado; en el cual la compresión de fibras alrededor de la rosca don redistribución progresiva del esfuerzo, el tornillo mantiene el anclaje hasta la deformación. Se evidencio aplastamiento seguido de un ajuste; esta combina una secuencia de fallas, por lo que la falla final es progresiva. En algunos casos se evidencio el corte en las fibras

8.11 Prueba estadística

Se aplicó se aplicó un análisis de varianza de un factor (ANOVA) con un nivel de significancia de 0.05 para determinar si las variaciones en la densidad de la madera influyen significativamente en las ratios F/P_e obtenidos experimentalmente.

Fuente de variación	SS	gl	MS	F	P-valor	F crítico
Entre grupos	6.87	3	2.29	9.41	0.0004	3.01
Dentro de grupos	2.92	12	0.24			
Total	9.79	15				

Tabla 12Anlisis ANOVA de un factor utilizando los valores de ratio para los conectores clavos y tornillos.

Esta prueba con fin de comprobar si estén diferencias estadísticamente significativas entre las medias de carga de fluencia de ambos tipos de conector

Los resultados mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de densidad ($F(3,12) = 9.41$, $p = 0.0004$), lo que indica que el tipo de densidad utilizada en el cálculo (básica o anhidra, en valores mínimos o promedios) afecta de manera significativa la relación entre la carga de fluencia experimental y la carga de diseño admisible.

En particular, los valores de ratio más altos se registraron en los grupos con densidad anhidra promedio (D_o_prom), seguidos por densidad básica promedio (D_β_prom), mientras que las ratios más bajas correspondieron a densidad mínima básica (D_β_min).

Este comportamiento concuerda con lo establecido por la NDS-24 (2024) y estudios previos (Aleksiievets, 2020)los cuales demuestran que un incremento en la densidad de la madera mejora la resistencia lateral de los conectores mecánicos y reduce la deformación por aplastamiento en la zona de contacto madera–acero.

Por lo tanto, se concluye que la densidad es un factor crítico en el desempeño estructural de las uniones, afectando de forma directa la correspondencia entre los valores experimentales y teóricos.

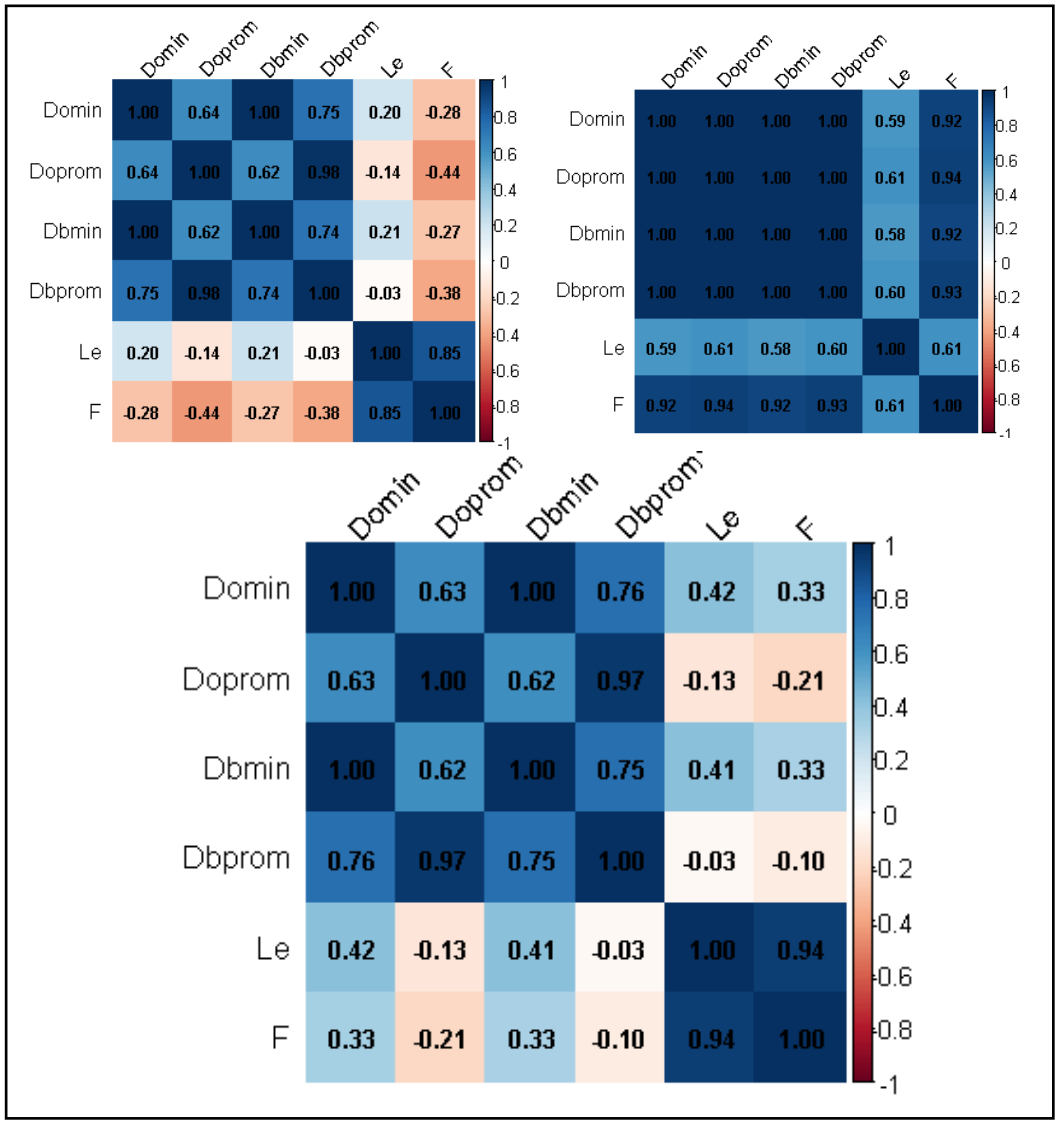


Figura 31. Correlación de Pearson para variables analizadas. Figura izquierda superior para conexión clavada, figura derecha superior conexiones atornilladas y figura inferior central para conexiones clavadas y atornilladas

La matriz de correlación permitió identificar las relaciones estadísticas entre las variables físicas (densidad de la madera y longitud efectiva) y la variable mecánica principal (carga máxima o resistencia al corte de la unión). En el caso de los clavos (4×40 mm), se evidenció una correlación positiva moderada entre la densidad y la carga soportada, lo que sugiere que maderas con mayor densidad presentan un mejor anclaje del conector y, por tanto, una mayor capacidad de carga antes del inicio del deslizamiento o fluencia plástica. Esta relación es coherente con la teoría de la resistencia lateral de conectores, en la cual la densidad del material influye directamente en la resistencia por aplastamiento de la fibra.

En contraste, los tornillos mostraron una correlación más fuerte entre densidad y carga máxima, lo que confirma su mayor eficiencia mecánica en maderas densas debido al incremento del rozamiento helicoidal entre las roscas y las fibras. Adicionalmente, la relación entre longitud efectiva (Le) y la carga fue más significativa para los tornillos que para los clavos, evidenciando que la penetración efectiva del conector contribuye de manera directa al desarrollo de los modos de falla combinados (II y IIIm). En este tipo de conector, el comportamiento está dominado por una interacción compleja entre la rigidez axial del tornillo y la resistencia al aplastamiento local de la madera.

La correlación entre densidad y desplazamiento también refleja un patrón interesante: a mayor densidad, se reducen los desplazamientos relativos, lo que indica una menor deformabilidad y una unión más rígida, especialmente visible en los tornillos. En cambio, los clavos mostraron un comportamiento más dúctil, con desplazamientos mayores y una menor correlación entre las variables geométricas y la carga, lo que sugiere que en este tipo de conexión el control del comportamiento se debe más al anclaje por fricción y deformación plástica del conector que a la resistencia del material base.

En términos comparativos, la matriz de correlación evidencia que los tornillos presentan un desempeño más dependiente de la densidad y la longitud de inserción, mientras que los clavos exhiben un comportamiento más disperso, donde la variabilidad del material y la alineación de las fibras influyen con mayor peso en la respuesta mecánica. Esto se traduce en una mayor confiabilidad estructural de los tornillos frente a variaciones del sustrato, especialmente en uniones sometidas a cargas cíclicas o esfuerzos de corte repetitivos

9 CONCLUSIONES

Los valores obtenidos (0,33–0,45 g/cm³) evidenciaron una correlación directa con la capacidad portante, la rigidez y la estabilidad mecánica de las uniones evaluadas, mostrando además menor dispersión estadística en los resultados experimentales. Esto confirma que la densidad básica constituye un indicador más confiable del desempeño estructural real, al reflejar de manera integral la estructura anatómica y la distribución de masa del material.

Los tornillos presentaron un comportamiento estructural significativamente superior a los clavos, alcanzando cargas de fluencia y límites elásticos hasta tres veces mayores. Esto evidencia que el tipo de conector incide directamente en la rigidez del sistema y en la transferencia de esfuerzos entre miembros.

Las uniones con tornillos superaron las cargas admisibles de las normas NDS-24 y NSR-10, lo que indica una alta eficiencia estructural y confiabilidad. En contraste, las uniones con clavos no alcanzaron el factor de seguridad exigido, debido a la baja penetración efectiva y a la distribución no uniforme de esfuerzos.

Las diferencias entre densidad básica y anhidra demostraron un efecto significativo sobre el comportamiento mecánico, corroborado mediante el análisis de varianza (ANOVA). A mayor densidad, se observó mayor capacidad portante y menor dispersión de los resultados.

Los valores de diseño estimados mediante NDS-24 y NSR-10 mostraron tendencias coherentes, aunque la NDS presentó resultados más conservadores. Esto sugiere la necesidad de desarrollar factores de ajuste locales basados en propiedades reales de especies tropicales.

El procedimiento aplicado, desde la selección de probetas hasta el análisis de curvas carga-desplazamiento, permite establecer una metodología replicable para estudios futuros de conexiones en madera tropical, validando la utilidad de los ensayos mecánicos a escala de laboratorio como herramienta de calibración normativa.

10 RECOMENDACIONES

Ampliar el número de especies tropicales evaluadas para conformar una base de datos de propiedades físicas y mecánicas aplicables a la NSR-10.

Profundizar en la modelación numérica de uniones y conexiones, utilizando elementos finitos para predecir modos de falla.

Evaluar el comportamiento de las uniones bajo cargas cíclicas o de impacto especialmente para los tornillos, ya que su mayor rigidez podría inducir concentraciones de esfuerzos en el tiempo.

Incorporar factores de corrección por contenido de humedad y densidad en los cálculos estructurales para maderas tropicales.

Promover el uso de tornillos estructurales en uniones criticas o sometidas a cargas elevadas y emplear clavos en aplicaciones donde la ductilidad y facilidad de instalación sean más importantes.

11 REFERENCIAS

Aleksiievets, V. I. (2020). Load-carry capacity of bolted joints of timber structures under static loading. *Materials science and engineering*, págs. 1-10.

ANSI. (2015). *National design specification for wood construction*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.avant-garde.engineering/NDS.pdf

ANSI. (2024 de Octubre de 2024). *National design specification for wood construction*. Obtenido de AWC: https://awc.org/pdf-viewer/#https://web-media.awc.org/wp-content/uploads/2021/12/17210154/AWC_NDS2024_20231129_AWCWebsite_Chapter1.pdf

AWC. (2018). *National design specification.* Obtenido de American Wood Council: https://awc.org/publications/2018-nds/

AWC-NDS. (2018). National Design Specification for wood construction. En A. w. council. National Design Specification (NDS) for wood construction 2018.

Baño, V., & Cetrabgolo, G. (2014). Diagrama tension-deformacion de la madera libre de defectos de Pinus elliottii de procedencia Uruguay. *Jornadas sudamericanas de ingenieria estrcutural*, págs. 1-14.

Bellido, G. C. (2003). Tableros de fibras de la madera de "tornillo" Cedrelinga cateniformis Ducke. *Bosques*, págs. 39-44.

Bruzzone, G. (31 de 03 de 2025). Estudio comparativo de productos de madera laminada unidos con distintos tipos de clavijas. *Madera Ciencia y Tecnologia*, págs. 1-15. Obtenido de Madera : https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-221X2025000100422&script=sci_arttext#f7

Chazaro, C. (31 de 03 de 2021). *Tipos de conexiones para estructuras de acero*. Obtenido de Gerdau Corsa: https://www.gerdaucorsa.com.mx/blog/tipos-de-conexiones-para-estructuras-de-acero

Chazaro, C. (Sf). *Diseño de conexiones*. Obtenido de Gerdau Corsa: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gerdaucorsa.com.mx/sites/mx_gerdau/files/PDF/DISENO%20DE%20CONEXIONES_2019-min-min.pdf

Departamento administrativo de la funcion publica. (19 de Marzo de 2010). *Decreto 926 de 2010*. Obtenido de Requisitos de caracter tecnico y cientifico para construccion sismoresistente NSR-10: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=39255

Fedemaderas. (Septiembre de 2021). *Boletin estadistico forestal* . Obtenido de https://fedemaderas.org.co/wp-content/uploads/2021/11/BOLETIN_FORESTAL_SEPTIEMBRE_WEB1.pdf

Forest Products Laboratory. (2010). *Wood Handbook, wood as an engineering material.* Madision, Wisconsion: Centennial Edition. Obtenido de https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf

Forestal Maderero. (18 de Mayo de 2024). *Achapo Cedrelinga cateniformis*. Obtenido de Forestal Maderero: https://www.forestalmaderero.com/articulos/item/achapo-cedrelinga-cateniformis.html

Fundacion Natura. (02 de Agosto de 2023). *Aspectos ecologicos y silviculturales para el manejo de especies forestales nativas.* Obtenido de https://natura.org.co/publicaciones/cartilla-aspectos-ecologicos-silviculturales-manejo-especies-forestales-nativas/

Garzón, C. (2022). *Carcaterizacion de propiedades fisicas y mecanicas para el uso estructural de la madera de la especie "Acacia mangium".* Obtenido de Universidad nacional: https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/82854/1049646832.2022.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Green, D. (1999). *Mechanical properties of wood*. Obtenido de https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/fplgtr/fplgtr113/ch04.pdf

ITTO. (Sf). *Cedrelinga cateniformis.* Obtenido de http://www.tropicaltimber.info/es/specie/cedrorana-cedrelinga-cateniformis/#lower-content

J.C, P. (30 de Abril de 2014). Capacidad portante de uniones con clavos de pequeño diametro. Analisis comparativo de los resultados de ensayos con los calculados segun las reglas de diseño del Eurocodigo 5, del reglamento cirsoc 601 y de la norma NBR 7190. *EBRAMEM*, págs. 1-15.

Kew. (2023). *Cedrelinga cateniformis (Ducke)*. Obtenido de Royal Botanic Gardens: https://colplanta.org/taxon/urn%3Alsid%3Aipni.org%3Anames%3A51040-2/general-information

laboratory, Forest Products. (2010). Wood Handbook. En *wood as an engineering material.* Madison Wisconsin: Centennial.

Lima, L. (2018). *La madera como material estructural certeza, conjeturas, incognitas y perspectivas*. Obtenido de Laboratorio de ensayos de materiales y estructuras: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://lemej.unnoba.edu.ar/wp-content/uploads/publicaciones/Luis_Lima-La_madera_como_material_estructural.pdf

Lima, L. (2018). *La madera como material estructural certezas, conjeturas, incognitas y perspectivas.* Obtenido de UNNOBA: https://lemej.unnoba.edu.ar/wp-content/uploads/publicaciones/Luis_Lima-La_madera_como_material_estructural.pdf

Lozano, V. M. (Sf). Especies promosorias de la Amazonia, conservación y utilización del Germosplasma. *Achapo Cedrelinga cateniformis Ducke* , págs. 135-140. Obtenido de Achapo. Cedrelinga cateniformis Ducke.

M, J. M. (2013). *Ensayos de aplastamiento sobre maderas estructurales para la obtencion de una metodologia eficiente de calculo para connexiones con pernos.* Obtenido de https://jornadasaie.org.ar/jornadas-aie-anteriores/2016-24JAIE-BuenosAires/contenidos/trabajos/089.pdf

Mecanica. (Sf). *Propiedades mecanicas de la madera estructural*. Obtenido de Mecanica de la madera: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://infomadera.net/uploads/productos/informacion_general_40_mecanicaEstructural.pdf

Mengual, A. (s.f.). *Cedrelinga cateniformis*. Obtenido de UrbiPedia: https://www.urbipedia.org/hoja/Cedrelinga_cateniformis

Minambiente. (2020). *Caracterizacion de las 30 especies forestales maderables mas movilizadas en Colombia provenientes del bosque natural.* Obtenido de https://archivo.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Gobernanza_forestal_2/Cata%CC%81logo_de_maderas_de_Colombia.pdf?

Minambiente. (Abril de 2022). *Formulacion del plan de ordenamiento forestal del departamento del Guaviare en el bloque 1 integrado por los bloques norte A, norte B, occidente A y occidente B, en un area de 706.846 hectareas; de conformidad con las normas, lineamientos vigentes*. Obtenido de Contrato de consultoria N° VA-CCON-019-2020: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://visionamazonia.minambiente.gov.co/content/uploads/2022/11/PRESENTACION-FINAL-POF-GUAVIARE.pdf

Minambiente. (Abril de 2022). *Plan de ordenacion forestal del departamento del Guaviare en el bloque 1, bloque norte A, norte B, occidente A y occidente B*. Obtenido de Consorcio IMA-A.M.C.A: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://visionamazonia.minambiente.gov.co/content/uploads/2022/11/Documento-final-POF-Guaviare_compressed.pdf

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (1997). *Reglamiento Colombiano de cosntruccion sismo resistente NSR-10. Titulo G- Estructuras de madera y estructuras de guadua.* Obtenido de https://www.uptc.edu.co/export/sites/default/facultades/f_ingenieria/pregrado/civil/documentos/NSR-10_Titulo_G.pdf

Moreno, J. G. (2021). Estructuras en madera nociones basicas. En J. G. Moreno, *Estructuras en madera* (págs. 90-130). Cordoba (España): RED Descartes. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://proyectodescartes.org/iCartesiLibri/PDF/Estructuras_en_madera.pdf

Natalia Perez, L. V. (2011). Prediccion del contenido de humedad de equilibrio de la madera en fucnion del peso especifico de la pared celular y variables ambientales. *Maderas, ciencia y tecnologia*, págs. 253-266.

ONF. (s.f.). *Ingenieria de la madera*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://onfcr.org/wp-content/uploads/media/uploads/documents/ingenieria-madera.pdf

Pensteel. (11 de 02 de 2023). *Conexiones en estructuras de acero*. Obtenido de Pebsteel: https://pebsteel.com/en/connections-in-steel-structures/

Peraza, J. (1995). *Medios de union.* España: Ailia.

Perez, V. (1979). Uniones clavadas para contrucciones en madera. En V. A. Galaz, *Uniones clavadas para construccion en madera* (págs. 13-45). Chile: INFOR.

Perpiñan, E. (1992). Variabilidad de la densidad y contraccion volumetrica de la madera de Prosopis. *Facultad de ciencias agropecuarias*, págs. 221-231.

Ricardo, P. J. (Sf). Ensayos de aplastamiento sobre maderas estructurales para la obtencion de una metologia eficiente de calculos para connexiones con pernos. *Facultad regional general Pacheco*, págs. 1-13.

Rosemarie Garay-Moena, M. C.-S.-F. (15 de Junio de 2022). Desarrollo de un indicador integrado de sustentabilidad y seguridad estrcutural para el mercado de viviendas de madera aplicado a Chile central. *Revista habitat sustentable Vol 12* , págs. 8-23. Obtenido de https://www.scielo.cl/pdf/hs/v12n1/en_0719-0700-hs-12-01-8.pdf

Rothoblaas. (2023). *Tornillos para madera y uniones para terrazas.* Italia: Rotho Blaas Srl.

Rothoblaas. (2023). Tornillos para madera y uniones para terrazas. En R. S. Technology, *Madera, hormigon, metal, terrazas y fachadas.* Italia: Rotho Blaas Srl.

SINCHI. (2022). *Fichas tecnicas de especies de uso forestal y agroforestal de la Amazonia Colombiana*. Obtenido de https://www.sinchi.org.co/files/PUBLICACIONES%20DIGITALES/Fichas%20Tecnicas%20agr

oforestal/Fichas%20Tecnicas%20de%20Especies%20de%20uso%20Forestal%20y%20Agroforestal%20de%20la%20Amazonia%20Colombiana_07%20ACHAPO.pdf

SINCHI. (09 de Septiembre de 2025). *Fichas tecnicas de especies de uso forestal y agroforestal de la Amazonia Colombiana.* Obtenido de SINCHI: https://www.sinchi.org.co/fichas-tecnicas-de-especies-de-uso-forestal-y-agroforestal-de-la-amazonia-colombiana

SIS. (2010). *Reglamento Colombiano de construccion sismo resistente NSR-10*. Obtenido de Titulo G-estructuras de madera y estructuras de guadua: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.uptc.edu.co/export/sites/default/facultades/f_ingenieria/pregrado/civil/documentos/NSR-10_Titulo_G.pdf

talavera, F. F. (2007). Comportamiento higroscopico de la madera de Persea americana var . *Chapingo*, págs. 49-56. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/629/62980106.pdf

Torres, F. (2010). *Propiedades fisico mecanicas de la especie "Tornillo" Cedrelinga cateniformis Ducke proveniente de plantaciones en fajas del bosque nacional Alexander Von Humboldt-UCAYALI.* Obtenido de Opciones para la promocion e innovacion tecnologica de maderas procedentes de plantaciones forestales con especies nativas de la region Amazonica: https://repositorio.inia.gob.pe/server/api/core/bitstreams/693e4c66-cae1-46df-8b40-213b1b5e60e4/content

Torres, F. (Agosto de 2010). *Propiedades fisico mecanicas de la especie "Tornillo" Cedrelinga cateniformis Ducke, proveniente de plantaciones en fajas del bosque nacional Alexander Von Humboldt-UCAYALI*. Obtenido de https://repositorio.inia.gob.pe/server/api/core/bitstreams/693e4c66-cae1-46df-8b40-213b1b5e60e4/content

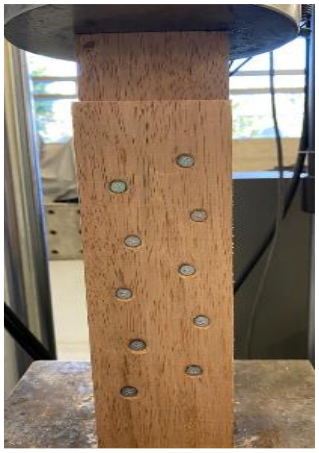
Universidad de los Andes. (2011). *Laboratorio de ingenieria civil, hoja de vida del equipo.* Bogota: Uniandes.

ANEXOS

EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10		Formato	1
		Fecha	20/01/2026
		Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL		Pagina	1 de 20

GENERALIDADES			
Codigo de probeta	LC01		
Numero de ensayo	T1		
Geometria inicial de montaje			
Longitud (L, cm)	34,99		
Ancho (A, cm)	8,12		
Espesor (E, cm)	9,87		
Geometria del conector			
Longitud (mm)	40		
Diametro (mm)	4		
Propiedades de la madera			
Contenido de humedad (%)	<18		
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51		
Propiedades del conector			
Tipo	Clavo		
Material	Acero al carbon electrogalvanizado		
Modo de falla teorico	II		
Carga de diseño (kgf)	10		
RESULTADOS			
Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	33,4	**Carga maxima (kgf)**	31,81
Ancho (A, cm)	8,1	**Carga de fluencia (kgf)**	12,3
Espesor (E, cm)	8	**Deformacion maxima (mm)**	22,77
Tiempo de ensayo (min)	11,81	**Deformacion a la fluencia (mm)**	2,15

Registro previo a la prueba de falla


EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10		Formato	1
		Fecha	20/01/2026
		Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL		Pagina	2 de 20
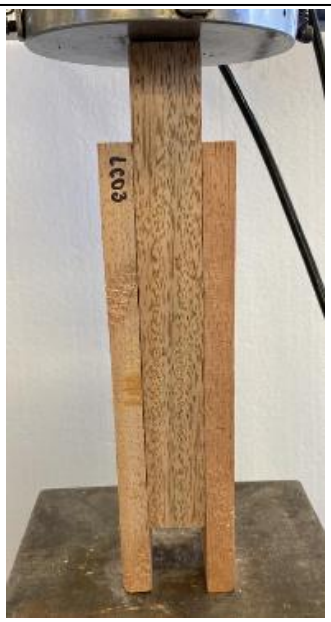
GENERALIDADES			
Codigo de probeta	LC02		
Numero de ensayo	T1		
Geometria inicial de montaje			
Longitud (L, cm)	35,05		
Ancho (A, cm)	7,92		
Espesor (E, cm)	7,79		
Geometria del conector			
Longitud (mm)	40		
Diametro (mm)	4		
Propiedades de la madera			
Contenido de humedad (%)	<18		
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51		
Propiedades del conector			
Tipo	Clavo		
Material	Acero al carbon electrogalvanizado		
Modo de falla teorico	II		
Carga de diseño (kgf)	10		
RESULTADOS			
Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	33,5	**Carga maxima (kgf)**	34,84
Ancho (A, cm)	8	**Carga de fluencia (kgf)**	13,0
Espesor (E, cm)	8	**Deformacion maxima (mm)**	20,34
Tiempo de ensayo (min)	10,44	**Deformacion a la fluencia (mm)**	2,1

Registro previo a la prueba de falla





EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10		Formato	1
		Fecha	20/01/2026
		Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL		Pagina	3 de 20

GENERALIDADES		
Codigo de probeta	LC03	
Numero de ensayo	T1	
Geometria inicial de montaje		
Longitud (L, cm)	35,07	
Ancho (A, cm)	8,0	
Espesor (E, cm)	7,84	
Geometria del conector		
Longitud (mm)	40	
Diametro (mm)	4	
Propiedades de la madera		
Contenido de humedad (%)	<18	
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51	
Propiedades del conector		
Tipo	Clavo	
Material	Acero al carbon electrogalvanizado	
Modo de falla teorico	II	
Carga de diseño (kgf)	10	

RESULTADOS			
Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	33,6	**Carga maxima (kgf)**	42,54
Ancho (A, cm)	8	**Carga de fluencia (kgf)**	14,75
Espesor (E, cm)	8	**Deformacion maxima (mm)**	13,83
Tiempo de ensayo (min)	8,51	**Deformacion a la fluencia (mm)**	1,63

Registro previo a la prueba de falla







EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10		Formato	1
		Fecha	20/01/2026
		Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL		Pagina	4 de 20

GENERALIDADES			
Codigo de probeta	LC04		
Numero de ensayo	T1		
Geometria inicial de montaje			
Longitud (L, cm)	35,01		
Ancho (A, cm)	7,29		
Espesor (E, cm)	7,81		
Geometria del conector			
Longitud (mm)	40		
Diametro (mm)	4		
Propiedades de la madera			
Contenido de humedad (%)	<18		
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51		
Propiedades del conector			
Tipo	Clavo		
Material	Acero al carbon electrogalvanizado		
Modo de falla teorico	II		
Carga de diseño (kgf)	10		
RESULTADOS			
Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	33,8	**Carga maxima (kgf)**	46,98
Ancho (A, cm)	8,0	**Carga de fluencia (kgf)**	19,87
Espesor (E, cm)	8,0	**Deformacion maxima (mm)**	13,2
Tiempo de ensayo (min)	7,46	**Deformacion a la fluencia (mm)**	1,61

Registro previo a la prueba de falla



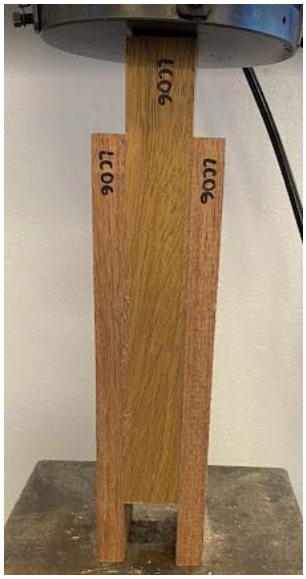
EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10		Formato	1
		Fecha	20/01/2026
		Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL		Pagina	5 de 20

GENERALIDADES			
Codigo de probeta	LC05		
Numero de ensayo	T1		
Geometria inicial de montaje			
Longitud (L, cm)	35,04		
Ancho (A, cm)	7,99		
Espesor (E, cm)	7,83		
Geometria del conector			
Longitud (mm)	40		
Diametro (mm)	4		
Propiedades de la madera			
Contenido de humedad (%)	<18		
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51		
Propiedades del conector			
Tipo	Clavo		
Material	Acero al carbon electrogalvanizado		
Modo de falla teorico	II		
Carga de diseño (kgf)	10		
RESULTADOS			
Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	33,5	**Carga maxima (kgf)**	53,22
Ancho (A, cm)	8,0	**Carga de fluencia (kgf)**	21,39
Espesor (E, cm)	8,0	**Deformacion maxima (mm)**	14,15
Tiempo de ensayo (min)	7,37	**Deformacion a la fluencia (mm)**	2,08

Registro previo a la prueba de falla



EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10		**Formato**	1
		Fecha	20/01/2026
		Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL		**Pagina**	6 de 20

GENERALIDADES			
Codigo de probeta	LC06		
Numero de ensayo	T1		
Geometria inicial de montaje			
Longitud (L, cm)	35,15		
Ancho (A, cm)	7,97		
Espesor (E, cm)	7,86		
Geometria del conector			
Longitud (mm)	40		
Diametro (mm)	4		
Propiedades de la madera			
Contenido de humedad (%)	<18		
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51		
Propiedades del conector			
Tipo	Clavo		
Material	Acero al carbon electrogalvanizado		
Modo de falla teorico	II		
Carga de diseño (kgf)	10		
RESULTADOS			
Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	33,2	**Carga maxima (kgf)**	51,21
Ancho (A, cm)	8,1	**Carga de fluencia (kgf)**	24,78
Espesor (E, cm)	8,0	**Deformacion maxima (mm)**	14,85
Tiempo de ensayo (min)	8,3	**Deformacion a la fluencia (mm)**	2,15

Registro previo a la prueba de falla



EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10		Formato	1
		Fecha	20/01/2026
		Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL		Pagina	7 de 20

GENERALIDADES		
Codigo de probeta	LC07	
Numero de ensayo	T1	
Geometria inicial de montaje		
Longitud (L, cm)	35,1	
Ancho (A, cm)	7,98	
Espesor (E, cm)	7,86	
Geometria del conector		
Longitud (mm)	40	
Diametro (mm)	4	
Propiedades de la madera		
Contenido de humedad (%)	<18	
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51	
Propiedades del conector		
Tipo	Clavo	
Material	Acero al carbon electrogalvanizado	
Modo de falla teorico	II	
Carga de diseño (kgf)	10	

RESULTADOS			
Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	N	**Carga maxima (kgf)**	22,95
Ancho (A, cm)	N	**Carga de fluencia (kgf)**	5,06
Espesor (E, cm)	N	**Deformacion maxima (mm)**	12,06
Tiempo de ensayo (min)	8,3	**Deformacion a la fluencia (mm)**	1,51

Registro previo a la prueba de falla



EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10		**Formato**	1
		Fecha	20/01/2026
		Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL		**Pagina**	8 de 20

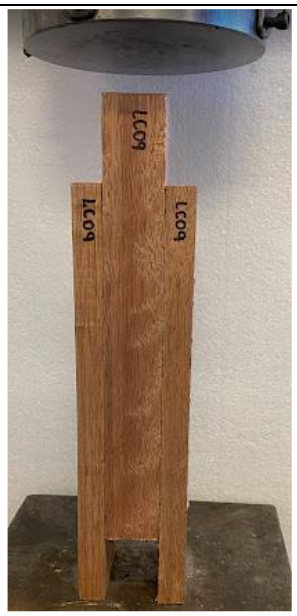
GENERALIDADES		
Codigo de probeta	LC08	
Numero de ensayo	T1	
Geometria inicial de montaje		
Longitud (L, cm)	35,05	
Ancho (A, cm)	8,00	
Espesor (E, cm)	7,90	
Geometria del conector		
Longitud (mm)	40	
Diametro (mm)	4	
Propiedades de la madera		
Contenido de humedad (%)	<18	
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51	
Propiedades del conector		
Tipo	Clavo	
Material	Acero al carbon electrogalvanizado	
Modo de falla teorico	II	
Carga de diseño (kgf)	10	

RESULTADOS			
Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	33,50	**Carga maxima (kgf)**	46,61
Ancho (A, cm)	8,20	**Carga de fluencia (kgf)**	19,92
Espesor (E, cm)	8,00	**Deformacion maxima (mm)**	13,45
Tiempo de ensayo (min)	8,30	**Deformacion a la fluencia (mm)**	1,68

Registro previo a la prueba de falla



EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10		Formato	1
		Fecha	20/01/2026
		Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL		Pagina	9 de 20

GENERALIDADES			
Codigo de probeta	LC09		
Numero de ensayo	T1		
Geometria inicial de montaje			
Longitud (L, cm)			
Ancho (A, cm)			
Espesor (E, cm)			
Geometria del conector			
Longitud (mm)	40		
Diametro (mm)	4		
Propiedades de la madera			
Contenido de humedad (%)	<18		
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51		
Propiedades del conector			
Tipo	Clavo		
Material	Acero al carbon electrogalvanizado		
Modo de falla teorico	II		
Carga de diseño (kgf)	10		

RESULTADOS			
Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	32,80	**Carga maxima (kgf)**	20,6
Ancho (A, cm)	9,00	**Carga de fluencia (kgf)**	7,42
Espesor (E, cm)	8,00	**Deformacion maxima (mm)**	11,15
Tiempo de ensayo (min)	6,80	**Deformacion a la fluencia (mm)**	1,24
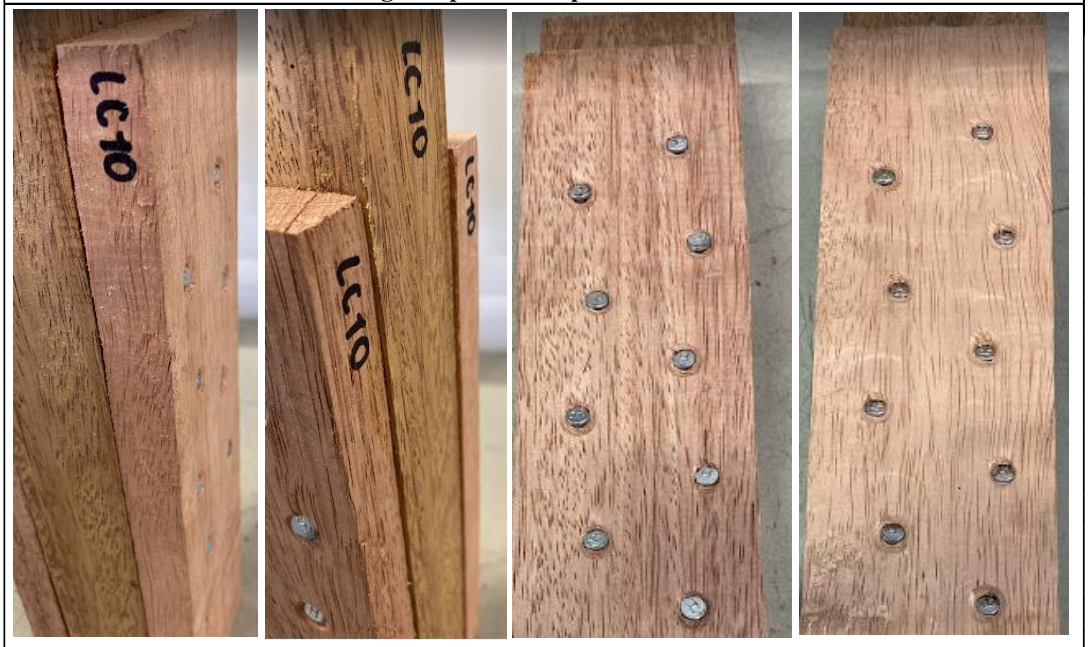
Registro previo a la prueba de falla



EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10		Formato	1
		Fecha	20/01/2026
		Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL		Pagina	10 de 20

GENERALIDADES			
Codigo de probeta	LC10		
Numero de ensayo	T1		
Geometria inicial de montaje			
Longitud (L, cm)	35,06		
Ancho (A, cm)	7,91		
Espesor (E, cm)	7,86		
Geometria del conector			
Longitud (mm)	40		
Diametro (mm)	4		
Propiedades de la madera			
Contenido de humedad (%)	<18		
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51		
Propiedades del conector			
Tipo	Clavo		
Material	Acero al carbon electrogalvanizado		
Modo de falla teorico	II		
Carga de diseño (kgf)	10		
RESULTADOS			
Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	33,50	**Carga maxima (kgf)**	47,56
Ancho (A, cm)	8,00	**Carga de fluencia (kgf)**	20,68
Espesor (E, cm)	8,00	**Deformacion maxima (mm)**	15,33
Tiempo de ensayo (min)	7,30	**Deformacion a la fluencia (mm)**	1,75

Registro previo a la prueba de falla

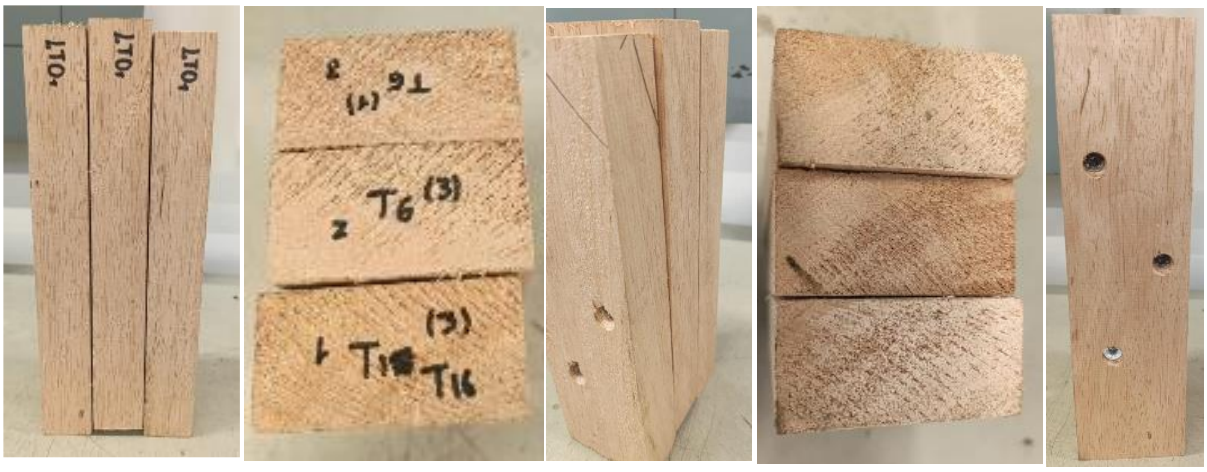


EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10	Formato	1
	Fecha	20/01/2026
	Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL	Pagina	11 de 20

GENERALIDADES		
Codigo de probeta	LT01	
Numero de ensayo	T2	
Geometria inicial de montaje		
Longitud (L, cm)	35,03	
Ancho (A, cm)	11,90	
Espesor (E, cm)	8,00	
Geometria del conector		
Longitud (mm)	80,0	
Diametro (mm)	6,0	
Propiedades de la madera		
Contenido de humedad (%)	<18	
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51	
Propiedades del conector		
Tipo	Tornillo	
Material	Acero al carbon electrogalvanizado	
Modo de falla teorico	II & IIIm	
Carga de diseño (kgf)	10	

RESULTADOS			
Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	30,50	**Carga maxima (kgf)**	40,68
Ancho (A, cm)	12,00	**Carga de fluencia (kgf)**	29,54
Espesor (E, cm)	8,00	**Deformacion maxima (mm)**	29,27
Tiempo de ensayo (min)	18,92	**Deformacion a la fluencia (mm)**	6,71

Registro previo a la prueba de falla



EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10		**Formato**	1
		Fecha	20/01/2026
		Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL		**Pagina**	12 de 20

GENERALIDADES			
Codigo de probeta	LT02		
Numero de ensayo	T2		
Geometria inicial de montaje			
Longitud (L, cm)	35,03		
Ancho (A, cm)	11,82		
Espesor (E, cm)	8,00		
Geometria del conector			
Longitud (mm)	80,0		
Diametro (mm)	6,0		
Propiedades de la madera			
Contenido de humedad (%)	<18		
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51		
Propiedades del conector			
Tipo	Tornillo		
Material	Acero al carbon electrogalvanizado		
Modo de falla teorico	II & IIIm		
Carga de diseño (kgf)	10		
RESULTADOS			
Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	30,50	**Carga maxima (kgf)**	50,96
Ancho (A, cm)	12,00	**Carga de fluencia (kgf)**	28,26
Espesor (E, cm)	7,90	**Deformacion maxima (mm)**	37,62
Tiempo de ensayo (min)	18,81	**Deformacion a la fluencia (mm)**	5,22

Registro previo a la prueba de falla



EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10		Formato	1
		Fecha	20/01/2026
		Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL		Pagina	13 de 20

GENERALIDADES			
Codigo de probeta	LT03		
Numero de ensayo	T2		
Geometria inicial de montaje			
Longitud (L, cm)	34,13		
Ancho (A, cm)	11,78		
Espesor (E, cm)	7,96		
Geometria del conector			
Longitud (mm)	80,0		
Diametro (mm)	6,0		
Propiedades de la madera			
Contenido de humedad (%)	<18		
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51		
Propiedades del conector			
Tipo	Tornillo		
Material	Acero al carbon electrogalvanizado		
Modo de falla teorico	II & IIIm		
Carga de diseño (kgf)	10		
RESULTADOS			
Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	32,60	**Carga maxima (kgf)**	
Ancho (A, cm)	11,80	**Carga de fluencia (kgf)**	
Espesor (E, cm)	7,90	**Deformacion maxima (mm)**	
Tiempo de ensayo (min)	18,98	**Deformacion a la fluencia (mm)**	

Registro previo a la prueba de falla



EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10		**Formato**	1
		Fecha	20/01/2026
		Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL		**Pagina**	14 de 20

GENERALIDADES

Codigo de probeta	LT04	
Numero de ensayo	T2	
Geometria inicial de montaje		
Longitud (L, cm)	35,1	
Ancho (A, cm)	11,84	
Espesor (E, cm)	7,99	
Geometria del conector		
Longitud (mm)	80,0	
Diametro (mm)	6,0	
Propiedades de la madera		
Contenido de humedad (%)	<18	
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51	
Propiedades del conector		
Tipo	Tornillo	
Material	Acero al carbon electrogalvanizado	
Modo de falla teorico	II & IIIm	
Carga de diseño (kgf)	10	

RESULTADOS

Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	31,60	**Carga maxima (kgf)**	61,88
Ancho (A, cm)	12,20	**Carga de fluencia (kgf)**	34,79
Espesor (E, cm)	8,40	**Deformacion maxima (mm)**	31,44
Tiempo de ensayo (min)	15,59	**Deformacion a la fluencia (mm)**	4,75

Registro previo a la prueba de falla



EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10		Formato	1
		Fecha	20/01/2026
		Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL		Pagina	15 de 20

GENERALIDADES			
Codigo de probeta	LT05		
Numero de ensayo	T2		
Geometria inicial de montaje			
Longitud (L, cm)	35,00		
Ancho (A, cm)	11,91		
Espesor (E, cm)	8,01		
Geometria del conector			
Longitud (mm)	80,0		
Diametro (mm)	6,0		
Propiedades de la madera			
Contenido de humedad (%)	<18		
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51		
Propiedades del conector			
Tipo	Tornillo		
Material	Acero al carbon electrogalvanizado		
Modo de falla teorico	II & IIIm		
Carga de diseño (kgf)	10		
RESULTADOS			
Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	32,10	**Carga maxima (kgf)**	60,12
Ancho (A, cm)	12,00	**Carga de fluencia (kgf)**	34,95
Espesor (E, cm)	8,00	**Deformacion maxima (mm)**	29,52
Tiempo de ensayo (min)	13,24	**Deformacion a la fluencia (mm)**	4,52

Registro previo a la prueba de falla



EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10		Formato	1
		Fecha	20/01/2026
		Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL		Pagina	16 de 20

GENERALIDADES			
Codigo de probeta	LT06		
Numero de ensayo	T2		
Geometria inicial de montaje			
Longitud (L, cm)	35,03		
Ancho (A, cm)	11,93		
Espesor (E, cm)	8,01		
Geometria del conector			
Longitud (mm)	80,0		
Diametro (mm)	6,0		
Propiedades de la madera			
Contenido de humedad (%)	<18		
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51		
Propiedades del conector			
Tipo	Tornillo		
Material	Acero al carbon electrogalvanizado		
Modo de falla teorico	II & IIIm		
Carga de diseño (kgf)	10		
RESULTADOS			
Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	31,40	**Carga maxima (kgf)**	70,53
Ancho (A, cm)	12,10	**Carga de fluencia (kgf)**	40,05
Espesor (E, cm)	8,00	**Deformacion maxima (mm)**	27,17
Tiempo de ensayo (min)	16,19	**Deformacion a la fluencia (mm)**	6,01

Registro previo a la prueba de falla



EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10		Formato	1
		Fecha	20/01/2026
		Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL		Pagina	17 de 20

GENERALIDADES		
Codigo de probeta	LT07	
Numero de ensayo	T2	
Geometria inicial de montaje		
Longitud (L, cm)	35,00	
Ancho (A, cm)	11,96	
Espesor (E, cm)	8,01	
Geometria del conector		
Longitud (mm)	80,0	
Diametro (mm)	6,0	
Propiedades de la madera		
Contenido de humedad (%)	<18	
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51	
Propiedades del conector		
Tipo	Tornillo	
Material	Acero al carbon electrogalvanizado	
Modo de falla teorico	II & IIIm	
Carga de diseño (kgf)	10	

RESULTADOS			
Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	31,70	**Carga maxima (kgf)**	64,94
Ancho (A, cm)	11,90	**Carga de fluencia (kgf)**	39,18
Espesor (E, cm)	7,90	**Deformacion maxima (mm)**	34,44
Tiempo de ensayo (min)	16,39	**Deformacion a la fluencia (mm)**	39,18

Registro previo a la prueba de falla



EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10	**Formato**	1
	Fecha	20/01/2026
	Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL	**Pagina**	18 de 20

GENERALIDADES

Codigo de probeta	LT08
Numero de ensayo	T2
Geometria inicial de montaje	
Longitud (L, cm)	35,00
Ancho (A, cm)	11,89
Espesor (E, cm)	8,01
Geometria del conector	
Longitud (mm)	80,0
Diametro (mm)	6,0
Propiedades de la madera	
Contenido de humedad (%)	<18
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51
Propiedades del conector	
Tipo	Tornillo
Material	Acero al carbon electrogalvanizado
Modo de falla teorico	II & IIIm
Carga de diseño (kgf)	10



RESULTADOS

Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	32,70	**Carga maxima (kgf)**	67,51
Ancho (A, cm)	12,00	**Carga de fluencia (kgf)**	41,61
Espesor (E, cm)	8,10	**Deformacion maxima (mm)**	23,82
Tiempo de ensayo (min)	16,28	**Deformacion a la fluencia (mm)**	41,61

Registro previo a la prueba de falla



EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10		**Formato**	1
		Fecha	20/01/2026
		Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL		**Pagina**	19 de 20

GENERALIDADES		
Codigo de probeta	LT09	
Numero de ensayo	T2	
Geometria inicial de montaje		
Longitud (L, cm)	35,00	
Ancho (A, cm)	11,84	
Espesor (E, cm)	7,99	
Geometria del conector		
Longitud (mm)	80,0	
Diametro (mm)	6,0	
Propiedades de la madera		
Contenido de humedad (%)	<18	
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51	
Propiedades del conector		
Tipo	Tornillo	
Material	Acero al carbon electrogalvanizado	
Modo de falla teorico	II & IIIm	
Carga de diseño (kgf)	10	

RESULTADOS			
Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	31,70	**Carga maxima (kgf)**	72,3
Ancho (A, cm)	12,20	**Carga de fluencia (kgf)**	39,52
Espesor (E, cm)	8,00	**Deformacion maxima (mm)**	33,17
Tiempo de ensayo (min)	14,88	**Deformacion a la fluencia (mm)**	39,52

Registro previo a la prueba de falla



EVALUACION DE CONEXIONES CLAVADAS Y ATORNILLADAS MADERA A MADERA DE LA ESPECIE *Cedrelinga cateniformis* Ducke SOMETIDAS A CARGA LATERAL SEGÚN LAS NORMAS AWC/NDS 2018 Y NSR-10		Formato	1
		Fecha	20/01/2026
		Autores	Laura Uriza
Ensayo de compresion de conexiones de Campnosperma panamensis StandL		Pagina	20 de 20

GENERALIDADES		
Codigo de probeta	LT10	
Numero de ensayo	T2	
Geometria inicial de montaje		
Longitud (L, cm)	35,03	
Ancho (A, cm)	11,89	
Espesor (E, cm)	8,02	
Geometria del conector		
Longitud (mm)	80,0	
Diametro (mm)	6,0	
Propiedades de la madera		
Contenido de humedad (%)	<18	
Densidad anhidra (gr/cm3)	0,51	
Propiedades del conector		
Tipo	Tornillo	
Material	Acero al carbon electrogalvanizado	
Modo de falla teorico	II & IIIm	
Carga de diseño (kgf)	10	

RESULTADOS			
Geometria final de montaje		**Modo de falla observado**	
Longitudinal (L, cm)	32,40	**Carga maxima (kgf)**	67,78
Ancho (A, cm)	11,90	**Carga de fluencia (kgf)**	39,11
Espesor (E, cm)	7,90	**Deformacion maxima (mm)**	28,11
Tiempo de ensayo (min)	11,95	**Deformacion a la fluencia (mm)**	4,54

Registro previo a la prueba de falla

