Universidad de San Pablo
Escuela Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Variación en la clasificación visual de madera aserrada y su impacto en la fabricación, comportamiento mecánico y estabilidad lateral en MLE de *Campnosperma panamense* Standl. y *Acacia mangium* Willd.

César Augusto Polanco Tapia

Tesis presentada para la obtención del título de
Doctor en Ciencias. Programa: Recursos Forestales.
Opción en: Tecnología de Productos Forestales

Piracicaba
2019

César Augusto Polanco Tapia
Ingeniero Forestal

**Variación en la clasificación visual de madera aserrada y su impacto en la
fabricación, comportamiento mecánico y estabilidad lateral en MLE de
Campnosperma panamense Standl. y *Acacia mangium* Willd.**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ NIVALDO GARCIA**

Tesis presentada para obtención del título de Doctor
en Ciencias. Programa: Recursos Forestales. Opción
en: Tecnología de Productos Forestales

Piracicaba
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Polanco Tapia, César Augusto

Variación en la clasificación visual de madera aserrada y su impacto en la fabricación, comportamiento mecánico y estabilidad lateral en MLE de *Campnosperma panamense* Standl. y *Acacia mangium* Willd. / César Augusto Polanco Tapia. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2019.

319 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Madeira de plantio 2. Madeira da floresta natural 3. Defeitos na madeira
 4. Adesivos para madeira 5. Normativas para classificação de madeira 6. Normativas para testes mecânicos 7. Flambagem 8. Colômbia I. Título

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi familia, quien asumió todo el pasivo de mi ausencia durante mis estudios de doctorado,

A la memoria de mi Padre, quien me inculcó el camino de la moral y la ética,
Al Ser Divino Mayor, Quién colocó una cabeza inquieta ávida de experiencias y comprobaciones.

AGRADECIMIENTOS

A las Organizaciones:

Universidad Distrital Francisco José de Caldas,

A aquella sesión del Consejo Superior Universitario, presidida por el Alcalde de la ciudad de Bogotá, D.C, Gustavo Petro, que me otorgó la comisión de estudios,

A la Universidad de Sao Paulo- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”- ESALQ, todo su cuerpo académico, administrativo y de laboratorios

A la Escola de Engenharia de Sao Carlos- EESC, en especial a IBRAMEM y LaMEM,

A la Universidad de los Andes – CIMOC - en Bogotá, Colombia y todos sus comprometidos y amigables colaboradores

A la CAPES por los recursos económicos asignados,

A la Organización de Estados Americanos- OEA por los recursos asignados,

A Universidad de Harvard - LASPAU-, por el ánimo e interrelacionamiento en busca de un mejor país, con profesionales arraigados a su tierra y a su cultura,

A la Reforestadora Cacerí,

A la Reforestadora El Encanto, A la Reforestadora del Río,

A Maderas Aponte,

A Laminados Ripoll,

A Interquim filial de Akzo Nobel,

A las Personas:

Las que con sus gestos me llenaron de Inspiración,

A las decenas de colaboradores, más de 20, que merecen sentir este trabajo como suyo,

Especialmente a mi Orientador José Nivaldo Garcia y Co-Orientador Juan Francisco Javier Correal Daza y a los respetados miembros de la Banca evaluadora presentes tanto en la

Cualificación y en la Defensa, (necesitaron de mucha paciencia),

A mi familia,

A mis amigos.

.....Mil gracias.

SUMARIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT.....	13
RESUMEN	15
LISTA DE FIGURAS	17
LISTA DE TABLAS	23
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS.....	27
1. INTRODUCCIÓN	29
2. OBJETIVOS.....	33
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	33
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
3. ANOMALÍAS PRESENTES EN LA MADERA DE <i>Campnosperma panamense</i> Standl. Y <i>Acacia Mangium</i> Willd.....	35
RESUMEN.....	35
3.1. INTRODUCCIÓN	36
3.2. OBJETIVO	37
3.3. REVISIÓN DE LITERATURA	37
3.3.1. Singularidades del material a tener en cuenta para su categorización.....	37
3.3.2. Tamaño de las piezas.....	44
3.3.3. Diferentes reportes de clasificación para la madera.....	45
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS	48
3.4.1. Procedencia y condiciones del material.....	48
3.4.2. Cantidades evaluadas de material y procesamiento mecánico	49
3.4.3. Identificación y presentación de los tipos de anomalías en cada madera.....	50
3.4.4. Cuantificación de las anomalías en cada madera con destino a la fabricación de madera laminada encolada (MLE).....	51
3.4.5. Cálculo de la razón de resistencia RRi	52
3.4.6. Análisis estadísticos.....	54
3.5. RESULTADOS.....	55
3.5.1. Anomalías presentes en un lote de madera de <i>Campnosperma panamense</i> Standl. después de seccionarse y clasificarse en longitud con destino a la fabricación de MLE	60
3.5.2. Anomalías presentes en un lote de madera de <i>Acacia mangium</i> Willd. posterior a la salida de la cámara de secado y sin seccionar en longitud con destino a la fabricación de MLE.....	61
3.5.3. Valores de la razón de resistencia (RRi) para cada caso	63
3.5.4. Análisis de los resultados.....	66

3.6. CONCLUSIONES	69
3.7. RECOMENDACIÓN	70
REFERENCIAS.....	72
4. REPORTE DE LA OBTENCIÓN DE MLE EN COLOMBIA CON ÉNFASIS EN DOS EMPRESAS NACIONALES.....	77
RESUMEN.....	77
4.1. INTRODUCCIÓN	77
4.2. METODOLOGÍA.....	79
4.2.1. Inventario de empresas	79
4.2.2. Selección de empresas	79
4.2.3. Descripción de los procesos de maquinado	79
4.2.4. Observaciones.....	80
4.3. RESULTADOS.....	80
4.4. CONCLUSIONES	91
REFERENCIAS.....	92
ANEXO A.....	94
5. REPORTE DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA DE <i>Campnosperma panamense</i> Standl. Y <i>Acacia mangium</i> Willd. PROCEDENTES DE COLOMBIA.....	103
RESUMEN.....	103
5.1. INTRODUCCIÓN	104
5.2. INFORMACIÓN SECUNDARIA DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LAS ESPECIES UTILIZADAS	106
5.3. MATERIALES Y MÉTODOS	107
5.3.1. Obtención del material	107
5.3.2. Preparación del material y acondicionamiento de las muestras	109
5.3.3. Ejecución de los ensayos	111
5.3.4. Descripción de los equipos	111
5.4. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	112
5.5. RESULTADOS.....	113
5.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	114
5.7. CONCLUSIONES	119
REFERENCIAS.....	120
6. MÉTODO BASADO EN VIBRACIÓN TRANSVERSAL PARA CLASIFICACIÓN DE <i>Campnosperma panamense</i> Standl. DESTINADO A LA ELABORACIÓN DE MLE.....	125
RESUMEN.....	125
6.1. INTRODUCCIÓN	125
6.2. METODOLOGÍA.....	126

6.2.1. Procedencia	126
6.2.2. Maquinado	126
6.2.3. Obtención de probetas.....	127
6.2.4. Programa BING y ejecución del ensayo.....	129
6.2.5. Pruebas destructivas	129
6.2.6. Análisis estadístico de la información.....	130
6.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	130
6.4. CONCLUSIONES	138
REFERENCIAS.....	139
7. CLASIFICACIÓN DE <i>Campnosperma panamense</i> Standl. CON DESTINO A LA FABRICACIÓN DE MLE USANDO TÉCNICAS VISUALES TRADICIONALES (TVT) Y DE VIBRACIÓN TRANSVERSAL (NDT)	143
RESUMEN.....	143
7.1. INTRODUCCIÓN	143
7.2. METODOLOGÍA.....	145
7.2.1. Procedencia de la madera	145
7.2.2. Características de los bosques de Sajo.....	145
7.2.3. Transformación del material	146
7.2.4. Clasificación de las piezas.....	147
7.2.5. Pruebas no destructivas por vibración transversal	148
7.2.6. Análisis estadístico.....	150
7.3. RESULTADOS.....	150
7.3.1. Clasificación visual	150
7.3.2. Módulo de Elasticidad Dinámico (MoEd) para la prueba de flexión estática	152
7.3.3. Diferencia entre los módulos elásticos.....	152
7.3.4. Dependencia entre MoEd y Dsa a través de modelos de correlación y regresión	153
7.4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	154
7.5. CONCLUSIONES	157
REFERENCIAS.....	159
8. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE TABLEROS LAMINADOS COLADOS DE <i>Acacia mangium</i> Willd. FABRICADOS EN COLOMBIA	163
RESUMEN.....	163
8.1. INTRODUCCIÓN	163
8.2. METODOLOGIA.....	165
8.2.1. Obtención de la madera	165
8.2.2. Fabricación de los tableros laminados	166

8.2.3. Obtención de las muestras	167
8.2.4. Testeo del material	168
8.2.5. Análisis de la información	171
8.3. RESULTADOS.....	171
8.4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	174
8.5. CONCLUSIONES	177
REFERENCIAS.....	177
9. REPORTE DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA LAMINADA ENCOLADA (MLE) FABRICADA CON LAS ESPECIES <i>Campnosperma panamense</i> Standl. y <i>Acacia mangium</i> Willd.	179
RESUMEN.....	179
9.1. INTRODUCCIÓN	180
9.2. OBJETIVO	181
9.3. REVISION DE LITERATURA	181
9.3.1. Clasificación por resistencia de la madera.....	181
9.3.2. Cálculo del momento de inercia	185
9.3.3. Cálculo de la sección transversal transformada.....	186
9.4. MATERIALES Y MÉTODOS	189
9.4.1. Obtención de la madera para las pruebas mecánicas	189
9.5. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS PARA LA MLE	190
9.5.1. Prueba de flexión estática apoyado en los extremos y dos cargas centralizadas	192
9.5.2. Módulo de elasticidad local.....	197
9.5.3. Módulo de elasticidad global	198
9.5.4. Módulo de corte (G).....	198
9.5.5. El Esfuerzo en flexión	199
9.5.6. Análisis de fallas.....	200
9.6. PRUEBA DE TENSIÓN PARALELA	200
9.6.1. Módulo de elasticidad en tensión paralela al grano.....	202
9.6.2. Esfuerzo en tensión paralela al grano	202
9.7. PRUEBA DE COMPRESIÓN PARALELA	203
9.7.1. Módulo de elasticidad en compresión paralela al grano	203
9.7.2. Esfuerzo en compresión paralela al grano	204
9.8. PRUEBA COMPRESIÓN PERPENDICULAR AL GRANO	204
9.8.1. Módulo de elasticidad en compresión perpendicular al grano	205
9.8.2. Esfuerzo de compresión perpendicular al grano	206
9.9. ESFUERZO DE TENSIÓN PERPENDICULAR AL GRANO.....	207

9.10. PRUEBA DE CIZALLAMIENTO	208
9.11. RESULTADOS.....	210
9.11.1. Cálculo de los factores de la sección transversal transformada debidos a la combinación de tres grados de lamelas, dos sistemas de clasificación y dos especies.....	210
9.11.2. Resultados del esfuerzo en flexión estática de la MLE para dos especies y dos tipos de clasificación.....	212
9.11.3. Resultados del esfuerzo en tensión paralela de la mle para especie, normativa y posición de las probetas	215
9.11.4. Resultados del esfuerzo en compresión paralela de la MLE para especie, normativa y posición de las probetas	219
9.11.5. Resultados del esfuerzo en compresión perpendicular de la mle para especie y normativa de las probetas.....	221
9.11.6. Resultados del esfuerzo en tensión perpendicular de la mle para especie y normativa...	223
9.11.7. Resultados del esfuerzo en cizallamiento de la MLE para especie y normativa	224
9.12. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	226
9.12.1. Grados de calidad propuestos.....	226
9.12.2. Delaminación en las vigas de Acacia.....	227
9.12.3. Reporte propiedades mecánicas de las maderas	231
9.12.4. Análisis de fallas.....	234
9.13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	236
REFERENCIAS.....	237
10. ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD LATERAL EN MADERAS DE <i>Campnosperma panamense</i> Standl. y <i>Acacia mangium</i> Willd.....	245
RESUMEN.....	245
10.1. INTRODUCCIÓN	245
10.2. ABORDAJE DEL PANDEO LATERAL	249
10.2.1. Generalidades	249
10.2.2. Teoria de pandeo lateral para vigas de Timoshenko	250
10.2.3. Adaptación de la fórmula original de M_{cr} de Timoshenko al caso de madera (AWC)	251
10.2.4. Enunciados de las diferentes normativas internacionales referentes al pandeo lateral	251
10.2.5. Caso específico de Metsä.....	258
10.3. DETERMINACIÓN DE LA INFORMACIÓN PREVIA Y DEFINICIONES IMPORTANTES PARA EL CAPÍTULO	259
10.3.1. Especies	259
10.3.2. Normas de clasificación del material y grados visuales	259
10.3.3. Cálculo del número de contraventamientos para cada normativa estudiada	260
10.3.4. Función de convolución	260

10.4. DISEÑO EXPERIMENTO	261
10.4.1. Cantidad de tratamientos y número de ensayos	264
10.4.2. Montaje para cada fase	264
10.4.3. Procesamiento de la información.....	265
10.4.4. Procesamiento de los datos referentes a las aceleraciones para identificar la carga crítica de pandeo (P_{cr}) del experimento	271
10.4.5. Modelamiento de la inestabilidad lateral en vigas a escala real de acacia y Sajo usando el programa ABAQUS/CAE	274
10.5. RESULTADOS.....	283
10.5.1. Carga crítica de pandeo por normativa	283
10.5.2. Cargas y momentos críticos de pandeo para los 172 experimentos ejecutados y respuesta en los principales sensores de desplazamiento.	284
10.5.3. Resultados del diseño estadístico experimental (MANOVA y análisis de componentes principales)	287
10.5.4. Análisis de varianza multivariado (MANOVA).....	289
10.5.5. Momentos críticos obtenidos en la experimentación versus Momentos críticos calculados por la teoría de Timoshenko ajustada por el AWC	290
10.5.6. Modelación computacional del experimento en ABAQUS.....	295
10.5.7. Modos de pandeo.....	297
10.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	301
10.6.1. Análisis de las cargas críticas de pandeo para una viga de la especie <i>Campnosperma panamense</i> Standl. y el sistema de clasificación por CP.....	303
10.6.2. Análisis de las cargas críticas del experimento con contraventamientos relajados	305
10.7. CONCLUSIONES	306
10.8. RECOMENDACIONES	307
REFERENCIAS.....	309

RESUMO

Variação na classificação visual da madeira serrada e seu impacto na fabricação, comportamento mecânico e estabilidade lateral na MLE de *Campnosperma panamense* Standl. e *Acacia mangium* Willd.

A madeira laminada colada (MLC) é considerada uma alternativa para incentivar o uso de madeira como matéria-prima em países em desenvolvimento. Apesar de atualmente existirem produtos como CLT e similares, nossos países devem fazer um grande esforço para dispor massivamente esses produtos na construção civil, bem como mudanças na legislação, assim como nas normas técnicas e especializadas, além de produzir material competitivo para o mercado. É necessário desenvolver produtos de fácil produção e fabricação local a médio e curto prazo, como a MLC. Um bom início consiste em alguns experimentos locais com MLC, realizados em conjunto com clientes, projetistas, instaladores, fabricantes e fornecedores de materiais. Outro importante fator é a maior consciência do mercado sobre as vantagens no uso de madeira e seu menor impacto ambiental. No entanto, ainda é necessária uma maior participação no mercado especializado, que permite maior contato com o cliente, e que seria alcançado com a produção de produtos em série que podem ser facilmente colocados em lojas de varejo e possivelmente com algum grau de personalização. Contribuindo nesse caminho, o presente estudo aborda detalhes na construção de vigas laminadas em escala industrial e sua caracterização mecânica estrutural, enfatizando o conceito de estabilidade e flambagem. Para este propósito, as normas nacionais e internacionais (Brasil, Chile, EUA, Europa) foram utilizadas, sendo as bases que permitiram a consolidação de toda a pesquisa. Situações comparáveis foram utilizadas em toda a pesquisa, os fios condutores da pesquisa foram. Primeiro, o uso de duas espécies com potencial futuro na Colômbia como o Sajo (*Campnosperma panamense* Standl.) e a Acácia (*Acacia mangium* Willd.). O Sajo faz parte de uma grande área de florestas naturais do Pacífico colombiano suscetível de manejo florestal sustentável (MFS) e Acácia teve alta aceitação entre o reflorestamento do país seu rápido crescimento, ciclo curto e alta expectativa financeira. Segundo, uma modificação na regulamentação colombiana em relação à classificação visual da madeira, que está no país há mais de 35 anos, e a critério do autor, tornou-se um grande obstáculo para o uso na construção civil, uma vez que seu rigor incentiva a rejeição de grandes volumes para uso estrutural, ignorando essa madeira por ser um material de origem natural, deve ser gerenciado, além de rejeitado, e que traz consigo uma maior responsabilidade em seu conhecimento para atribuir seu melhor uso. No mundo moderno, embora persista, a discriminação tende a desaparecer, então por que não dar uma oportunidade de madeira e coexistir com suas 'desvantagens'? De outra parte, a filosofia de controlar lateralmente a estabilidade do VLC surge da premissa de aumentar os momentos de inércia ao seu limite máximo, fazendo a madeira exibir todo o seu potencial como um feixe, alcançando valores mais altos de carga vertical, transformando-o em um produto mais atraente para a construção civil.

Palavras-chave: Madeira de plantio; Madeira da floresta natural; Defeitos na madeira; Adesivos para madeira; Normativas para classificação de madeira; Normativas para testes mecânicos; Flambagem; Colômbia

ABSTRACT

Variation of visual grade classification of sawn timber and its impact on the industry, mechanical behavior and lateral stability of *Campnosperma panamense* Standl. and *Acacia mangium* Willd. GLULAM

GLULAM represents an alternative to expand the use of wood raw materials in developing countries. Although currently have booming products such as CLT and the like, our countries must still make a major effort to provide massive scale of these products in the civil construction, they must expect changes in legislation, as well as technical regulations specialized, and generate business capabilities for commercial offer. Closer seems to be the raid of products with local manufacturing feasibility in the medium and short term as the glued laminated timber. For begin good, we have some local experiences with GLULAM, which have worked together customers, installers, designers, manufacturers and suppliers of raw materials and supplies. Another advantage is the market that currently has greater awareness of the advantages in the use of wood and its environmental contribution. However, it takes a greater share of the detailed market, would be allowing more contact with the customer, and that would be achieved without any doubt with the development of serial products that can be easily placed in retail outlets and possibly with some degree of customization. Contributing in this way, this study addresses details on the construction of laminated beams (VLC) to real scale and the mechanical structural characterization, emphasizing the concept of lateral stability, buckling or tipping. For this, has been consulted national and international standards (Brazil, Chile, USA, Europe, Canada, UK, India), enabling the consolidation of all research. The work propose in all cases, two comparable situations. The first is the use of two species with future potential in Colombia as the Sajo (*Campnosperma panamense* Standl.) and Acacia (*Acacia mangium* Willd.). The Sajo is part of a large expanse of natural forests Colombian Pacific with Sustainable Forest Management (SFM) potential, and Acacia has high acceptance among reforestation companies of the country for its rapid growth, short rotation and high financial expectation. The second, a change in relation to the law visual classification of wood, which has more than 35 years in the country, and at the discretion of the author, rather than a promoter for use in building has been a major obstacle, as its stringency favors rejection of large volumes for structural use, ignoring which the wood is a natural material, and must be administered rather than rejected. This brings with it a greater responsibility on their knowledge to assign their best use. In the modern world, although persists, discrimination tends to disappear, then why not give it a chance to the wood and coexist with their "disadvantages" ?. Moreover, the philosophy of controlling lateral stability of the VLC arises from the premise of increasing the moment of inertia to its maximum limit, with achieving values highest in the vertical load, making the VLC a more attractive and competitive product for civil construction.

Keywords: Plantations wood; Natural forest wood; Defects in wood; Adhesives for wood; Standards for wood classification; Standards for mechanical tests; Buckling; Colombia

RESUMEN

Variación en la clasificación visual de madera aserrada y su impacto en la fabricación, comportamiento mecánico y estabilidad lateral en MLE de *Campnosperma panamense* Standl. y *Acacia mangium* Willd.

La madera laminada encolada (MLE) representa una alternativa para masificar el uso de materias primas madereras en los países en vía de desarrollo. A pesar que en la actualidad tienen auge productos como el CLT y similares, nuestros países deben todavía hacer un esfuerzo mayúsculo para disponer masivamente de estos productos en las obras civiles, pues deben esperar cambios en la legislación, así como en la normatividad técnica especializada, además de generar capacidades comerciales para la oferta mercantil. Más cerca parece estar la incursión de productos con factibilidad de fabricación local en el mediano y corto plazo, como la MLE. Una buena cuota inicial la constituyen algunas experiencias locales con MLE, donde han trabajado de manera conjunta clientes, diseñadores instaladores, fabricantes y proveedores de materias primas e insumos. Otra, es el mercado que en la actualidad tiene mayor conciencia sobre las ventajas en el uso de la madera y su contribución ambiental. No obstante, hace falta una mayor participación en el mercado detallado, que permita mayor contacto con el cliente, y eso se lograría sin duda alguna con la elaboración de productos en serie que puedan ser colocados fácilmente en los puntos de venta minoristas y posiblemente con algún grado de *customization*. Aportando en ese camino, el presente estudio aborda detalles en la construcción de vigas laminadas (VLC) a escala real y su caracterización mecánica estructural enfatizando en el concepto de estabilidad, pandeo o vuelco lateral. Para ello se han consultado los estándares nacionales e internacionales (Brasil, Chile, EUA, Europa, Canadá, Reino Unido, India), que han permitido la consolidación de toda la investigación. Como hilo conductor se propone en todos los casos dos situaciones comparables. La primera, es el uso de dos especies con futuro potencial en Colombia como el Sajo (*Campnosperma panamense* Standl.) y la Acacia (*Acacia mangium* Willd.). El Sajo hace parte de una gran extensión de los bosques naturales del pacífico colombiano susceptible de Manejo Forestal Sostenible (MFS) y la Acacia ha tenido alta aceptación entre los reforestadores del país por su rápido crecimiento, corta rotación y alta expectativa financiera. La segunda, una modificación en la normatividad colombiana referente a la clasificación visual de la madera, la cual lleva más de 35 años en el país, y a criterio del autor, más que un promotor para el uso en la construcción ha sido un gran obstáculo, ya que su rigurosidad propicia el rechazo de grandes volúmenes para uso estructural, ignorando que la madera por ser un material de origen natural, debe ser gerenciada, más allá de rechazada; y eso trae consigo una mayor responsabilidad en su conocimiento para asignar su mejor uso. En el mundo moderno, aunque persiste, la discriminación tiende a desaparecer, entonces ¿por qué no darle una oportunidad a la madera y convivir con sus “desventajas”? De otra parte, la filosofía de controlar lateralmente la estabilidad de las VLC surge de la premisa de aumentar los momentos de inercia

hasta su máximo límite, haciendo que la madera exhiba todo su potencial como viga, logrando los mayores valores de carga vertical, convirtiéndola de paso en un producto más atractivo para la construcción civil.

Palabras clave: Madera de plantaciones; Maderas de bosque natural; Defectos en la madera; Adhesivos para madera; Normas de clasificación de madera; Pruebas mecánicas; Pandeo; Colombia

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Lotes de madera finalmente evaluada para <i>Campnosperma panamense</i> Standl.: 35 paquetes con 81 cm de largo (A), tablas completas con longitud de 290 cm (B). Una de las dos estibas de <i>Acacia mangium</i> Willd. del Noroccidente después de la salida de la cámara de secado, longitud de la estiba 250 cm (C) y <i>Acacia mangium</i> Willd. plantada en el Oriente colombiano con una longitud total de 230 cm (D).	51
Figura 3.2 - Diagramas de caja y bigote para la variable X_i presente en cada tipo de madera evaluada por especie (A) y por tercio (B) y evaluación conjunta de (especies + procedencias) x tercios (C).	66
Figura 3.3 - Presencia de hongos de pudrición de duramen en madera de <i>A. mangium</i> plantada en los Llanos Orientales de Colombia. Ataque incipiente de hongos de pudrición blanca en forma de puntos en la superficie de madera (flechas rojas) (A). Combinación de hongos de manchado (flecha azul) con hongos de pudrición (flecha roja) (B). Ataque previo de hongos de pudrición con posterior alojamiento de termitas, la foto muestra la galería (flechas rojas) (C). Imagen del mismo árbol, con madera aparentemente sana a la altura del suelo (lado izquierdo) y madera con pudrición parda (flecha amarilla) y blanca (flecha roja) a una altura de 330 cm desde el suelo, en la zona de bifurcación (Lado derecho) (D).	68
Figura 4.1 - Algunas estructuras en MLE instaladas en Colombia: Pabellón Corferías - Bogotá, D.C. (A). Parque Ukumarí - Pereira (B). Iglesia - Bogotá, D.C. (ARQUITECTOS, 2017) (C). Parque ARVI - Medellín (D). Caja de madera - Medellín (E). Iglesia - Medellín (F). Hotel - Medellín (G). Cámara de Comercio de Bogotá - Bogotá D.C (H).	83
Figura 4.2 - Imágenes de los procesos principales en la obtención de MLE: Fuentes Materia Prima (A)*. Trozas en patio (B). Aserrió (C)*. Secado en cámara (D). Traslado al área de MLE (E). Clasificación (F). Homogenización dimensiones (G). Dimensionamiento longitud (H). <i>Finger joint</i> (I). <i>Finger joint</i> (J). Fraguado lamelas (K). Homogenización espesor (L). Encolado caras (M)*. Prensado neumático (N). Prensado manual (O)*. Transporte (P)*. Algunas tomadas directamente por el autor y las marcadas con "*" obtenidas de (POLANCO, 2007; WOODMIZER, 2017)	89
Figura 4.3 - Valores de resistencia en la línea de cola para la madera de <i>Acacia mangium</i> Willd. (A) y <i>Campnosperma panamense</i> Standl. (B) La línea azul indica la clasificación por NSR-10 y la línea verde por Clasificación Propuesta-CP. Todos los valores en MPa.	96
Figura 4.4 - Valores de resistencia en la línea de cola para la madera de <i>Acacia mangium</i> Willd. (Línea Azul) y <i>Campnosperma panamense</i> Standl. (Línea Verde). A la izquierda las piezas clasificadas por la NSR-10 (A) A la derecha la madera verificada con la Clasificación Propuesta (CP). Todos los valores en MPa (B).	96
Figura 5.1 - Vista general en Buenaventura, Valle del Cauca, Colombia (A) y detallada en la ciudad de Bogotá, D.C. (B) de la madera adquirida de <i>Campnosperma panamense</i> para la realización de los ensayos.	108
Figura 5.2 - Piezas y árboles de <i>Acacia mangium</i> obtenidos de la región Noroccidental de Colombia (A) y de los Llanos Orientales (B).	108
Figura 5.3 - Vista general de la madera laminada encolada (MLE) de <i>Campnosperma panamensis</i> (A) y <i>Acacia mangium</i> del Noroccidente del país (B). En sendos casos la porción cuadrículada tiene 250 cm.	109
Figura 5.4 - Obtención de la madera de <i>Acacia mangium</i> proveniente de los Llanos Orientales: (A) Árboles en pie, (B) Aserrió de la madera en Bogotá, D.C., (C) Acondicionamiento de las probetas en la carpintería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.	110

Figura 5.5 - Vista general de los equipos utilizados para la determinación de las propiedades mecánicas. Máquina Universal Cotenco con capacidad hasta 30 t en LEMAD ESALQ-USP (A). Máquina Universal Tritech con capacidad hasta 10 t en el CIMOC Universidad de los Andes (B) y Material Test System (MTS) con capacidad hasta 100 t en el CIMOC (C).....	112
Figura 6.1 - Montaje de referencias para NDT usando el programa BING (A). Prueba de flexión longitudinal con probetas de 410 x 25 x 25 mm ³ de la especie <i>C. panamense</i> (B).....	130
Figura 6.2 - Diagrama de caja y bigote para el módulo de elasticidad dinámico (A). Densidad seca al aire (B).....	133
Figura 6.3 - Módulo de elasticidad dinámico para cada tamaño de probetas y grado de calidad (A). Densidad seca al aire para cada tamaño de probetas y grado de calidad (B).	135
Figura 6.4 - Piezas de <i>C. panamense</i> de 800 mm de longitud clasificadas como grado C.....	138
Figura 7.1 - Ejemplos seleccionados al azar de piezas pertenecientes a las calidades: calidad A (A), calidad B (B) y calidad C (C).	151
Figura 8.1 - Fotos de los cuerpos de prueba para cizallamiento (A) y para flexión estática (B).	167
Figura 8.2 - Detalle de la prueba de flexión estática en la máquina universal. En el lado izquierdo se visualiza encoder externo.	169
Figura 8.3 - Valores típicos de carga (Kgr) vs deformación (cm) para una probeta de 1.8 cm (línea verde). Encoder externo: Línea roja, Encoder interno: Línea azul.	169
Figura 8.4 - Valores de resistencia en la prueba de flexión estática (Kg.cm ⁻²): Módulo de Elasticidad (E) (A y C) y Resistencia Máxima (MoR) (B y D).	173
Figura 8.5 - Valores de resistencia en la prueba de Cizallamiento (Kg.cm ⁻²): para tres espesores (1=1.0 cm, 2=1.5 cm, 3=1.8 cm) (A) y para Línea de Cola (LC) (1) y para Madera Maciza (M) (B).....	174
Figura 8.6 - Imagen de probetas después de ser sometidas al esfuerzo en flexión estática: la flecha señala la hendidura formada en la zona de compresión en FJ horizontal en madera de 1.5 cm (A) y en la zona de tracción en FJ vertical en madera de 1.8 cm (B).....	175
Figura 9.1 - Detalle de una sección transversal con centro de gravedad en el centro geométrico de la pieza.	185
Figura 9.2 - Detalle de la equivalencia de la sección transversal en una pieza con tres grados de material. Sección original (A), representación de su sección transformada (B).	187
Figura 9.3 – Esquema de la disposición de las lamelas en una viga típica de madera laminada encolada de <i>Camposperma panamense</i> Standl.....	190
Figura 9.4 - Disposición Muestreo del material en cada viga laminada colada (VLC=MLE). Los espacios en color obedecen a cuerpos de prueba a ser retirados para las pruebas de calidad y resistencia. El área clara central corresponde a la posible influencia de grietas y rajaduras durante la rotura.....	191
Figura 9.5 - Descripción de la forma de apoyo y las dimensiones en la prueba de flexión estática para la MLE. Fuente: (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004).....	192
Figura 9.6 - Descripción del montaje para la prueba de flexión estática en cuatro puntos, con limitación del pandeo lateral usando cuatro contraventamientos, CIMOC, Universidad de los Andes, Bogotá D.C, Colombia. Convenciones: 1,2: Actuadores 35 t, 3: Futek de 5t, 4: Tedeo 5t, 5,6,7,8: Contraventamientos Laterales con rodillos, 9,10: LVDT's Extremos superiores, 11,12: LVDT's Laterales izquierda y derecha, 13,14: Láseres desplazamiento vertical eje neutro, 15: Láser desplazamiento vertical canto central, 16,17: LVDT's Inferiores izquierda y derecha, 18: LVDT Lateral central superior, 19: LVDT Lateral central inferior, 20: MLE de 7500 x 500 x 50 mm ³ y 21: Marco de Carga.	194

Figura 9.7 - Detalle del tipo de articulaciones provistas en los actuadores usados en la prueba de flexión estática: La rótula superior permite el desplazamiento lateral, ortogonal al plano de la viga (A). El accesorio de la parte inferior permite la adaptación a la curvatura de la viga durante la aplicación de cargas (B).....	197
Figura 9.8 - Forma y dimensiones del cuerpo de prueba usado en tensión paralela para Sajo (A) y acacia (B). Para medir las deformaciones se usaron un par de extensómetros MTS con 100 mm de separación entre puntas.....	201
Figura 9.9 - Sistema de adquisición de datos del MTS: vista general (A) y detalle del tablero de mando (B).....	202
Figura 9.10 - Forma y dimensiones del cuerpo de prueba usado en compresión paralela para Sajo (A) y Acacia (B).....	203
Figura 9.11 - Forma y dimensiones previstas antes del ensayo, del cuerpo de prueba, usado en compresión perpendicular para Sajo y acacia (A) y principio de la prueba (B). Fuente: ISO EN 408. .	205
Figura 9.12 - Diagrama carga deformación para la prueba de compresión perpendicular. Fuente: ISO EN 408.	206
Figura 9.13 - Forma y dimensiones durante el ensayo de compresión perpendicular para Sajo (A) y Acacia (B). Fuente: ISO EN 408.....	207
Figura 9.14 - Esquemmatización del montaje de la pieza en la prueba de tracción perpendicular. Los números 1 y 2 se refieren a los tipos de apoyo móvil y fijo, respectivamente. Fuente: ISO/FDS 13910.	207
Figura 9.15 - Montaje en el equipo Trittech para la prueba de tracción perpendicular de madera laminada encolada (MLE) en <i>Campnosperma panamense</i> (A) y <i>Acacia mangium</i> (B).	208
Figura 9.16 - Esquemmatización del montaje de la pieza en la prueba de cizallamiento paralelo. Los números 1 y 2 se refieren a los tipos de apoyo móvil y fijo, respectivamente. Fuente: ISO/FDS 13910.	209
Figura 9.17 - Montaje en el equipo Trittech para la prueba de cizallamiento paralelo de madera laminada encolada (MLE). Madera de <i>Campnosperma panamense</i> (A). Madera de <i>Acacia mangium</i> (B).....	209
Figura 9.18 - Diagrama de cargas vs deformación para las Vigas de Acacia identificadas como S4 (A) y V4 (B). En la línea roja se colocó el promedio de la deformación del tercio central, en su canto inferior y con la línea negra, la deformación del canto superior en sus extremos.	228
Figura 9.19 - Evidencia de falla por cortante en la dirección del eje principal de la viga S4 de Acacia del presente estudio (A), la flecha hace referencia a la dirección del esfuerzo cortante y su grosor indica la intensidad. Falla de la viga por cortante en la dirección perpendicular al plano de pandeo en otra experiencia con <i>E. grandis</i> W. Mill ex Maiden (B).	229
Figura 9.20 – Fallas ocurridas para cada una de las vías de este estudio, Vigas A, B, C, D, E, y G pertenecientes a la especie <i>Campnosperma panamense</i> Standl. Vigas S y V fabricadas con la especie <i>Acacia mangium</i> Willd. Viga A: Falla por dos cargas verticales (A), Viga B: Falla por dos cargas verticales (B), Viga C: Falla por Pandeo Lateral en dos cargas verticales (C), Viga D: Falla por Pandeo Lateral en dos cargas verticales (D), Viga C: Falla por Pandeo Lateral en dos cargas verticales (E), Viga D: Falla por Pandeo Lateral en dos cargas verticales (F), Viga E: Falla por Pandeo Lateral en dos cargas verticales (G), Viga G: Falla por Pandeo Lateral en dos cargas verticales, primero posición derecha (H), Viga S: Falla por Delaminación (I) y Viga V: Falla por Delaminación (J)	236
Figura 9.21 - Cargas y deformaciones Fase IV Viga A4	241
Figura 9.22 - Cargas y deformaciones Fase IV Viga B4	241

Figura 9.23 - Cargas y deformaciones Fase IV Viga C4.....	241
Figura 9.24 - Cargas y deformaciones Fase IV Viga D4.....	242
Figura 9.25 - Cargas y deformaciones Fase IV Viga E4	242
Figura 9.26 - Cargas y deformaciones Fase IV Viga G4.....	242
Figura 9.27 - Cargas y deformaciones Fase IV Viga S4.....	243
Figura 9.28 - Cargas y deformaciones Fase IV Viga V4.....	243
Figura 9.29 - Reporte temperatura diaria en la Sabana de Bogotá en la semana del 08 de febrero del año 2017, días anteriores y promedio últimos años (IDEAM, 2017)	244
Figura 10.1 - Práctica de colocación de trabas en la zona de compresión de la madera sometida a esfuerzos de flexión estática (A). Procedimiento aplicado a vigas completamente arriostradas en el canto de compresión.....	248
Figura 10.2 - Ejemplo de la aplicación de la función de convolución en el software Matlab 2015b. A la izquierda para una celda de carga de 5 t (A), a la derecha para un lector láser (B).	261
Figura 10.3 - Esquema del diseño del Tratamiento 12, dos actuadores y cuatro cargas con cuatro pares de trabas o contraventamientos (Izquierda). Detalle de una traba o contraventamiento lateral (Derecha). Todo el Sistema fue construido especialmente para la presente investigación por la empresa Mecanizados López y montado en el CIMOC de la Universidad de los Andes en la ciudad de Bogotá, D.C.....	263
Figura 10.4 - Detalle de la instrumentación usada en la realización de los diferentes ensayos. De izquierda a derecha Futek 5 t, Celda tipo Donut 5 t, LVDT's 0 - 50 y 0 - 100 mm, Láser 150 mm.	265
Figura 10.5 – Montaje real de una viga de MLE para la Fase I. Los números indican el tipo y la ubicación de cada uno de los instrumentos usados.....	267
Figura 10.6 – Montaje real de una viga de MLE para la Fase II. Los números indican el tipo y la ubicación de cada uno de los instrumentos usados.....	268
Figura 10.7 – Montaje real de una viga de MLE para la Fase III. Los números indican el tipo y la ubicación de cada uno de los instrumentos usados.....	269
Figura 10.8 – Montaje real de una viga de MLE para la Fase IV. Los números indican el tipo y la ubicación de cada uno de los instrumentos usados.....	270
Figura 10.9 – Representación del conjunto de gráficas obtenido con el programa MatLab para un solo paquete de datos de los 172 posibles.	271
Figura 10.10 – Manifestación de algunos tipos contrastantes de aceleración en los ensayos.	272
Figura 10.11 – Algunas formas de aceleración en LVDT's para 0, 1, 2 y 4 contraventamientos, identificados con las letras a, b, c, y d, respectivamente.	273
Figura 10.12 – Modelación realizada en ABAQUS/CAE.....	275
Figura 10.13 – Modelación realizada en ABAQUS/CAE para la madera	276
Figura 10.14 – Condiciones de apoyo en los extremos de la viga (a) e intermedios para el contraventeo (b) en ABAQUS/CAE.	277
Figura 10.15 – Colocación de las Cargas en el Modelo.....	278
Figura 10.16 – Colocación de las Cargas en la Modelación	278
Figura 10.17 – Colocación Tipo de elemento usado en la función Mesh	280

Figura 10.18 – Simplificación de una viga simplemente apoyada para determinar su matriz de rigidez	281
Figura 10.19 – Carga Crítica de Pandeo según tres normativas que lo contemplan en su diseño, para una viga de MLE de Sajo de dimensiones 7500 x 500 x 50 mm ³	284
Figura 10.20 – Momentos críticos para dos especies y dos normativas. Todos los casos. Ratio promedio:1,45.....	291
Figura 10.21 – Especie <i>Acacia mangium</i> Willd. con clasificación NSR-10. Ratio promedio: 1,38.....	292
Figura 10.22 – Especie <i>Acacia mangium</i> Willd. con Clasificación Propuesta- CP. Ratio promedio: 1,18.....	292
Figura 10.23 – Especie <i>Campnosperma panamense</i> Standl. con clasificación NSR-10. Ratio promedio: 1,68	293
Figura 10.24 – Especie <i>Campnosperma panamense</i> Standl. con Clasificación Propuesta- CP. Ratio promedio: 1,59.....	294
Figura 10.25 – Cálculo de diferentes situaciones citadas en el NDS 2018, con formulaciones genéricas y comparación con los datos experimentales. Ratio promedio: 1,69	302
Figura 10.26 – Cálculo de diferentes situaciones citadas en el NDS 2018, con formulaciones específicas y comparación con los datos experimentales. Ratio promedio: 1,45.....	302
Figura 10.27 – Cálculo de diferentes situaciones no citadas en el NDS 2018, con formulaciones genéricas y comparación con los datos experimentales. Ratio promedio: 1,67	303
Figura 10.28 –Viga de <i>Campnosperma panamense</i> Standl. sometida a rotura en la FASE IV e indicaciones de las Cargas Críticas de Pandeo (<i>P_{cr}</i>) en diferentes momentos, como una medida que demuestra Relajación de los Contraventamientos durante la Experimentación en las Fases I, II y III. Desplazamiento vertical -1 a 50 mm (A). Desplazamiento vertical -1 a 5 mm (B).	304
Figura 10.29 – Valores de Momento Crítico de Pandeo en dos tratamientos con igual configuración en madera de <i>Campnosperma panamense</i> Standl. clasificado previamente según la NSR-10 (a) y el Sistema de Clasificación Propuesta – CP (b). Color azul: <i>M_{cr}</i> por NDS, Color naranja: <i>M_{cr}</i> experimento	305
Figura 10.30 – Un actuador y un contraventamiento: Tratamiento 2	312
Figura 10.31 – Dos actuadores, dos puntos de aplicación de carga y dos contraventamientos: Tratamiento 7 (En este caso finalmente se usaron dos actuadores cada uno con su propia celda de carga, lo mostrado en el esquema obedece a la idea original)	312
Figura 10.32 – Dos actuadores, cuatro puntos de aplicación de carga y cuatro contraventamientos: Tratamiento 12	312
Figura 10.33 – Casos de cargas distribuidas y puntuales y formas de contraventamiento que determinan el valor de <i>lv</i> (<i>lu</i>).....	314

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 – Razones de resistencia para tensiones básicas de flexión y compresión paralela de elementos fabricados con madera aserrada clasificada mecánicamente.	39
Tabla 3.2 – Valores de n y QP encontrados experimentalmente	40
Tabla 3.3 – Clasificación visual de la madera de Coníferas UNE 56544 de 2011	46
Tabla 3.4 – Tolerancia de la Madera Aserrada para Uso Estructural en Colombia	47
Tabla 3.5 – Cantidades evaluadas del material para tipificación de anomalías, cuantificación de defectos y clasificación de la madera para los procesos subsiguientes.	50
Tabla 3.6 – Datos para evaluar la razón $R_i = IKIG$ en pino radiata.....	53
Tabla 3.7 – Factores a usar en el cálculo $R_i = IKIG$ según la distribución característica de los nudos y el número de lamelas que conforma el laminado	54
Tabla 3.8 – Reporte Visual de las anomalías encontradas en las especies de <i>Campnosperma panamense</i> Standl. y <i>Acacia mangium</i> Willd.	55
Tabla 3.9 – Material descartado de madera de <i>C. panamense</i> para la fabricación de MLE y porcentaje de participación de cada una de las causas.	61
Tabla 3.10 – Porcentaje ordenado de aparición de las principales anomalías en la madera de <i>Acacia mangium</i> Willd. del Noroccidente del país.....	62
Tabla 3.11 – Material descartado de madera de <i>A. mangium</i> para la fabricación de MLE y porcentaje de participación de cada una de las causas.	63
Tabla 3.12 – Valores obtenidos de la razón de resistencia para <i>Campnosperma panamense</i> Standl.....	64
Tabla 3.13 –Valores obtenidos de la razón de resistencia para la madera de <i>Acacia mangium</i> Willd. procedencia Noroccidente colombiano.	64
Tabla 3.14 – Valores obtenidos de la razón de resistencia para la madera de <i>Acacia mangium</i> Willd. procedencia Oriente colombiano.....	65
Tabla 3.15 – Criterios seleccionados para la clasificación de la madera de <i>Acacia</i> con el objetivo de fabricar madera laminada encolada en la nueva propuesta (CP).	70
Tabla 4.1 – Listado de empresas que hacen o han participado en la fabricación de MLE en Colombia	82
Tabla 4.2 – Procesos iniciales para dos empresas que fabrican MLE en Colombia	85
Tabla 4.3 – Procesos fundamentales para dos empresas que fabrican MLE en Colombia	86
Tabla 4.4 – ANOVA para el modelo de una sola variable y cuatro factores en la prueba de cizallamiento sobre la línea de cola de muestras retiradas de vigas de MLE después de fracturadas.	95
Tabla 4.5 – Valores de densidad seca al aire, módulo de elasticidad y esfuerzo de flexión para las uniones <i>finger joint</i> en las maderas <i>C. panamense</i> y <i>A. mangium</i> extraídas de la MLE.	98
Tabla 4.6 – MANOVA del modelo con los efectos univariados y multivariados usando los factores especies, normativa y posición en las variables densidad seca al aire, módulo de elasticidad y esfuerzo en flexión para las uniones <i>finger joint</i> de la MLE.....	99
Tabla 4.7 – Valores del módulo de elasticidad y esfuerzo de flexión para las uniones <i>finger joint</i> en las maderas <i>C. panamense</i> y <i>A. mangium</i> extraídas de la MLE y sometidas al esfuerzo de tensión paralela.	101

Tabla 4.8 – MANOVA del modelo con los efectos univariados y multivariados usando los factores especies, normativa y posición en las variables módulo de elasticidad y esfuerzo en tensión de las uniones <i>finger joint</i> para la MLE.	102
Tabla 5.1 – Reporte de las propiedades físicas y mecánicas de la especie <i>Campnosperma panamense</i> Stand.	106
Tabla 5.2 – Reporte de las propiedades físicas y mecánicas de la especie <i>Acacia mangium</i> Willd.	107
Tabla 5.3 – Número de probetas obtenidas para la obtención de las diferentes propiedades físicas y mecánicas.....	110
Tabla 5.4 – Reporte de las propiedades físicas y mecánicas de la especie <i>Campnosperma panamense</i> Stand.	113
Tabla 5.5 – Reporte de las propiedades físicas y mecánicas de la especie <i>Acacia mangium</i> Willd. procedencia Noroccidente colombiano.	114
Tabla 5.6 – Reporte de las propiedades físicas y mecánicas de la especie <i>Acacia mangium</i> Willd. Procedencia Oriente colombiano.....	114
Tabla 5.7 – Comparación de los valores obtenidos para la prueba de flexión estática en <i>Campnosperma panamense</i> y <i>Acacia mangium</i> de los Llanos Orientales usando la totalidad de las muestras y una porción según la recomendación de la ASTM D 2555	117
Tabla 5.8 – Análisis de varianza para las variables obtenidas de la flexión estática en la madera de <i>Acacia mangium</i> Willd. proveniente del noroccidente colombiano (Am-NO) y los Llanos Orientales (Am-O)	118
Tabla 6.1 – Clasificación visual general para la especie <i>C. panamense</i>	128
Tabla 6.2 – Número de piezas utilizadas en el estudio para cada tamaño y grado.....	128
Tabla 6.3 – Valores medios de densidad seca al aire (Kg.m^{-3}) y módulo de elasticidad (MPa) obtenido por el procedimiento no destructivo.....	131
Tabla 6.4 – Pruebas de normalidad para las dos variables evaluadas segmentadas por tamaño	132
Tabla 6.5 – Pruebas Levene para homogeneidad de varianzas en las dos variables evaluadas y su interacción*	133
Tabla 6.6 – Correlación de Spearman para los tratamientos y variables del estudio	136
Tabla 6.7 – Comparaciones no paramétricas entre los diferentes tamaños	141
Tabla 6.8 – Comparaciones no paramétricas entre los diferentes grados	141
Tabla 7.1 – Anomalías más relevantes para clasificación de la madera de Sajo tenidas en cuenta para la clasificación industrial.	151
Tabla 7.2 – Correlación Comparación de los valores del MoEd (MPa) en tres clasificaciones industriales y tres grados mecánicos.....	152
Tabla 7.3 – Diferencias estadísticas entre las medias de tratamiento para el MoEd (MPa) y Dsa (Kgr.m^{-3}) de los tres modelos construidos en el trabajo.....	153
Tabla 7.4 – Correlación para los diferentes factores pertenecientes al Modelo 1 – Grado A (N=30)	154
Tabla 7.5 – Correlación para los diferentes factores pertenecientes a los Modelos 1 y 2 – Todos los Grados y Calidades (N=89)	154
Tabla 7.6 – Anomalías más influyentes en los valores de elasticidad dinámica para las pruebas de vibración trasnversal en la madera de Sajo.....	157

Tabla 7.7 – Programa usado para el secado de madera de Sajo	162
Tabla 8.1 – Valores de estadísticos descriptivos para la totalidad de probetas y ensayos.	171
Tabla 8.2 – Valores de resistencia para flexión (E y MoR) y cizallamiento (RM).....	172
Tabla 9.1 – Valores de resistencia y densidad para las diferentes clasificaciones de madera laminada encolada combinada UNE EN 1194.	182
Tabla 9.2 – Tensiones básicas para madera laminada encolada fabricados con dos calidades de madera aserrada de <i>Pinus radiata</i> chileno (INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 2006).....	183
Tabla 9.3 – Valores de Diseño para MLE estructural de Coníferas según el NDS (AMERICAN WOOD COUNCIL, 2017).....	184
Tabla 9.4 – Clases de resistencia para las maderas dicotiledóneas según la NBR 7190	185
Tabla 9.5 – Diferentes casos de localización de grados en la sección transversal y sus respectivas ecuaciones de corrección para el momento de Inercia I . El ancho de la pieza construida se representa con el tono oscuro, el ancho de la pieza blanca refleja la reducción de resistencia dado el módulo de elasticidad de cada lamela (E). Aplican las convenciones de la Figura 9.2.	188
Tabla 9.6 – Dimensiones sugeridas por la norma ISO EN 408 y modificadas para la prueba de compresión para MLE.....	205
Tabla 9.7 – Factores de la sección transversal transformada para el Momento de Inercia (I) en las vigas de MLE, según el Módulo de Elasticidad (MPa) reportado por diferentes metodologías destructivas (DT) ¹ y no destructivas (NDT) ² , la posición de las lamelas, dos sistemas de clasificación y dos especies.	211
Tabla 9.8 – Factores de la sección transversal transformada para la Razón de Resistencia aplicable al tipo de MLE (RR_i). Teniendo en cuenta que el mejor grado se localiza en extremos, el menor en el centro de la viga y el grado medio en la posición intermedia. (Información basada en los resultados del capítulo 3).	212
Tabla 9.9 – Resultados de la Prueba de Flexión Estática en madera de <i>Campnosperma panamense</i> Standl. para seis vigas de 750 x 50 x 5 cm ³ . Los valores se expresan en MPa.	214
Tabla 9.10 – Resultados de la Prueba de Flexión Estática en madera de <i>Acacia mangium</i> Willd. para dos vigas de 750 x 50 x 5 cm ³ . Los valores se expresan en MPa.	214
Tabla 9.11 – Resultados asociados a las pruebas de flexión estática en tres puntos con probetas de 2,5 x 2,5 x 41 cm ³ en MLE de <i>Acacia mangium</i> Willd. encolada con EPI y MUF en cantidades de 250 y 350 g. m ⁻² . Valores promedio (A) y Desviaciones estándar (B).	215
Tabla 9.12 – Valores de densidad seca al aire, módulo de elasticidad y esfuerzo de tensión paralela al grano para las maderas <i>C. panamense</i> y <i>A. mangium</i> extraídas de la MLE.	217
Tabla 9.13 – ANOVA del modelo con los efectos univariados y multivariados usando los factores especies, normativa y posición en las variables densidad seca al aire, módulo de elasticidad y esfuerzo en la prueba de tensión paralela para la MLE.	218
Tabla 9.14 – Valores detallados para el módulo de elasticidad y el esfuerzo en compresión paralela de la madera de <i>C. panamense</i> y <i>A. mangium</i>	220
Tabla 9.15 – ANOVA del modelo con los efectos univariados y multivariados usando los factores especies, normativa y posición en las variables dependientes módulo de elasticidad y esfuerzo en compresión paralela para la MLE.	221
Tabla 9.16 – Valores detallados para el módulo de elasticidad y el esfuerzo en compresión perpendicular de la madera de <i>C. panamense</i> y <i>A. mangium</i>	222

Tabla 9.17 – ANOVA del modelo con los efectos univariados y multivariados usando los factores especies, normativa y posición en las variables dependientes módulo de elasticidad y esfuerzo en compresión perpendicular para la MLE.....	223
Tabla 9.18 – Valores detallados para el esfuerzo en tensión perpendicular de la madera de <i>C. panamense</i> y <i>A. mangium</i>	224
Tabla 9.19 – Valores detallados para el esfuerzo en cizallamiento paralelo de la madera de <i>C. panamense</i> y <i>A. mangium</i>	225
Tabla 9.20 – ANOVA del modelo con los efectos univariados usando los factores especies y normativa en la variable dependiente esfuerzo en cizallamiento paralelo para la MLE.	225
Tabla 9.21 – Reporte de los valores de resistencia y rigidez para la madera de <i>Campnosperma panamense</i> Standl. y <i>Acacia mangium</i> Willd. obtenidas en cuerpos de prueba y MLE, basándose en las normativa ASTM D 143 e ISO EN 408 + ISO/FDIS 13910, respectivamente.	232
Tabla 10.1 – Determinación de k_{crit} según el valor de la esbeltez relativa en flexión $\lambda_{rel, m}$	253
Tabla 10.2 – Valores de k_{mod} para madera laminada.....	254
Tabla 10.3 – Denominación de los tratamientos en función de los factores empleados.	262
Tabla 10.4 – Número de vigas usadas en el desarrollo del presente capítulo que estudia el pandeo lateral, segmentadas por espeje y Sistema de clasificación.	263
Tabla 10.5 – Análisis de sensibilidad del enmallado.	280
Tabla 10.6 – Resumen de las Variables obtenidas para cada tratamiento en la combinación Especie (Acacia - Sajo) x Tipo de clasificación (NSR-10 – Propuesta (CP)).....	285
Tabla 10.7 – Autovalores obtenidos por cada variable o Fuente de Variación para los Componentes Principales más representativos.	288
Tabla 10.8 – Varianza total explicada para el arreglo por Componentes Principales.	288
Tabla 10.9 – Relacionamiento entre las nueve variables empleadas en el modelo estadístico según diferentes factores y combinaciones de ellos. Los recuadros escritos sombreados indican diferencias significativas, los no sombreados ausencia de diferencias y los vacíos, redundancias ($q < 0.05$).....	290
Tabla 10.10 – Desplazamientos obtenidos de manera experimental y en el modelo de ABAQUS/CAE para <i>Acacia mangium</i> Willd., número de cargas y número de contraventamientos.....	296
Tabla 10.11 – Desplazamientos obtenidos de manera experimental y en el modelo de ABAQUS/CAE para <i>Campnosperma panamense</i> Standl., número de cargas y número de contraventamientos.....	297
Tabla 10.12 – Cargas críticas de pandeo obtenidas de manera experimental y en el modelo de ABAQUS/CAE para <i>Campnosperma panamense</i> Standl. y <i>Acacia mangium</i> Willd, número de cargas (columnas) y número de contraventamientos (filas).	298
Tabla 10.13 – Resultados de la Prueba de Flexión Estática en madera de <i>Acacia mangium</i> Willd. para vigas de 750 x 50 x 5 cm ³	299
Tabla 10.14 – Resultados de la Prueba de Flexión Estática en madera de <i>Campnosperma panamense</i> Standl. para vigas de 750 x 50 x 5 cm ³	300
Tabla 10.15 – Factores para conversión por sistema de arriostramiento relajado a rígido según los cálculos del autor.....	306
Tabla 10.16 – Valores de longitud efectiva l_e para los casos de contraventamentopresentados en la Figura 10.31 –correspondientes a las longitudes l_v l_u	315

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

Am-NO	<i>Acacia mangium</i> Willd. Noroccidente
Am-O	<i>Acacia mangium</i> Willd. Oriente
ASTM	American Society for Testing and Materials
AITC	American Institute of Timber Construction
CLT	Cross Laminated Timber
FCP	Fallas de Compresión Perpendicular
FJ	Finger Joint
JUNAC	Junta del Acuerdo de Cartagena
mL	metro Lineal
MLE	Madera Laminada Encolada
MJ	Madera Juvenil
NBR	Norma Brasileña
NCH	Norma Chilena
NDS	National Design Standard
NTC	Norma Técnica Colombiana
UNE	Norma de la Unión Europea
VLC	Viga Laminada Colada

1. INTRODUCCIÓN

La construcción con madera de forma masiva se ha convertido en una obsesión por parte de los profesionales que trabajan en el gremio en aquellos países en proceso de desarrollo, donde aún este producto no se ha posicionado como tal. Empresarios, universidades y gobierno, conformados por un gran número de actores como Ingenieros de diferentes áreas, arquitectos, administradores, políticos, estudiantes, entre otros, están luchando día a día, manifestándose con su trabajo para alcanzar tal objetivo, incluso algunas veces de forma articulada.

Dando una mirada a Europa y Norteamérica sería bueno destacar las razones del éxito de la madera en esas áreas del planeta y se podría comentar: a) el gusto y cultura de construcción con madera; b) el balance entre la oferta y demanda de productos para la construcción; c) la presencia de cadenas de suministro con alta madurez; d) la existencia de empresas especializadas en cada eslabón como suministro, transformación, construcción y mantenimiento con madera a diferentes escalas de actuación, con la suficiente capacitación, entrenamiento y preparación del personal; e) la presencia de pocas maderas locales, con siglos de manejo silvicultural y procesos de ordenación acertados; f) la demanda de materiales tropicales con elevadas propiedades mecánicas y de altísima durabilidad natural para complementar algunas deficiencias; g) el uso de maderas de baja, media y alta densidad en diferentes aplicaciones constructivas; h) el conocimiento multidisciplinario del material en diferentes escalas de trabajo, gestionando las desventajas y potenciando las ventajas; i) reglas de juego claras consignadas a nivel de normatividad para el diseño, fabricación y análisis estructural de los elementos en madera; j) trabajos interdisciplinarios con participación masiva de variados actores; k) altos niveles de gestión intra e inter empresarial; l) elevados estándares de precios asociados a la calidad que pueden absorber eficientemente los costos asociados a los productos y representar utilidad; m) marco político existente, en función del desarrollo de los temas forestales, madereros y de construcción civil; y n) un mayor poder adquisitivo de la población.

En Colombia la madera se usa en diferentes aplicaciones, pero aún no se posiciona como un producto que pueda aportar formalmente y de manera significativa al desarrollo económico, especialmente en lo referente al sector de la construcción. Para ello es importante

avanzar en todos los temas cruciales asociados a la normatividad, que es donde esta investigación pretende hacer su contribución, especialmente con dos especies madereras que hoy por hoy y en un escenario de corto plazo, pueden convertirse en importantes por sus posibilidades de oferta volumétrica a costos muy competitivos, frente a materiales tradicionales como el acero y el cemento. Las normas internacionales no son de estricta aplicabilidad en nuestros países.

El autor identificó la confiabilidad del proceso constructivo, la especificación técnica-mecánica del material y reglamentos o normativas claras para caracterización, análisis y diseño estructural como los puntos más relevantes que permitan avanzar en el uso masivo de la madera. Productos como la Madera Laminada Encolada (MLE), pueden representar ventajas en la medida que son productos de ingeniería que se puede fabricar con la tecnología actual, brindando a los consumidores (constructores), certeza sobre las propiedades del material en versatilidad de usos.

Como punto de partida, el autor identificó dos especies madereras que crecen en Colombia y que pueden destacarse en el suministro constante de MLE para la construcción. Ellas son una especie nativa que crece en el litoral pacífico desde límites con Ecuador y hasta Panamá, formando rodales puros en grandes extensiones, localmente denominada Sajo (*Camnosperma panamense*) y la Acacia (*Acacia mangium*), que se ha destacado por su rápido crecimiento, belleza estética y versatilidad de usos.

El siguiente punto a revisar es el procedimiento de clasificación vigente en Colombia, el cual debe ser actualizado, pues al aplicarlo de manera estricta, el volumen de madera rechazado resulta ser muy alto vs la oferta del mercado desde el bosque, tanto para cualquier lote, como para cualquier especie seleccionada aleatoriamente. Un procedimiento más flexible estimularía el uso de la madera. Una vez modificado el estándar de clasificación, se deben validar los procesos de fabricación con este material como la MLE, determinando sus propiedades resistentes para brindar a los consumidores fichas técnicas de manejo donde se consignen los límites de utilización para diferentes condiciones de servicio, la forma de uso y mantenimiento. Por último se debe destacar que en MLE se potencia la resistencia en la medida que el momento de inercia aumenta, y eso se logra cuando el peralte crece. Pero el momento de inercia no puede aumentarse ilimitadamente, ya que está restringido por el pandeo lateral, por lo que será necesario encontrar el punto óptimo de utilización donde se maximicen las

cargas a soportar, para geometrías constantes, respetando los factores de seguridad que impidan el vuelco lateral, con el menor número de apoyos que hagan de la madera un producto seguro de usar y competitivo de fabricar y comercializar en la construcción frente a los materiales tradicionales.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Teniendo en cuenta lo enunciado, el presente trabajo tiene como objetivo principal validar la factibilidad técnica de fabricación de MLE a escala estructural, referenciando sus propiedades y comportamiento mecánico en contraventamiento variable para dos especies y dos grados de calidad derivados de dos metodologías de clasificación.

2.2. Objetivos Específicos

- Proponer dos categorías de clasificación de calidad alternativos a la NSR-10 para madera aserrada de las especies *C. panamense* y *A. mangium* con destino a la fabricación de MLE buscando un mayor aprovechamiento del material.

- Establecer y documentar los procedimientos para la fabricación de MLE a partir de las especies *C. panamense* y *A. mangium*, en dos escenarios reales de fabricación, verificando el nivel de aprovechamiento y el cumplimiento de los estándares de calidad de las normativas nacionales e internacionales.

- Realizar la caracterización y clasificación mecánica estructural de la MLE fabricada con *C. panamense* y *A. mangium*, mediante dos reglas de clasificación de la madera aserrada, un tipo constructivo y diferentes condiciones de apoyo, enfatizando el pandeo lateral como aspecto fundamental a ser definido y superado según los criterios normativos.

- Relacionar el desempeño mecánico de las MLE a escala real con los tratamientos propuestos: especies, presencia de anomalías, ordenamiento de lamelas y diferentes condiciones de apoyo, recomendando los procedimientos más idóneos de clasificación de la materia prima, fabricación, cálculo y uso del material. El Sajo forma masas.

3. ANOMALÍAS PRESENTES EN LA MADERA DE *Campnosperma panamense* Standl. Y *Acacia mangium* Willd.

Resumen

La presencia de anomalías en la madera mitiga sus posibilidades de uso, más cuando en la mayoría de los casos reduce sus propiedades mecánicas y afecta su estabilidad, volviendo impredecible su comportamiento. Un paliativo de su presencia es la aplicación de factores de seguridad que hagan una reducción de los valores reportados de resistencia, cubriendo la mayor parte de la población, al hacer uso intensivo de procedimientos estadísticos aceptados en el área. Esto, aunque eficaz, castiga la mayor parte del material, incluyendo aquel libre de defectos (i), el que presenta anomalías menores (ii) y el que, presentando anomalías, reporta mayores valores de resistencia (iii). Es por ello que, el presente trabajo se propuso caracterizar las anomalías presentes en las maderas de las especies *Campnosperma panamense* Standl. y *Acacia mangium* Willd., con el fin de seleccionar las más relevantes y establecer sus límites de aceptación en los parámetros de clasificación para tres grados propuestos (A, B y C), visando la elaboración de MLE. Esta evaluación permitió conocer los factores de afectación por calidad de las dos maderas, además de su distribución en muestras especialmente seleccionadas para tal fin. En el caso de la madera de *A. mangium*, el factor de afectación global fue de 0,287 para la madera de la Orinoquia y de 0,355 para la región Noroccidental del país, sin embargo, al hacer la clasificación con los términos de referencia propuestos para cada tercio de la población se encontraron valores de 0,824 y 0,882 para el primer tercio, de 0,653 y 0,716 para el segundo y 0,280 y 0,334 para el tercero, lo cual quiere decir que los factores globales que afectarían al 100% de la población solo se deberían aplicar al 33% o menos de esta. Los resultados para *C. panamensis* tienen la misma tendencia, pero con valores más cercanos a uno para el primer y segundo tercio (0,956 y 0,849, respectivamente), pues el tercer tercio presenta un valor similar al encontrado para *Acacia* (0,296). Normativas como las ASTM y NCh, recomiendan aplicar estos reportes exclusivamente, al esfuerzo en el límite proporcional de las pruebas de flexión estática y compresión paralela. En el trabajo también se dan a conocer las imágenes de las anomalías más frecuentes, para su reconocimiento y algunas cifras de su participación en el material rechazado cuando es vinculado al proceso de fabricación de MLE. Finalmente, el autor presenta una propuesta de clasificación de la madera, a su juicio coherente y conciliadora con la oferta de estas materias primas, la reducción del desperdicio en los diferentes procesos de transformación para perfeccionar el entorno competitivo y mejorar el nivel de servicio, al acortar la brecha con la demanda de productos laminados que se puedan destinar de manera segura y confiable en el sector de la construcción nacional.

Palabras clave: Clasificación visual de la madera; Clasificación mecánica de la madera; Madera laminada encolada; Grados de la madera; Madera *clear*; Razón de resistencia; Pudrición de la madera

3.1. Introducción

Comúnmente conocidos como defectos, las anomalías en la madera son irregularidades en el material que por definición riñen con los objetivos de uso (ÍÑIGUEZ, 2007). Conocer adecuadamente el material implica no habla de eliminar las anomalías o defectos, sino de su gerencia. Al ser un producto natural, cuyo crecimiento depende de las condiciones del ambiente, la madera presenta interrupciones en su formación, que, al ser evaluadas por medios físicos, mecánicos u organolépticos, limitan las aplicaciones en diferentes campos como el de la ingeniería (HAN; BIRKELAND, 1992; NAGAI; MURATA; NAKANO, 2009). Pero las anomalías no solo se dan en la madera en formación, diferentes etapas del procesamiento inciden en la generación de estas, por ello también se hace referencia a anomalías por la cosecha, por logística y transporte, por procesamiento y almacenamiento, y hasta en el uso o destinación final (NOWAK; JASIEŃKO; HAMROL-BIELECKA, 2016). Al respecto, los sistemas de clasificación visual han permitido homologar y encasillar la madera en clases, mas, en los últimos años, sistemas y equipos expertos en clasificación se han tomado la gran industria en el escenario internacional (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA, 2010; INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 1991a; UNE, 2011). No obstante, antes de llegar a entrenar uno de estos sistemas, es necesario hacer la caracterización y clasificación por dos medios básicos: el visual y el mecánico. El primero, amerita el entrenamiento de personal experto, el cual sigue unos términos de referencia conciliados idealmente entre silvicultores, trasformadores, comercializadores y clientes, aunque no siempre están todos los actores presentes en la toma de decisiones y no siempre se sigue un procedimiento sistemático y formal, es suficiente que un número plural actúe en este sentido si cada uno hace su aporte (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1972). El objetivo de la presencia de todos los actores involucrados es conducir a procesos de clasificación consistentes con la oferta real generada desde el bosque, pues muchas veces el concepto de madera maciza sin anomalías o *clear*, es un paradigma utópico y por ende, difícil de satisfacer, sobre todo si se trata de grandes volúmenes de demanda, ya sea desde el bosque natural como desde las plantaciones. En el segundo medio de caracterización y clasificación, se puede llegar por dos vías a los reportes, ya sea a través de la caracterización mecánica en laboratorio de piezas clasificadas de manera previa por medios visuales, y las pruebas rápidas basadas en vibración o cualquier otro método, que otorgan una aproximación a la densidad

del material y/o su módulo de elasticidad. Con esta información se determinan los parámetros y alcances de los términos de referencia para cada uno de los grados de la madera de una especie; que finalmente podrán entrenar los sistemas expertos computarizados o análogos de los grandes equipos que son usados por empresas que manejan grandes volúmenes de material. Entre las tecnologías desarrolladas últimamente para cumplir este propósito se pueden mencionar: MiCROTEC GOLDENEYE 900 (www.microtec.eu); WANESCAN (www.microtec.eu), MTG timber grade (www.brookhuis.com), Metriguard's 7200 HCLT (www.metriguard.com), (ONG, 2015). Otro aspecto interesante para mencionar es que la presencia de anomalías en la madera no siempre tiene el mismo efecto, pues su característica anisotrópica hace que cierta variable se camufle o se potencie para una aplicación específica.

3.2. Objetivo

El presente capítulo tiene como objetivo dar a conocer una galería visual de las principales anomalías encontradas en la madera de *Campnosperma panamense* Standl. y *Acacia mangium* Willd. usadas industrialmente en Colombia, con el fin de ayudar en la generación de una propuesta preliminar que pueda ser efectiva y de fácil aplicación para la clasificación de madera aserrada y/o cepillada con destino a la elaboración de madera laminada encolada.

Igualmente, este capítulo tiene como objetivo reportar las razones de resistencia para las dos especies según los criterios de la normativa NCh 2165 y ASTM D3737, elementos de suma importancia para la afectación de los esfuerzos básicos reportados para las diferentes especies, en especial en lo concerniente a las pruebas de flexión y compresión paralela.

3.3. Revisión de Literatura

3.3.1. Singularidades del material a tener en cuenta para su categorización

3.3.1.1. Nudos

Los nudos pueden representar el criterio de clasificación por calidad más usado en las maderas de coníferas (ZAMBRANO TRIVIÑO, 2012), pues se atribuye a su presencia una

desviación del grano de la fibra y una menor resistencia, dada una reducción del momento de inercia de la pieza que los contienen (INCONTEC, 1997; MADSEN, 1992). Son muchas las metodologías que se han desarrollado para medir su efecto sin detener la producción (BAÑO et al., 2011; GUINDOS; ORTIZ, 2013; KAMAL et al., 2017), no obstante siguen siendo un tema de alta complejidad por la diversidad de tipos, tamaños, frecuencia, posición y acompañamiento con otras características, que sin duda, pueden reducir los valores de resistencia en ciertas propiedades mecánicas (NAGAI; MURATA; NAKANO, 2009).

La NCh 2165, ASTM D3737, AITC 1994, afirman que en la MLE los nudos de las láminas ubicadas cerca del eje neutro tienen menor influencia para la resistencia en flexión, comparados con aquellos nudos ubicados en las láminas exteriores. Estableciendo una relación empírica, esta norma propone una forma de evaluar el efecto de los nudos en los laminados con la siguiente expresión (Ecuación 3.1) que calcula la razón de resistencia, $RR_{f,i}$ (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012a; INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 1991b):

$$RR_{f,i} = (1 + 3R_i) \cdot (1 - R_i)^3 \cdot (1 - R_i/2) \quad \text{Ecuación 3. 1}$$

Donde:

$RR_{f,i}$: Razón de resistencia en flexión para el grado de calidad i

$R_i = IK/IG$: Calculado según el numeral 3.4.5

IK : Suma de los momentos de inercia de todos los nudos existentes en longitudes de 300 mm, ubicados en ambos lados de la sección crítica

IG : Momento de inercia de la sección transversal de toda la viga

La razón de resistencia es usada para afectar el valor de tensión admisible en flexión para madera laminada horizontalmente con láminas grado i . Para ello se propone la siguiente formulación presentada en la Ecuación 3.2:

$$F_{f,i} = K \cdot RR_{f,i} \cdot F_{b,f,i} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde:

$F_{f,i}$: Tensión admisible de flexión en madera laminada horizontalmente con láminas grado i , MPa

K : 0,75 para alturas de viga superiores a 375 mm

K : 0,85 para alturas de viga menores o iguales a 375 mm

$F_{b,f,i}$: Tensión básica en flexión para el grado i , obtenida de la NCh 2165, Tabla 8 columna 2 para $P. radiata$, MPa

La Tabla 3.1 muestra los valores mínimos de la razón de resistencia $RR_{f,i}$ a ser utilizados con el fin de afectar las tensiones básicas en flexión y compresión paralela, para los grados propuestos de madera aserrada en la NCh 2150 (INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 1991a).

Tabla 3.1 – Razones de resistencia para tensiones básicas de flexión y compresión paralela de elementos fabricados con madera aserrada clasificada mecánicamente.

Madera Aserrada		Mínima razón de Resistencia $RR_{f,i}$ para	
Grado	Módulo de elasticidad longitudinal aparente de cada pieza E_L	Tensión básica de flexión en MLE con Laminación Horizontal	Tensión básica de compresión paralela a la fibra
A (1)	$E_L \geq 9000$ MPa	0,55	0,56
B (2)	$9000 \geq E_L \geq 4000$ MPa	0,50	0,50

Fuente: (INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 1991a)

Una afectación más específica de los nudos sobre la resistencia en flexión y compresión paralela, cuando están ubicados en las caras o cantos de las piezas de madera aserrada, puede ser consultada en la norma ASTM D245 para 16 especies que crecen en Norteamérica (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2006).

3.3.1.2. Grano inclinado

Como las propiedades son reportadas en el sentido paralelo o perpendicular a la fibra de la madera, es de suponer que los desvíos en la dirección de la fibra pueden reducir la resistencia. Por ejemplo, se habla que la tensión perpendicular es 30 a 70 veces menor que la tensión longitudinal, y que la compresión perpendicular equivale a un 25% de la compresión paralela (ARGÜELLES; ARRIAGA; MARTÍNEZ, 2000). Para corregir la resistencia por desvío de la fibra la fórmula de Hankinson, Ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5 (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA, 2010; CALIL JR.; MOLINA, 2010) provee una ayuda importante:

$$N = \frac{PQ}{P \sin^n \alpha + Q \cos^n \alpha} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{1}{z}\right) \quad \text{Ecuación 3.4}$$

$$\frac{1}{z} = \sqrt{\left(\frac{1}{x}\right)^2 + \left(\frac{1}{y}\right)^2} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Donde:

N : Fuerza admisible a un ángulo α de la desviación de la fibra.

Q : Fuerza admisible en el sentido perpendicular al grano.

P : Fuerza admisible paralela al grano.

n : Constante determinada empíricamente, ver

Tabla 3.2.

α : Ángulo en grados entre la dirección de la carga aplicada y la dirección del grano. $\frac{1}{x}$: Tangente del ángulo que forman las fibras con el eje longitudinal en la cara de la pieza. $\frac{1}{y}$: Tangente del ángulo que forman las fibras con el eje longitudinal en la cara adyacente.

Tabla 3.2 – Valores de n y Q/P encontrados experimentalmente; **Error! Vínculo no válido.**

Propiedades	n	Q/P
Tensión	1,5 - 2,0	0,04 - 0,07
Compresión	2,0 - 2,5	0,03 - 0,40
Flexión	1,5 - 2,0	0,04 - 0,10
Módulo de Elasticidad	2	0,04 - 0,12

Fuente: (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA, 2010)

Junto con la presencia de nudos, el desvío de la fibra en la madera es una de las características que más incide en su resistencia mecánica, por ello la NCh 2165 insiste que para la variable compresión paralela, se debe tomar el valor más crítico entre ellos (INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 1991c).

3.3.1.3. Grietas

Corresponden a separaciones en el tejido fibroso, que son evidentes en el plano transversal en la dirección de los radios y sin llegar a igualar la altura de la pieza evaluada. Normalmente no tienen repercusión en las caras o cantos, pero si no se controlan pueden generar rajaduras (HUGHES, 2015).

3.3.1.4. Rajaduras

Son separaciones del tejido fibroso a lo largo del parénquima radial. En el plano transversal atraviesan la altura de la pieza y es evidente en las caras y/o cantos de esta, normalmente deben ser descartadas las puntas rajadas por su bajo valor estético y reducción evidente en la resistencia (AWANG; TAYLOR, 1993).

3.3.1.5. Acebolladuras

Son formadas durante el crecimiento o cosecha de los árboles y consisten en separaciones en el tejido leñoso de forma paralela a los anillos de crecimiento, cuando se deposita una capa de gomas o resinas, después de situaciones que originan estrés en la estructura del árbol, como incendios, heridas por otros árboles, ataques biológicos, inadecuadas prácticas silviculturales, entre otros. Es una característica que se evidencia en la madera rolliza o en bloques que contienen la médula centrada (AVRIEL; BARRETT, 1978).

3.3.1.6. Escamadura

Es una consecuencia de la acebolladura después que la madera ha sido aserrada. Se manifiesta en las aristas de la pieza escuadrada siguiendo la dirección de grano, por lo que se puede visualizar en una cara y canto asociado. Es una característica que elimina resistencia en la pieza de madera (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012a; FAGGIANO; MARZO; MAZZOLANI, 2015; MEINZER; LACHENBRUCH; DAWSON, 2011).

3.3.1.7. Arista faltante

Representa la falta de escuadría en la pieza de madera, que se distribuye en una porción o toda la longitud de la pieza. Puede estar asociada a la presencia de corteza, la presencia de la médula o alguna otra anomalía como corteza incluida que, durante los procesos de aserrado, hacen coincidir la anomalía en la arista de corte. Su importancia radica en la pérdida de valor estético y reducción del momento de inercia (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE MADEIRA, [s.d.]; BLANKENHORN; BHUIYAN, 2016).

La norma EN 385 establece los límites máximos de esta anomalía para hacer las uniones finger joint. En el caso de la sección transversal, se admite una pérdida máxima del 1% de la sección, si se mide la diagonal de la arista faltante (mm), esta norma acepta una pérdida máxima equivalente a la expresión $\sqrt{A/25}$, donde A corresponde al área de la sección transversal en mm² (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 1995).

3.3.1.8. Corteza incluida

Muchas veces cuando los árboles sufren heridas graves en el bosque, sobre todo por la caída de otros árboles muy pesados y algunas veces por ramas desgarradas, es posible la generación de fenómenos de cicatrización muy traumáticos que interrumpen drásticamente la continuidad de tejidos leñosos en el sentido radial con la formación de corteza. Este nuevo tejido queda preso al interior de la madera con el paso de los años y se manifiesta al momento del corte (KAMAL et al., 2017; SPATZ; BRUECHERT, 2000).

3.3.1.9. Mancha azul

Es un cambio de tonalidad en la albura de la madera producido por la presencia de hongos cromógenos durante los procesos logísticos después del corte de los árboles. Aunque se habla que no reducen la resistencia mecánica, su presencia reduce el precio de la madera, sobre todo en coníferas. Hay algunos reportes en coníferas donde se manifiesta en los árboles en pie cuando los hongos son transportados por coleópteros que atacan la madera (OSPINA et al., 2011). En otro caso, se habla que la mancha azul si tiene implicaciones en la resistencia mecánica para ciertas especies de hongos que afectan la continuidad de la pared celular (MOHALI; ENCINAS; MORA, 2002).

3.3.1.10. Pudrición

Corresponde a la presencia de hongos que degradan la pared celular en la madera. Puede ser blanca o parda según la preferencia del hongo por la lignina o celulosa, respectivamente. Genera una evidente pérdida de resistencia en el material y puede manifestarse en todas las etapas de procesamiento (GÜNTER et al., 2011; TONINI; HALFELD-VIEIRA, 2006).

3.3.1.11. Perforaciones

Son originadas por insectos que se alimentan de la madera en su fase adulta o colocan sus huevos, en estos casos las perforaciones normalmente son únicas y no interconectadas. Cuando suceden en los árboles en pie, normalmente se curan al momento de la transformación en el aserrío se nota un oscurecimiento alrededor de los orificios. Cuando las larvas que

emergen de los huevos se alimentan de la madera y es en este caso cuando es común la presencia de galerías en toda la pieza. Esta última característica inhabilita la madera para solicitaciones mecánicas (HUGHES, 2015; IBRAHIM, 2014).

3.3.1.12. Dimensiones

Las dimensiones pueden representar un defecto de la madera cuando no se ajustan a las dimensiones especificadas al inicio de las etapas de transformación ocasionando problemas en las dimensiones finales de los productos. La situación es más compleja cuando se habla de dimensiones en madera húmeda, ya que pueden modificarse por los cambios en el contenido de humedad. En este caso se recomienda conocer las propiedades físicas, en especial las relacionadas con las contracciones y punto de saturación de fibras (BLANKENHORN; BHUIYAN, 2016; ZENID, 1990).

3.3.1.13. Albura-Duramen

Algunas especies poseen una clara diferenciación entre la albura y el duramen. También es reconocida la susceptibilidad de la albura ante los ataques biológicos y su menor densidad, respecto al duramen que puede significar una menor resistencia. En otros casos excepcionales, el contraste de tonalidad puede ser una limitante en el uso, siendo necesaria la eliminación de la albura, por ejemplo para fabricación de pisos (ANDRADE et al., 2013), o del mismo duramen para mejorar la resistencia mecánica en las coníferas y latifoliadas como en el caso de la especie *Brosimum alicastrum* (LEON; ESPINOZA, 2001).

3.3.1.14. Acabados

Este ítem hace referencia a la preparación de las superficies de la madera y es considerado un defecto o anomalía cuando impide la ejecución en los procesos subsiguientes, sobre todo cuando están implícitas operaciones de encolado. Superficies cepilladas, grano levantado, fibra levantada o grano velloso, entran en esta categoría (VALVERDE; MOYA, 2014).

3.3.1.15. Alabeos

Se refieren a los cambios de forma que puede sufrir la madera después de su corte y están comúnmente asociados a la pérdida de humedad y la forma de almacenamiento. Entre ellos se mencionan arqueadura, encorvadura, abarquillado y torcedura (JUNAC, 1989).

3.3.2. Tamaño de las piezas

De acuerdo con algunos autores (ARGÜELLES; ARRIAGA; MARTÍNEZ, 2000) la resistencia de las piezas de madera de la misma calidad en la prueba de flexión, cambia para vigas cargadas, que teniendo el mismo peralte cambian de vano, o que teniendo el mismo vano cambian de peralte. En el primer caso, se comprueba experimentalmente que para el mismo peralte la resistencia aumenta con menores vanos, y en el segundo que la resistencia disminuye con el aumento del peralte al mantener el vano constante. Esas relaciones se pueden representar de la siguiente forma:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{l_{>}}{l_{<}}\right)^{s_l} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{h_{>}}{h_{<}}\right)^{s_h} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

$$k = \frac{l}{h} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{l_{>}}{l_{<}}\right)^{s_l} \left(\frac{h_{>}}{h_{<}}\right)^{s_h} = \left(\frac{kh_{>}}{kh_{<}}\right)^{s_l} \left(\frac{h_{>}}{h_{<}}\right)^{s_h} = \left(\frac{h_{>}}{h_{<}}\right)^{s_v} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

La normativa UNE EN 1194 propone el coeficiente de corrección k_h , para la resistencia en flexión y tracción paralela a la fibra, y el coeficiente k_{vol} , para la tracción perpendicular a la fibra con las siguientes expresiones:

Para $h < 600$ mm	$k_h = \left(\frac{600}{h}\right)^{0,2}$	Ecuación 3.10
-------------------	--	---------------

Para $h \geq 600$ mm	$k_h = 1$	Ecuación 3.11
----------------------	-----------	---------------

Para $V_0 = 0,01$ m ³ y $V > 0,01$ m ³	$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0,2}$	Ecuación 3.12
--	--	---------------

Donde:

σ_2 : Resistencia de las piezas de menor vano o menor peralte. σ_1 : Resistencia de las piezas de mayor vano o mayor peralte. $l_{>}$: Vano mayor. $l_{<}$: Vano menor. h : Peralte. $h_{>}$: Peralte mayor. $h_{<}$: Peralte menor. k : Constante de esbeltez. s_l, s_h : Constantes. $s_v = 0,20$ según la normativa. $V_0 = 0,01$ m³. Volumen de referencia para la pieza laminada. V : Volumen de la pieza laminada, mayor que 0,01 m³.

De otro lado, la normativa chilena (INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 2006) propone un factor de modificación por volumen K_v (Ecuación 3.13) que modifica la tensión admisible en flexión para VLC armadas de modo horizontal y que no debe usarse simultáneamente con el factor de modificación por volcamiento $K_{\lambda v}$, que se explicará más adelante, pues se supone que el K_v afecta al canto traccionado y $K_{\lambda v}$ el canto comprimido (PINEDA SCHLEEF, 2008).

$$K_v = \left(\frac{6,5}{L}\right)^{1/10} + \left(\frac{300}{h}\right)^{1/10} + \left(\frac{135}{b}\right)^{1/10} \leq 1 \quad \text{Ecuación 3.13}$$

Donde:

K_v : Factor de modificación por volumen. L : Longitud entre apoyos, m. h : Peralte de la VLC, mm.
 b : Base de la VLC, mm.

3.3.3. Diferentes reportes de clasificación para la madera

Para el caso europeo, la normativa UNE 56544 de 2011 propone algunos parámetros en la clasificación visual de la madera de coníferas, los cuales son visualizados en la Tabla 3.3 (UNE, 2011). Para el caso de la clasificación visual en madera de frondosas, no se hace el reporte de la normativa UNE 56546 de 2011, ya que fue discontinuado en el año 2013 (UNE, 2013). Otros sistemas de clasificación detallados de madera pueden revisarse en Brasil (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE MADEIRA, [s.d.]; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1972; ZENID, 1990) y la actual propuesta en estudio para clasificar en tres clases, la maderas de género *Pinus* y *Eucalyptus* (NBR - PN-02-126.10-001-1, 2017). Para Colombia se debe citar la normativa NTC 2500 (INCONTEC, 1997), derivada de los estudios más laxos del Pacto Andino desde finales de la década de los 70's (KEENAN, F.J.; TEJADA, 1984). Esta normativa por su alta restricción referente al tamaño de los nudos impide que la madera sea usada estructuralmente en el país, pues entre otros aspectos, solo admite nudos menores a 4 mm, que estén separados uno del otro al menos un metro lineal, que no se ubiquen en el tercio central y que no estén en las zonas sometidas a esfuerzos de tracción (Ver punto 10 de la Tabla 3.4. Esta especificación tan exigente y difícil de cumplir para cualquier madera en grandes volúmenes, fue transferida textualmente en el año 2010 a la norma de construcción sismo resistente y actualmente es un requisito vigente (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA, 2010).

Tabla 3.3 – Clasificación visual de la madera de Coníferas UNE 56544 de 2011

Criterios de calidad		ME-1	ME-2
Diámetro de los nudos sobre la cara (<i>h</i>):		$d \leq 1/5$ de " <i>h</i> "	$d \leq 1/2$ de " <i>h</i> "
Diámetro de los nudos sobre el canto (<i>b</i>):		$d \leq 1/2$ de " <i>b</i> " y $d \leq 30$ mm	$d \leq 2/3$ de " <i>b</i> "
Altura máxima del anillo de crecimiento (1):			
- pino silvestre		≤ 4 mm	Sin limitación
- pino laricio		≤ 5 mm	Sin limitación
- pino pinaster		≤ 8 mm	Sin limitación
- pino radiata		≤ 10 mm	Sin limitación
De contracción: (2) (3)		$f \leq 2/5$	$f \leq 3/5$
Fendas	Acebolladuras	No permitidas	
	Rayo		
	Heladura		
	Abatimiento		
Bolsas de resina y entrecasco		Se admiten si su longitud es menor que 80 mm	
Madera de compresión		Admisible en $1/5$ de la sección o de la superficie externa de la pieza	Admisible en $2/5$ de la sección o de la superficie externa de la pieza
Desviación de la fibra		1:10 (10%)	1:6 (16,7%)
Gemas:			
- longitud		$\leq 1/4$ de " <i>L</i> "	$\leq 1/3$ de " <i>L</i> "
- anchura y espesor		$g \leq 1/4$	$g \leq 1/3$
Médula (1)		Admitida No admitida si se clasifica en húmedo	Admitida
Alteraciones biológicas			
- muérdago (V. álbum)	-	No se admite	
- azulado	-	Se admite	
- pudrición	-	No se admite	
- galerías de insectos xilófagos	-	No se admiten	
Dimensiones y tolerancias		Según las especificaciones de UNE-EN 336	
Deformaciones máximas: (2) (4)			
- curvatura de cara		10 mm (para una longitud de 2m)	20 mm (para una longitud de 2m)
- curvatura de canto		8 mm (para una longitud de 2m)	12 mm (para una longitud de 2m)
- alabeo		1 mm (por cada 25mm de " <i>h</i> ")	2 mm (por cada 25mm de " <i>h</i> ")
- atejado o abarquillado		$1/25$ de " <i>h</i> "	$1/25$ de " <i>h</i> "

(1) Estas características sólo se considerarán cuando se comercializa en húmedo.

(2) Estas características no se considerarán cuando la clasificación se efectúa en húmedo.

(3) Referidas a un 20% de contenido de humedad. Las fendas de contracción sólo se considerarán si su longitud es mayor que la menor de las dimensiones siguientes: $1/4$ de la longitud de la pieza y 1m.

(4) Referidas a un 20% de contenido de humedad. Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten la estabilidad de la construcción (porque puedan corregirse durante la fase de montaje) y exista acuerdo expreso al respecto entre el suministrador y el cliente.

Para secciones cuya relación $h/b \leq 1,5$, las cuatro superficies serán consideradas como caras.

Fuente: (UNE, 2011)

Tabla 3.4 – Tolerancia de la Madera Aserrada para Uso Estructural en Colombia

	Defecto	Estructural Selecta (E.S)	Estructural Normal (E.N) (2)	Observaciones
1	Dimensión real	- 2mm, L < 150	- 5 mm	
	- En sección transversal	+ 4 mm, L > 150	+ 5 mm	
	- Longitud	- 5 mm + 5 mm	- 8 mm + 8mm	
2	Alabeos			
	- Abarquillado	< 0.01d	0.015d	Torcedura en una sola arista.
	- Arqueadura	< 0.003L	0.005L	
	- Encorvadura	< 0.003L	0.005L	
	- Torcedura	< 0.003L	0.005L	
3	Arista faltante (una sola cara)	Máx. 0.25d Máx. 0.25L	Máx. 0.30d Máx. 0.30L	En una sola arista, con reducción de esfuerzos.
4	Duramen quebradizo	No	No	
5	Escamaduras (una sola cara)	< 0.1b < 0.25b	< 0.1b < 0.25b	No se permite en las aristas
6	Falla de compresión	No	No	
7	Grano inclinado	Máx. 1:8	Máx. 1:8	Con reducción de resistencia según (G2.2.3.7)
8	Grieta superficial	Suma < 0.25b	Suma < 0.30b	
9	Medula	No	No	
10	Nudos (1m entre nudos)			Distancia entre nudos mayor a 1m, no se permite en tercio central, ni en zona de tracción. Nudos huecos deben ser sellados con igual material y adhesivos
	Nudo sano	Máx. 0.25 b/m < 4mm	Máx. 0.25 b/m < 4mm	
	Nudo hueco	Máx. 0.12 b/m < 4mm	Máx. 0.12 b/m < 4mm	
	Nudos arracimados	No	No	
11	Perforaciones selladas (no alineadas ni pasantes)			Deberán ser sellados con igual material y adhesivos. D ≤ 3mm D ≥ 3mm
	Pequeñas	Máx. 6 perf/100 cm ²	Máx. 10 perf/100 cm ²	
	Grandes	3 perf/m	6 perf/m	
12	Pudrición	No	No	
13	Rajaduras	Long. Máx. = b	Long. Máx. = 1.5b	Solo en un extremo
14	Manchas	No	Mancha azul	

NOTA 1:

b = ancho de la pieza, la de menor dimensión
d = espesor de la pieza, la de mayor dimensión
L = longitud de la pieza

NOTA 2:

Los elementos de la clase Estructural Normal, se diseñarán con un coeficiente de reducción de esfuerzos $C_R = 0.75$, para todos los esfuerzos, excepto el módulo de elasticidad. En las memorias de cálculo se debe indicar el sistema empleado para el diseño de los elementos secundarios.

3.4. Materiales y Métodos

3.4.1. Procedencia y condiciones del material

La madera de *Campnosperma panamense* Standl (Cp) fue obtenida de un lote de inventario ofrecido por un aserrío en la ciudad de Bogotá, D.C., el material ya había sido objeto de un primer aserrío de trozas a bloques en la ciudad de Buenaventura. La madera presentaba un deterioro superficial generalizado, pues se estima que ya habían transcurrido al menos tres meses desde su apeo y transporte, pues presentaba mancha azul extendida. El material para este trabajo fue evaluado después de las etapas de re-aserrío, pre-secado, secado, re-manufactura y clasificación, justo antes del proceso de *finger joint*, ya que la madera se usó posteriormente en la elaboración de vigas laminadas. Otro lote de madera fue evaluado en una locación alterna en la ciudad de Bogotá D.C, y con la misma procedencia, aunque fue directamente suministrado en forma de tablas desde Buenaventura. En este último caso se trabajó un mayor tamaño de los elementos, a fin de cuantificar y medir los nudos en piezas que hacen parte del mercado tradicional de esta madera en el país.

La madera de *Acacia mangium* Willd. proveniente del departamento de Córdoba (Am-NO), se adquirió en el municipio de Planeta Rica, donde funciona una de las industrias de transformación más grandes de esta especie en el país. La madera fue objeto de aserrío, de trozas a tablas, clasificación, según los criterios internos de la compañía y se tomaron dos estibas al final del proceso de secado. La evaluación visual del material se realizó justo después del moldurado y corte a largo en la sierra radial, antes del proceso de *finger joint*. En este último procedimiento los términos de referencia para la clasificación fueron otorgados por el autor según los parámetros de la Tabla 3.15.

La otra madera evaluada de *Acacia mangium* Willd. se obtuvo de los municipios de Puerto Gaitán y San Martín en el departamento del Meta al oriente del país (Am-O), en la región conocida como las Llanos Orientales. Se seleccionaron en pie al menos 556 árboles, que fueron apeados, troceados a 330 cm la primera troza y 230 cm la segunda, se apilaron por una a dos semanas y después fueron transportados a la ciudad de Bogotá, D.C., donde se aserraron en el término de un mes, obteniendo tablas y repisas que fueron expuestas al secado natural bajo cubierta.

3.4.2. Cantidades evaluadas de material y procesamiento mecánico

En el caso de la madera de Cp se adquirieron 60 bloques de 25 a 30 x 12 a 15 x 265 a 300 cm³, los cuales fueron re-aserrados en 180 repisas de 6,8 X 10 x 275 cm³. Este material se apiló de forma horizontal según las recomendaciones de la Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC, 1989), durante al menos seis meses en la locación del aserrío, esperando llegara al equilibrio. Como esto no aconteció, se tomó la decisión de secar en cámara, proceso que duró dos semanas, más una semana de fraguado y distensión. Finalmente, se evaluaron las anomalías en 1050 repisas de madera con dimensiones 81 x 6,5 x 4,5 cm³, obtenidas del aserrado a longitud de las 180 repisas. El re-aserrío de la madera ocurrió entre los meses de enero y febrero del año 2015 y la evaluación de las anomalías se ejecutó entre diciembre de 2015 y el mes de enero del año 2016. Como complemento de la evaluación de esta especie, en el otro aserrío en la ciudad de Bogotá, la madera fue objeto de cepillado en una cara; en esta locación se tomó información de las nudosidades con el objetivo de calcular la razón de resistencia en 92 unidades de 290 x 25 x 2 cm³. La evaluación ocurrió la cuarta semana de septiembre de 2018.

La madera de Am-NO, cuyo tiempo entre apeo y aserrío no fue mayor a un mes, se secó en cámara por cuatro semanas en el mes de junio del año 2016. Durante una semana fue objeto de transformación en el área de re-manufactura, periodo en el cual se realizaron los descartes y evaluación de anomalías. En el proceso de transformación se contabilizaron 2014 metros lineales de material apto para fabricación de madera laminada encolada, y los descartes de esta producción fueron el objeto de identificación y medición en el presente trabajo.

En el caso de la Am-O, el corte del material se dio en julio de 2017 y la revisión de anomalías durante los meses de agosto y septiembre de ese mismo año. El volumen de trozas ascendió a 27,7 m³ de madera que se transformaron en 13,5 m³ de tablas y repisas en diferentes longitudes desde 50 hasta 330 cm, en anchos corridos según el tamaño de la troza y espesores de 3,5 cm para tablas y 6,5 cm para repisas.

La Tabla 3.5 resume los detalles del material utilizado en la evaluación y cuantificación. De otro lado, la Figura 3.1 da a conocer los diferentes tipos de madera y su estado de procesamiento, justo antes o después de realizar el procedimiento.

Tabla 3.5 – Cantidades evaluadas del material para tipificación de anomalías, cuantificación de defectos y clasificación de la madera para los procesos subsiguientes.

Especie, Procedencia	Volumen Total Inicial, Presentación de la Materia Prima, Dimensiones	Volumen procesado para la destinación final	Destinación Final
<i>Campnosperma panamense</i> Standl., Pacífico colombiano	6 m ³ de madera, Bloques, 27 x 13 x 270 (cm ³)	6 m ³ de madera	Fabricación de MLE
	1,67 m ³ de madera, Tablones (92), 2,5 x 25x 290 (cm ³)	1,67 m ³ de madera	Venta al comercio
<i>Acacia mangium</i> Willd. Noroccidente Planeta Rica, Córdoba	4 m ³ de madera, Listones secos, 2,5 x 6,7 x longitud variable de 128 a 158 (cm ³)	4 m ³ de madera	Fabricación de MLE
<i>Acacia mangium</i> Willd. Oriente, Meta, Colombia	100 m ³ de madera, Árboles en pie, 10-20 cm de diámetro y 8-18 m de altura total Listones verdes, 3,5 x 10 x 230 (cm ³)	0,72 m ³ de madera	Venta al comercio

La Figura 3.1, da a conocer los diferentes tipos de material evaluado con el fin de conocer las anomalías en la madera estudiada.

3.4.3. Identificación y presentación de los tipos de anomalías en cada madera

La identificación de las anomalías se realizó visualmente, previo estudio de los manuales gráficos especializados en esta área del conocimiento (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1972; JUNAC, 1984) y algunos *papers* de apoyo (BLANKENHORN; BHUIYAN, 2016; KAMAL et al., 2017; NAGAI; MURATA; NAKANO, 2009). En el caso de la madera cuya destinación iba a ser la fabricación de MLE, se realizó la cuantificación por longitud y tipo de defecto, después del proceso de moldurado de las piezas y dimensionamiento a largo, justo antes del proceso de *finger joint*. Todas las piezas con dimensiones superiores a cinco cm fueron medidas en longitud, una a una.

Figura 3.1 - Lotes de madera finalmente evaluada para *Campnosperma panamense* Standl.: 35 paquetes con 81 cm de largo (A), tablas completas con longitud de 290 cm (B). Una de las dos estibas de *Acacia mangium* Willd. del Noroccidente después de la salida de la cámara de secado, longitud de la estiba 250 cm (C) y *Acacia mangium* Willd. plantada en el Oriente colombiano con una longitud total de 230 cm (D).

3.4.4. Cuantificación de las anomalías en cada madera con destino a la fabricación de madera laminada encolada (MLE)

Los criterios de descarte de las anomalías fueron presentadas al momento de la cualificación del presente trabajo, siguiendo los estándares para las dos especies en los grados de clasificación A, B y C de la Tabla 3.15. Las piezas descartadas durante el proceso de fabricación fueron apiladas por tipo de defecto predominante, pues era común la presencia de una o más singularidades en las piezas descartadas. En este caso específico, se siguió un único criterio, el del autor. Con el fin de no confundir el material obtenido con el de la fábrica, se seleccionó un área apartada para el acopio y se acordonó, pues la orden de producción tardó varios días en ejecutarse, tanto en la locación de la *A. mangium* como en la del *C. panamense*. Como el procesamiento realizado tenía un derrotero específico, el cual era la generación de dos tipos de materia prima, para sendos tipos de MLE, en diferentes combinaciones de los grados propuestos, primero se obtuvo la materia prima para el estándar más alto. Y una vez se completó el volumen necesario para este estándar, se procedió a obtener la materia prima

de los productos MLE de menor especificación, con ello se aseguró que el material previamente solicitado a cada empresa fuera verdaderamente el suficiente. En el capítulo de fabricación de MLE se ahonda más en este tema.

3.4.5. Cálculo de la razón de resistencia RR_i

Según la recomendación de las normas ASTM D3737 y NCh 2165, los nudos presentes en la madera aserrada, tienen una alta influencia en la resistencia de los laminados, en lo que hace referencia al esfuerzo en flexión estática y compresión paralela (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012b; INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 1991c). Dicho esto, fue necesario entonces, calcular ese nivel de afectación como una merma en el momento de inercia de las piezas individuales que irían a conformar la MLE con láminas dispuestas horizontalmente, para lo cual se empezó calculando y aplicando la Ecuación 3.14.

$$R_i = \frac{I_K}{I_G} \quad \text{Ecuación 3.14}$$

Donde:

- R_i : Participación en el momento de inercia de los nudos en el momento de inercia de las vigas de madera.
- I_K : Suma de todos los momentos de inercia de todos los nudos existentes en longitudes de 300 mm, ubicados en ambos lados de la sección transversal crítica.
- I_G : Momento de inercia de la sección transversal total de la viga.

Se midieron los tamaños y ubicaciones de los nudos en todas las tablas y repisas seleccionadas, reportando los valores de la relación R_i para cada unidad. Para ello se proyectó el ancho del nudo sobre las caras transversales de las piezas conforme la Figura 3 de la NCh 2165 y las Figuras 1 y 2 de la ASTM D 3737, determinando la ubicación y ancho de la totalidad de nudosidades presentes mayores a 6 mm. Luego se calculó el valor promedio de la suma de todos los anchos promedios de nudos existentes en cada longitud de 300 mm, considerando intervalos de 60 mm. Al final, se determinó el tamaño del nudo m_i , correspondiente al percentil 99,5%, para la totalidad de los datos, en cada especie y procedencia, y para los tres grados generados en la secuencia de menor a mayor cantidad de nudos. Por último, se reportaron las razones de resistencia en cada caso, conforme lo hace la normativa chilena para Pino radiata y cuya descripción se presentan en la NCh 2150 (INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 1991a) y se cita en la Tabla 3.6:

Tabla 3.6 – Datos para evaluar la razón $R_i = \frac{I_k}{I_g}$ en pino radiata

Madera de pino radiata destinado a la fabricación de láminas para GLULAM				
Grado, i	Datos de los Nudos*			
	X_i	$\sigma_{x,i}$	Percentil de 99,5% m_i	$h_i = m_i - X_i$
A (1)	0,110	0,3769	0,730	0,620
B (2)	0,145	0,4225	0,840	0,695
C (3)	No definido en esta normativa			

*Expresados como fracción decimal del ancho de la pieza aserrada perteneciente al grado que se indica

El valor R_i (Ecuación 3.15), se calculó para la madera laminada en función del número de grados de calidad presentes. A continuación, se dan a conocer las formulaciones para vigas conformadas por uno, dos y tres grados de calidad. Aunque se aclara que, para el ejercicio del presente capítulo, solo se aplicó para tablas individuales, por lo que en todos los casos se usó únicamente la Ecuación 3.15. Las Ecuaciones 3.16 y 3.17 se usarán en alguno de los capítulos subsiguientes para el cálculo de la razón de resistencia de la madera laminada encolada, objeto principal de este texto.

Para vigas conformadas por un Grado de calidad (NCh 2165):

$$R_1 = \frac{1}{\sum_0^{n_1} Z} \left\{ x_1 \sum_0^{n_1} Z + h_1 \left[\sum_0^{n_1} Z^2 \right]^{1/2} \right\} = x_1 + h_1 \frac{\left[\sum_0^{n_1} Z^2 \right]^{1/2}}{\sum_0^{n_1} Z} \quad \text{Ecuación 3.15}$$

Vigas conformadas con dos Grados de calidad en combinaciones simétricas (NCh 2165):

$$R_2 = \frac{1}{\sum_0^{n_1} Z} \left\{ x_1 \sum_{n_2}^{n_1} Z + \left(\frac{E_2}{E_1} \right) x_2 \sum_0^{n_2} Z + \left[h_1^2 \sum_{n_2}^{n_1} Z^2 + \left(\frac{E_2}{E_1} h_2 \right)^2 \sum_0^{n_2} Z^2 \right]^{1/2} \right\} \quad \text{Ecuación 3.16}$$

Vigas conformadas por tres grados de calidad en combinaciones simétricas (ASTM D3737):

Ecuación 3.17

$$R_3 = \frac{1}{\sum_0^{n_1} Z} \left\{ x_1 \sum_{n_2}^{n_1} Z + \left(\frac{E_2}{E_1} \right) x_2 \sum_{n_3}^{n_2} Z + \left(\frac{E_3}{E_1} \right) x_3 \sum_0^{n_3} Z + \left[h_1^2 \sum_{n_2}^{n_1} Z^2 + \left(\frac{E_2}{E_1} h_2 \right)^2 \sum_{n_3}^{n_2} Z^2 + \left(\frac{E_3}{E_1} h_3 \right)^2 \sum_0^{n_3} Z^2 \right]^{1/2} \right\}$$

Donde:

1, 2, 3: Grados a los que pertenecen las láminas. X_1, X_2, X_3 : Tamaño medio del nudo, expresado como una fracción decimal del ancho de la pieza en cada grado 1, 2 o 3 (A, B o C, en el presente estudio), de la Tabla 3.6. n_1, n_2, n_3 : Número de láminas existentes en cada altura d_1, d_2, d_3 . d_1, d_2, d_3 : En su orden de aparición representan: La altura de toda la viga incluyendo las lamelas de todos los grados, altura de la viga incluyendo lamelas de dos grados intermedios, altura de la viga incluyendo únicamente el grado central. Z: Factor de ponderación que refleja la ubicación de la lámina en que aparece el nudo, respecto al eje neutro. Se calcula según la Tabla 3.7 que se enseña a continuación.

Tabla 3.7 – Factores a usar en el cálculo $R_i = \frac{I_K}{I_G}$ según la distribución característica de los nudos y el número de lamelas que conforma el laminado

Número de Láminas $n = 2N$	Factor de ponderación para la enésima lámina del eje neutro $Z = N^3 - (N - 1)^3$	Factores para 2N laminaciones		
		$\sum Z = 2N^3$	$\sum Z^2 = 2/5[N(9N^4 - 5N^2 + 1)]$	$[\sum Z^2]^{1/2} / \sum Z$
1	0,25	0,25	0,0625	1,000
2	1	2	2	0,707
3	3	6,75	21,1875	0,682
4	7	16	100	0,625
5	12,25	31,25	321,3125	0,573
6	19	54	822	0,531
8	37	128	3560	0,466
10	61	250	11002	0,420
12	91	432	27564	0,384
14	127	686	59822	0,357
16	169	1024	116944	0,334
18	217	1458	211122	0,315
20	271	2000	358004	0,299
22	331	2662	577126	0,285
24	397	3456	892344	0,273
26	469	4394	1332266	0,263
28	547	5488	1930684	0,253

3.4.6. Análisis estadísticos

Los diferentes resultados fueron sometidos a estadísticos descriptivos, verificando la participación porcentual cuando fue necesario. También fue implementado un análisis de varianza de dos factores, (especies + procedencia) x tres tercios ordenados. El estadístico de Tukey ayudó a detectar diferencias significativas entre los factores individuales y su

interacción, con una significancia del 95% ($\alpha < 0.05$). Para el caso de la razón de resistencia, se repitió el procedimiento estadístico recomendado por la norma ASTM 3737 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012a).

3.5. Resultados

Se presenta una galería visual con las anomalías en las maderas de *C. panamense* y *A. mangium* en la Tabla 3.8. Donde no fue posible colocar la imagen de la anomalía, no necesariamente significa que la especie no posea esta característica. Pues lo normal que cualquier madera, manifieste cualquiera de las anomalías mencionadas y enumeradas en dicha Tabla, solo que en proporciones diferentes.

Entre las anomalías más frecuentes se encontraron nudos, de todas las formas y tamaños, cambios en la configuración dimensional derivados en todos los tipos de alabeos (arqueadura, encorvadura, abarquillado y torcedura), la presencia de médula, común a todos los árboles, al igual que los nudos. También se hace referencia a los ataques biológicos, normalmente generados por hongos de manchado y pudrición, al igual que diferentes tipos de insectos, donde sobresalen las galerías generadas por larvas y adultos del orden Coleóptera.

Tabla 3.8 – Reporte Visual de las anomalías encontradas en las especies de *Campnosperma panamense* Standl. y *Acacia mangium* Willd.

Anomalía	<i>Campnosperma panamense</i> Standl.	<i>Acacia mangium</i> Willd.
Nudo Arracimado
Nudo con Corteza

Anomalía	<i>Campnosperma panamense</i> Standl.	<i>Acacia mangium</i> Willd.
Nudo Suelto
Nudo firme
Nudo con Pudrición
Corteza Inclusa
Duramen Quebradizo
Médula
Colapso

Anomalía	<i>Camposperma panamense</i> Standl.	<i>Acacia mangium</i> Willd.
Grano Inclinado
Grano Entrecruzado
Acebolladura
Escamadura
Arista Faltante
Dimensiones
Hongos Manchadores

Anomalia	<i>Campnosperma panamense</i> Standl.	<i>Acacia mangium</i> Willd.
Pudrición Blanca
Pudrición Parda
Perforaciones Pequeñas
Perforaciones Grandes
Madera Juvenil
Fallas de Compresión

Anomalía	<i>Camposperma panamense</i> Standl.	<i>Acacia mangium</i> Willd.	
Arqueadura
Abarquillado			
Encorvadura			
Torcedura
Rajaduras
Grietas			
Madera de Compresión
Madera de Tensión			

Anomalía	<i>Campnosperma panamense</i> Standl.	<i>Acacia mangium</i> Willd.
Maquinado
Albura/ Duramen

3.5.1. Anomalías presentes en un lote de madera de *Campnosperma panamense* Standl. después de seccionarse y clasificarse en longitud con destino a la fabricación de MLE

Tres elementos marcaron la pauta en la generación de desperdicios de esta madera durante su procesamiento, siendo ellos, las dimensiones de las piezas, la presencia de médula y la corteza incluida con una aportación del 22, 18 y 17%, respectivamente. En un segundo grupo y con una participación entre el 5 y 10% se destacan las rajaduras, escamaduras, y los nudos, ya menos relevante es la participación que tienen los ataques por insectos, los ataques por hongos y las acebolladuras con 0 a 5% de contribución, en cada caso. En la Tabla 3.9 se hace la relación específica de estos resultados, con una generación total de descartes arriba de 92 mL, de 908 mL que entraron al proceso inicial, representando un 10,23%, en este caso, el espesor de las piezas descartadas era de 42 mm.

Tabla 3.9 – Material descartado de madera de *C. panamense* para la fabricación de MLE y porcentaje de participación de cada una de las causas.

ANOMALÍAS	Total (cm)	Porcentaje (%)
Dimensiones	2064	22,2%
Médula	1686	18,1%
Corteza Incluida	1531	16,5%
Rajaduras	879	9,5%
No Usados en Finger Joint (FJ)	748	8,0%
Escamadura	701	7,5%
Desperdicios FJ	638	6,9%
Nudos	514	5,5%
Insectos	440	4,7%
Pudriciones	51	0,5%
Acebolladura	42	0,5%
Total	9294	100,0%

3.5.2. Anomalías presentes en un lote de madera de *Acacia mangium* Willd. posterior a la salida de la cámara de secado y sin seccionar en longitud con destino a la fabricación de MLE

Al inspeccionar 987 tablas de *Acacia* con longitudes entre 128 y 158 cm, se notó la presencia de anomalías en el 100% de las unidades como se verifica en la Tabla 3.10. Los nudos correspondieron al elemento más frecuente al estar presente en el 77% de las unidades, seguido de anomalías atribuidas al proceso de secado como la arqueadura y encorvadura, con 74 y 62% de participación, respectivamente. En otro nivel de aparición (25 al 40%), se presentan arista faltante, médula, abarquillado y rajaduras, donde las dos primeras atribuyen sus causas al proceso de aserrío y las siguientes al proceso de secado. Problemas biológicos como pudriciones y mancha azul siguen en la lista con participaciones de 14 y 11%, respectivamente; siendo imputables a problemas ajenos a la producción industrial como la silvicultura y la logística. Finalmente, es necesario aclarar que, en esta Tabla, la suma de los resultados porcentuales está por arriba del 100%, debido a que una misma pieza puede contener dos o más tipos de anomalías.

Tabla 3.10 – Porcentaje ordenado de aparición de las principales anomalías en la madera de *Acacia mangium* Willd. del Noroccidente del país.

ANOMALÍAS	Total (Unidades)	Porcentaje (%)
Nudos	763,0	77,30%
Arqueadura	726,0	73,56%
Encorvadura	615,0	62,31%
Arista Faltante	395,0	40,02%
Médula	319,0	32,32%
Abarquillado	267,0	27,05%
Rajaduras	259,0	26,24%
Pudrición	142,0	14,39%
Mancha azul	116,0	11,75%
Duramen quebradizo	81,0	8,21%
Dimensiones	79,0	8,00%
Grano Inclinado	65,0	6,59%
Coleópteros	63,0	6,38%
Escamadura	32,0	3,24%
Torcedura	30,0	3,04%
Sin anomalías	0,0	0,00%
Termitas	0,0	0,00%
Colapso-MJ ¹	0,0	0,00%
Corteza Incluida	0,0	0,00%
FCP ²	0,0	0,00%
Acebolladura	0,0	0,00%
Total Unidades	987	100,00%

Después de someter la madera al proceso de corte según la propuesta de clasificación en tres grados, que se presenta como recomendación al final de este documento, y con el objetivo de fabricar madera laminada encolada en dos calidades, se obtuvo por cada tipo de anomalía, un porcentaje de descarte para la madera de Am-NO, que se da a conocer en la Tabla 3.11. La generación total de descartes de madera estuvo por encima de 374 mL, respecto a un volumen de entrada aproximado de 2400 mL, lo cual representa un porcentaje de desechos del 15,6%. El autor hace hincapié que la madera de Acacia en esta etapa del proceso poseía un espesor cercano a 20 mm.

¹ MJ: Madera Juvenil

² FCP: Fallas de compresión perpendicular

Tabla 3.11 – Material descartado de madera de *A. mangium* Willd. para la fabricación de MLE y porcentaje de participación de cada una de las causas.

ANOMALÍAS	Total (cm)	Porcentaje (%)
Pudrición	11048,7	29,50%
Dimensiones	6066,3	16,19%
Rajaduras	4009,7	10,70%
Médula	3360,4	8,97%
Buenos <18 cm	2770,0	7,39%
Arista Faltante	2108,9	5,63%
Termitas	2000,3	5,34%
Escamadura	1961,0	5,24%
Nudo Muerto	870,5	2,32%
Nudo Hueco	818,2	2,18%
Colapso-Madera Juvenil	802,5	2,14%
Abarquillado	682,0	1,82%
Corteza Incluida	430,7	1,15%
Nudo Vivo	244,8	0,65%
Coleópteros	141,4	0,38%
Falla de Compresión Perpendicular	98,2	0,26%
Acebolladura	44,5	0,12%
Total	37458,2	100,00%

3.5.3. Valores de la razón de resistencia (RR_i) para cada caso

Los valores de la razón de resistencia para la especie Sajo se da a conocer en la Tabla 3.12. En el caso de la madera de Acacia y sus dos procedencias, se presentan los resultados en la Tabla 3.13 y la Tabla 3.14. En términos generales los valores de la variable en mención son menores cuando se trabajan los datos globales y en todos los casos, muy parecidos, al valor obtenido en el tercio de la población con mayor cantidad y tamaño de nudos en la madera. Contario a esta situación, los tercios de la población con menos nudos y nudosidad intermedia presentan valores que duplican y hasta triplican, los datos presentados en el tercio de la población más nudosa.

Tabla 3.12 – Valores obtenidos de la razón de resistencia para *Campnosperma panamense* Standl.

Estadístico	Toda la Población (N=94)	Población con menos nudos (n=31)	Población con nudosidad intermedia (n=31)	Población con más nudos (n=32)
Promedio (Xi)	0,115	0,026	0,090	0,225
Desviación Std. (Xi)	0,101	0,017	0,025	0,092
Coef.Variación (Xi)	87,6%	64,9%	27,3%	41,0%
Valor Mínimo (Xi)	0,000	0,000	0,059	0,135
Valor Máximo (Xi)	0,458	0,056	0,135	0,458
Percentil 99,5 de Xi(mi)	0,450	0,055	0,134	0,455
hi (mi-Xi)	0,335	0,029	0,045	0,230
Ri	0,450	0,055	0,134	0,455
RRi	0,304	0,956	0,849	0,296

Tabla 3.13 –Valores obtenidos de la razón de resistencia para la madera de *Acacia mangium* Willd. procedencia Noroccidente colombiano

Estadístico	Toda la Población (N=300)	Población con menos nudos (n=100)	Población con nudosidad intermedia (n=100)	Población con más nudos (n=100)
Promedio (Xi)	0,165	0,055	0,162	0,280
Desviación Std. (Xi)	0,101	0,040	0,028	0,053
Coef.Variación (Xi)	61,0%	71,5%	17,6%	19,0%
Valor Mínimo (Xi)	0,000	0,000	0,115	0,213
Valor Máximo (Xi)	0,433	0,113	0,212	0,433
Percentil 99,5 de Xi(mi)	0,415	0,113	0,212	0,429
hi (mi – Xi)	0,250	0,057	0,050	0,149
Ri	0,415	0,113	0,212	0,429
RRi	0,355	0,882	0,716	0,334

Tabla 3.14 – Valores obtenidos de la razón de resistencia para la madera de *Acacia mangium* Willd. procedencia Oriente colombiano.

<i>Acacia mangium</i> Willd. Oriente (Am-O)				
Estadístico	Toda la Población (N=89)	Población con menos nudos (n=29)	Población con nudosidad intermedia (n=30)	Población con más nudos (n=30)
Promedio (Xi)	0,212	0,087	0,191	0,354
Desviación Std.(Xi)	0,119	0,037	0,032	0,059
Coef.Variación (Xi)	56,1%	42,5%	16,8%	16,7%
Valor Mínimo (Xi)	0,000	0,000	0,150	0,263
Valor Máximo (Xi)	0,468	0,150	0,247	0,468
Percentil 99,5 de Xi(mi)	0,461	0,150	0,246	0,466
hi (mi-Xi)	0,249	0,063	0,055	0,112
Ri	0,461	0,150	0,246	0,466
RRi	0,287	0,824	0,653	0,280

Gráficamente, los resultados de las tablas anteriores pueden consultarse en la Figura 3.2. En el eje vertical se colocó el valor de participación de los nudos en la sección transversal y en el horizontal, los diferentes factores seleccionados. Como regla general la nudosidad aumenta en el sentido Cp - AmNO – AmO y en los tercios primero, segundo y tercero. En la parte (c) de la mencionada Figura, se verifica la agrupación de las combinaciones. Los datos más bajos de nudosidad se ubican hasta 0,10; los más altos, por encima de 0,20 y los intermedios entre 0,10 y 0,20.

Figura 3.2 - Diagramas de caja y bigote para la variable X_i presente en cada tipo de madera evaluada por especie (A) y por tercio (B) y evaluación conjunta de (especies + procedencias) x tercios (C).

3.5.4. Análisis de los resultados

Todas las maderas de las diferentes especies exhiben anomalías, por lo cual su estudio resulta una tarea inevitable para las aplicaciones de carácter estructural. Ineludible resulta también su origen para comprender de forma racional cómo se deben implementar los programas silviculturales tanto en el bosque natural como en las plantaciones. Tratamientos en vivero, labores de siembra, fertilización, podas, entresacas, entre otros tratamientos silviculturales, son fundamentales en la generación de futuros defectos de la madera (BATTIPAGLIA et al., 2014; BOURIAUD et al., 2005; CARDOSO et al., 2013; GÜNTNER et al., 2011; MEINZER; LACHENBRUCH; DAWSON, 2011; SCHWEINGRUBER, 2007; WORBES et al., 2003). Cuando llega la época de cosecha es muy poco lo que se puede hacer para controlar las características no deseables de la madera, excepto su desecho o destinación a aplicaciones de menor valor de mercado como pulpa, virutas o energía. El diagnóstico de anomalías muestra que casi todas, por no decir que todas, están presentes en las dos especies objeto de este estudio, en mayor o menor medida, y aunque los trabajos de cuantificación total de anomalías por medios análogos en la madera son escasos (YUNIANI; SUHASMAN;

SAHRIYANTI, 2015), los resultados para las dos especies abren la posibilidad de desarrollar modernas formas de detección por métodos digitales asociados al escaneo pensando en grandes volúmenes (LYHYKÄINEN et al., 2009; NIEMZ; MANNES, 2012).

En la madera de *C. panamense*, la principal fuente de desperdicios correspondió al ítem dimensiones. Entre las causas se destaca la presentación de la materia prima en bloques y su dimensionamiento local, el cual no está articulado con los productos finales a elaborar por parte de los clientes (POLANCO, 2002). Tal situación condicionó el re-aserrado para generar repisas de $6,8 \times 10 \times 275 \text{ cm}^3$, obligando a la división del ancho de 10 cm en dos partes iguales para obtener 4,5 cm; y aunque en apariencia es una operación que asegura la obtención de dos piezas limpias, las características de las repisas con arista faltante, dilucidada como corteza, en combinación con diferentes tipos de alabeos, menguaron el aprovechamiento de la madera, al obtener una sola pieza de las dos esperadas. La otra característica de importancia fue la médula. Este tejido presente en todos los árboles es de difícil eliminación dada la forma de presentación en bloques obtenidos localmente con sierra circular estacionaria. Esta realidad en el proceso, en combinación con madera juvenil (presumiblemente, en madera o trozas menores a 12 pulgadas de diámetro), inevitablemente generó bloques con médula centrada que van a heredar las piezas derivadas en el procesamiento siguiente.

De otra parte, las rajaduras son una consecuencia directa de dos factores: la liberación de tensiones en las trozas dados los gradientes de humedad entre la parte medular y la corteza (RANTA-MAUNUS, 2007) además de la ausencia de controles y cuidados en la operación logística de más de 3000 Km, para que la madera llegue desde los sitios donde crece hasta los centros de consumo. Si a esto se suma la presencia de grano inclinado y la separación del tejido entre los anillos de crecimiento, se colocan en evidencia las acebolladuras, que cuando están presentes en el canto de las piezas escuadradas y sin arista faltante, reciben el nombre de escamaduras; las cuales fueron muy evidentes en el material estudiado con una participación relevante. Contrario a lo que se podría pensar, la madera de Sajo reportó bajo descarte por nudosidades, haciéndola aún más atractiva en la utilización industrial para confeccionar productos de ingeniería, máxime cuando posee perspectivas interesantes para la impregnación (JUNAC, 1988).

Contrariamente al caso de *C. panamense*, la madera de *A. mangium* dispone de una alta presencia de nudos, pues están presentes en el 77% de la población evaluada, pero al aplicar

los criterios de clasificación propuestos, es un problema que se minimiza, pues los nudos solo representan el 5 a 6% de la madera desechada en el proceso de fabricación. En esta madera son más críticos los temas asociados al ataque biológico, principalmente por hongos de pudrición ataques de termitas y perforaciones originadas por coleópteros, que fueron los responsables del descarte de la madera en una tercera parte. Este es un problema que ha sido reportado en la literatura y precisa mejores acciones desde la silvicultura. En Colombia, para el caso de las plantaciones de esta especie del Oriente, el autor encontró evidencias de pudrición de la madera en árboles en pie desde los cuatro y hasta los nueve años de edad, en la Figura 3.3, se dan algunos ejemplos.

Figura 3.3 - Presencia de hongos de pudrición de duramen en madera de *A. mangium* plantada en los Llanos Orientales de Colombia. Ataque incipiente de hongos de pudrición blanca en forma de puntos en la superficie de madera (flechas rojas) (A). Combinación de hongos de manchado (flecha amarilla) con hongos de pudrición (flecha roja) (B). Ataque previo de hongos de pudrición con posterior alojamiento de termitas, la foto muestra la galería (flechas rojas) (C). Imagen del mismo árbol, con madera aparentemente sana a la altura del suelo (lado izquierdo) y madera con pudrición parda (flecha amarilla) y blanca (flecha roja) a una altura de 330 cm desde el suelo, en la zona de bifurcación (Lado derecho) (D).

Nota: En todos los casos los diámetros de la madera oscilan entre 15 y 20 cm.

Fuente: Semillero de investigación SIMAROUBA de la Universidad Distrital FJC, del cual el autor es el director.

Los valores de la RR_i se pueden considerar muy alentadores en las dos especies del presente estudio, si son comparados con la madera de *Pinus radiata* de Chile, por ejemplo; ya que en este último caso los valores reportados son de 0,56 para el Grado A y 0,50 para el Grado

B (INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 1991b). A pesar de ser la primera vez que se reporta este indicador para maderas en Colombia, es una práctica interesante de extender en las demás especies madereras del escenario nacional, con miras a formalizar y enriquecer el sistema nacional de clasificación de maderas.

En concordancia con lo anterior, la propuesta de clasificar la madera en grados que hagan una repartición uniforme el volumen ofertado, parece ser más sensata que una propuesta de clasificación que busque la madera *clear*, y en ese sentido es que esta investigación encontró diferencias significativas en la variable $R_i = \frac{I_K}{I_G}$, para las especies y procedencias estudiadas (ver Figura 3.2 (C)), en especial cuando se dividió la población en tres partes relativamente iguales, siguiendo los términos de referencia mencionados en la recomendación principal del este estudio.

3.6. Conclusiones

Las maderas de *C. panamense* Standl. y de *A. mangium* Willd. exhibieron anomalías que fueron categorizadas, descartadas y cuantificadas para diferentes lotes de madera seleccionados para tal fin, estimando su participación en el rango 10-16%, con relación al material al inicio del proceso. Esos valores ya involucran la madera recuperada y correctamente dispuesta en las partes centrales de vigas laminadas encoladas, que antes se desechaban del proceso de elaboración, lo cual generaba un volumen de desperdicio o descarte mucho mayor. Tal procedimiento demuestra que la implementación de metodologías recomendadas por normativas como la razón de resistencia (***RRI***), permitirá una mejor gestión de las mismas al favorecer su inclusión, teniendo en cuenta algunas restricciones, que serán sujetas a la aplicación de términos de referencia en los procesos de clasificación, que no riñan con la integridad de los productos de ingeniería, en especial sus propiedades físico-mecánicas, estéticas y de transformación. Una simple clasificación de la madera por aspecto redundará en un mejor aprovechamiento de sus propiedades mecánicas, así quedó demostrado al dividir la población en tres partes, con similar participación del volumen; aquí es recomendable adelantar otras evaluaciones de tipo mecánico, haciendo uso de metodologías no destructivas como las pruebas de vibración transversal y longitudinal. Derivados de las características de la madera perteneciente a cada tercio, el autor propone algunos términos de referencia para la

segmentación de la madera de las dos especies mencionadas, términos que son mostrados a continuación y que deberán ser verificados y aprobados por la industria nacional que procesa esta madera, para que, finalmente, sean afinados e incluidos en las normativas de carácter nacional, como la Norma Sismo Resistente o las Normas Técnicas Colombianas – NTC, de las cuales el autor es integrante de los Comités respectivos.

3.7. Recomendación

Se sugiere la aplicación de los términos de referencia mostrados en la Tabla 3.15, para utilización de la madera de *Campnosperma panamense* Standl. y *Acacia mangium* Willd. en la elaboración de MLE en Colombia. Para materializar esta iniciativa, se debe contactar a las empresas que producen, transforman y comercializan la madera de estas especies en diferentes presentaciones, para que de manera conjunta se seleccionen y anexas de manera vinculante los términos de referencia de estas maderas para los diferentes eslabones de la cadena de suministro. En tal ejercicio, se propone el acompañamiento de las empresas madereras involucradas directamente, además de el gremio (Fedemaderas), la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, el Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC), el Instituto Nacional de Normalización, la Asociación de Ingeniería Sísmica (AIS), entre otros.

Tabla 3.15 – Criterios seleccionados para la clasificación de la madera de Sajo y Acacia con el objetivo de fabricar madera laminada encolada en la nueva propuesta (CP).

Clasificación Visual General			
Grado A	Grado B	Grado C	Aplica para
Ausencia de nudos	Presencia de nudos vivos sin desprendimiento	Presencia de nudos vivos con desprendimiento y/o nudos muertos	Sajo
Nudos de cualquier tipo menores a 1/4 de las caras y cantos de la pieza ³	Nudos de cualquier tipo menores a 1/2 de las caras y cantos de la pieza ³	Presencia de nudos mayores a 1/2 de la cara y/o canto de la pieza ³	Acacia

³Los nudos serán medidos conforme la normativa ASTM D3737 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012a)

Clasificación Visual General			
Grado A	Grado B	Grado C	Aplica para
Aristas completas	Presencia de arista faltante sin comprometer dimensiones del producto final	Presencia de arista faltante comprometiendo dimensiones del producto final	Sajo, Acacia
Ausencia de médula centrada o en caras	Presencia de médula en las caras y/o en el borde de las secciones transversales	Presencia de médula en las caras y/o en el borde y/o en el centro de las secciones transversales	Sajo, Acacia
Ausencia de rajaduras	Ausencia de rajaduras mayores al ancho de la pieza	Presencia de rajaduras en cualquier dimensión	Sajo, Acacia
Ausencia de perforaciones	Ausencia de perforaciones grandes	Presencia de perforaciones en cualquier tamaño	Sajo, Acacia
	Presencia de perforaciones pequeñas ya curadas	Presencia de perforaciones vigentes	Sajo, Acacia
Homogeneidad de color, tonos y matices	Heterogeneidad de color, tonos y matices	Heterogeneidad de color, tonos y matices	Sajo, Acacia
Presencia de mancha azul moderada	Presencia de mancha azul en cualquier proporción	Presencia de mancha azul en cualquier proporción	Sajo, Acacia
Ausencia Fallas de compresión	Ausencia Fallas de compresión	Presencia Fallas de compresión	Sajo, Acacia
Ausencia de pudriciones	Ausencia de pudriciones	Presencia de pudriciones localizadas	Sajo, Acacia
Ausencia de escamadura	Presencia de escamadura sin comprometer dimensiones del producto final	Presencia de escamadura comprometiendo dimensiones del producto final	Sajo, Acacia
Homogeneidad en dimensiones	Homogeneidad en dimensiones con o sin presencia de alabeos	Heterogeneidad en dimensiones	Sajo, Acacia
Presencia de al menos una cara de duramen al 100%	Presencia de albura y/o duramen en cualquier proporción	Presencia de albura en las caras	Acacia
Grano Recto o levemente inclinado < 1/6	Grano inclinado hasta 1/6	Grano mayor a 1/6	Acacia

Fuente: Basado en la NSR 2010 (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA, 2010), modificado por el autor.

Referencias

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D245 Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber.**American Society for Testing and MaterialsUSA, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3737 Standard Practice for Establishing Allowable Properties for Structural Glued Laminated Timber (Glulam)**American Society for Testing and MaterialsUSA, 2012a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, A. **ASTM D3737-93c. Standard practice for Establishing Stresses for Structural Glued Laminated Timber (GLULAM)**United States, 2012b.
- ANDRADE, DE A. et al. **AUDITORIA EM CERTIFICAÇÃO DA QUALIDADE PARA PISOS DE MADEIRA.** Piracicaba, SP. Brasil: ITTO. International Tropical Timber Organization, 2013.
- ARGÜELLES, R.; ARRIAGA, F.; MARTÍNEZ, J. J. **Estructuras de Madera Diseño y Cálculo.** 2a. ed. Madrid, España: AiTiM, 2000.
- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA. **NSR-10, Título G Norma Sismoresistente Colombiana**Colombia, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE MADEIRA. **Pinus Catálogo de Normas de Madeira Serrada.** Caxias do Sul, RS, Brasil: [s.n.].
- AVRIEL, M.; BARRETT, J. D. Optimal design of pitched laminated wood beams. **Journal of Optimization Theory and Applications**, 1978.
- AWANG, K.; TAYLOR, D. **Acacia mangium: Growing and utilization.** MPTS monograph series No. 3Organization. [s.l: s.n.].
- BAÑO, V. et al. Prediction of bending load capacity of timber beams using a finite element method simulation of knots and grain deviation. **Biosystems Engineering**, v. 109, n. 4, p. 241–249, 2011.
- BATTIPAGLIA, G. et al. **Wood structure in plant biology and ecology**Dendrochronologia, 2014.
- BLANKENHORN, P. R.; BHUIYAN, M. S. H. Wood: Sawn Materials. **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**, 1 jan. 2016.
- BOURIAUD, O. et al. Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce. **Tree Physiology**, v. 25, n. 6, p. 651–660, 1 jun. 2005.
- CALIL JR., C.; MOLINA, J. C. **Coberturas em Estruturas de Madeira: Exemplos de Cálculo.** Sao Carlos, SP, Brasil: [s.n.].
- CARDOSO, D. J. et al. Influence of spacing regimes on the development of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 310, p. 761–769, dez. 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, C. **UNE EN 385: 1995. Finger Jointed Structural Timber- Performance requirements and minimum production requirements.** [s.l.: s.n.].

FAGGIANO, B.; MARZO, A.; MAZZOLANI, F. M. The Diplomatic Hall of the Royal Palace of Naples: Structural characterization of the timber roof by in situ ND investigations. **Construction and Building Materials**, ago. 2015.

GUINDOS, P.; ORTIZ, J. The utility of low-cost photogrammetry for stiffness analysis and finite-element validation of wood with knots in bending. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 2, p. 86–96, 2013.

GÜNTER, S. et al. **Tropical Forestry Silviculture in the Tropics**. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2011.

HAN, W.; BIRKELAND, R. Ultrasonic scanning of logs. **Industrial Metrology**, v. 2, n. 3–4, p. 253–281, maio 1992.

HUGHES, M. **Plywood and other veneer-based products**. [s.l.] Elsevier Ltd., 2015.

IBRAHIM, M. E. Nondestructive evaluation of thick-section composites and sandwich structures: A review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 64, p. 36–48, set. 2014.

INCONTEC. Norma Técnica Colombiana, NTC2500. 1997.

ÍÑIGUEZ, G. **Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural**. [s.l.] Universidad Politécnica de Madrid, 2007.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Regras para Medição e Classificação de Madeiras Duras**. Sao Paulo, SP, Brasil: [s.n.].

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, I. **NCh 2150.OF91. Madera Laminada Encolada- Clasificación mecánica y visual de madera aserrada de pino radiata**. Chile, 1991a.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, I. **NCh2165.OF91 TENSIONES ADMISIBLES PARA LA MADERA LAMINADA ENCOLADA ESTRUCTURAL DE PINO RADIATA** Chile, 1991b.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, I. **NCh 2165. OF91-Tensiones admisibles para la madera laminada encolada estructural de pino radiata**. Chile., 1991c.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, I. **NCh 1198 OF2006 Madera - Construcciones en Madera- Cálculo** Chile, 2006.

JUNAC, J. DEL A. DE C. **Manual de clasificación visual para madera estructural**. Lima, Perú: [s.n.].

JUNAC, J. DEL A. DE C. **Manual del Grupo Andino para la Preservación de Maderas**. Cali, Colombia: Proyecto Subregional de Promocion Industrial de la Madera para Construcciones de

la Junta del Acuerdo de Cartagena, 1988.

JUNAC, J. DEL A. DE C. **Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas**. Cali, Colombia: [s.n.].

KAMAL, K. et al. Wood defects classification using laws texture energy measures and supervised learning approach. **Advanced Engineering Informatics**, v. 34, n. February, p. 125–135, 2017.

KEENAN, F.J.; TEJADA, M. **Tropical Timber for Building Materials in the Andean Group Countries of South America**. Ottawa, Canada: International Development Research Centre, 1984.

LEON, W.; ESPINOZA, N. **Anatomía de la madera / Williams José León Hernández , Narcisana Espinoza de Pernía**. 1a Edición ed. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes, Consejo de Publicaciones, Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico, Venezuela, 2001.

LYHYKÄINEN, H. T. et al. Predicting lumber grade and by-product yields for Scots pine trees. **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 2, p. 146–158, jun. 2009.

MADSEN, B. **Structural Behaviour of timber**. First Edit ed. Altona, Manitoba, Canada: Timber Engineering LTD. North Vancouver; British Columbia, Canada, 1992.

MEINZER, F. C.; LACHENBRUCH, B.; DAWSON, T. E. **Size- and Age- Related Changes in Tree Structure**. Heidelberg London New York: Springer, 2011.

MOHALI, S.; ENCINAS, O.; MORA, N. Manchado azul en madera de *Pinus oocarpa* y *Azadirachta indica* en Venezuela. **Fitopatología Venezolana**, v. 15, n. 2, p. 30–32, 2002.

NAGAI, H.; MURATA, K.; NAKANO, T. Defect detection in lumber including knots using bending deflection curve: comparison between experimental analysis and finite element modeling. **Journal of Wood Science**, v. 55, n. 3, p. 169–174, 1 jun. 2009.

NBR - PN-02-126.10-001-1. Madeiras – Critérios de classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira de florestas plantadas. 2017.

NIEMZ, P.; MANNES, D. Non-destructive testing of wood and wood-based materials. **Journal of Cultural Heritage**, v. 13, n. 3, p. S26–S34, set. 2012.

NOWAK, T. P.; JASIEŃKO, J.; HAMROL-BIELECKA, K. In situ assessment of structural timber using the resistance drilling method – Evaluation of usefulness. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 403–415, jan. 2016.

ONG, C. B. Glue-laminated timber (Glulam). In: ANSELL, M. P. (Ed.). . **Wood Composites**. [s.l.] Elsevier Ltd., 2015. p. 123–140.

OSPINA, C. et al. **El Pino pátula**. [s.l.: s.n.].

PINEDA SCHLEEF, R. E. **EVALUACIÓN TEÓRICO - EXPERIMENTAL DE LA NORMA CHILENA NCH 1198 . OF2006 Y SU EQUIVALENTE EUROPEA , EUROCÓDIGO 5 , EN MADERA LAMINADA ENCOLADA CON UNIONES ENDENTADAS**. [s.l.] Universidad

Austral de Chile, 2008.

POLANCO, C. Aplicación de la tecnología de maderas en la solución de un problema evidente de la industria forestal de madera aserrada. **Colombia forestal**, v. 7, n. 148, p. 153–162, 2002.

RANTA-MAUNUS, A. **Strength of Finnish grown timber**. Helsinki, Finland: [s.n.]. v. VTT Public

SCHWEINGRUBER, F. H. **Wood Structure and Environment**. [s.l.: s.n.].

SPATZ, H.-C.; BRUECHERT, F. Basic biomechanics of self-supporting plants: wind loads and gravitational loads on a Norway spruce tree. **Forest Ecology and Management**, v. 135, n. 1–3, p. 33–44, set. 2000.

TONINI, H.; HALFELD-VIEIRA, B. D. A. Desrama, crescimento e predisposição à podridão-do-lenho em *Acacia mangium*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 7, p. 1077–1082, jul. 2006.

UNE. **UNE 56544-2011. Clasificación Visual de la Madera Aserrada para uso Estructural. Madera de Coníferas** España, 2011.

UNE. **UNE 56546:2011 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de frondosas**. Disponible en: <<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?Tipo=N&c=N0048311>>.

VALVERDE, J. C.; MOYA, R. Correlation and modeling between color variation and quality of the surface between accelerated and natural tropical weathering in *Acacia mangium*, *Cedrela odorata* and *Tectona grandis* wood with two coating. **Color Research & Application**, v. 39, n. 5, p. 519–529, 21 out. 2014.

WORBES, M. et al. Tree ring analysis reveals age structure, dynamics and wood production of a natural forest stand in Cameroon. **Forest Ecology and Management**, v. 173, n. 1–3, p. 105–123, fev. 2003.

YUNIANI, A. D.; SUHASMAN, S.; SAHRIYANTI, S. Basic properties and nanostructure of wood from four fast growing species from a community forest. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 12, n. 2, p. 94–98, 21 jun. 2015.

ZAMBRANO TRIVIÑO, C. A. **Diseño de piezas de madera de pino radiata a través del método LRFD y su aplicación a una estructura de madera**. [s.l.] Universidad Austral de Chile, 2012.

ZENID, G. J. **Noções de classificação de toras e de madeiras serradas**. São Paulo, SP, Brasil: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990.

4. REPORTE DE LA OBTENCIÓN DE MLE EN COLOMBIA CON ÉNFASIS EN DOS EMPRESAS NACIONALES

Resumen

Colombia posee en torno de nueve empresas que se dedican total o parcialmente a fabricar MLE. Este trabajo compara dos esquemas de elaboración de MLE, el primero, cerca de Bogotá D.C. con una capacidad de producción estimada de cinco mil $\text{m}^3\cdot\text{año}^{-1}$ y el segundo, cerca de Medellín con una capacidad máxima de mil $\text{m}^3\cdot\text{año}^{-1}$. Las dos locaciones con características climáticas, especies, adhesivos y procesos de transformación diferentes. La primera empresa emplea coníferas, especialmente *Pinus radiata* proveniente de Chile, aunque aquí se presenta el caso particular para una especie local conocida como Sajo (*Campnosperma panamense*), donde toda la producción se dedicará a uso estructural. La segunda empresa, trabaja con la especie *Acacia mangium* y a la fecha desarrolla productos estructurales, para mobiliario y con fines decorativos, siguiendo estándares de fabricación para uso estructural. Para cada locación los adhesivos varían, siendo MUF y EPI los usados por la primera y segunda empresa, respectivamente, con un proveedor en común. En cuanto a la transformación, se identificaron 26 diferentes operaciones principales, cada una asociada a un proceso bien definido. Las operaciones de encolado y sus indicadores de calidad, al igual que el control del volumen de madera y adhesivo, son los elementos de mayor criticidad en la obtención de MLE. Comparativamente, las empresas difieren en la forma de trabajar, dadas las características asociadas a madera y adhesivo, pero sobre todo las diferencias tecnológicas y climáticas, marcan asimetrías en los procesos y operaciones predominantes, afectando incluso los esquemas organizacionales y administrativos.

Palabras clave: Industria maderera; Adhesivo MUF; Adhesivo EPI; Acacia; Sajo; Finger joint

4.1. Introducción

La madera laminada encolada (MLE) es uno de los productos derivados de la ingeniería con mayor perspectiva en Colombia. Por un lado, la decadencia de la madera maciza impuesta por las mayores regulaciones y controles sobre las fuentes naturales de la materia prima (CORTECONSTITUCIONAL, 2008), de otra parte, la desaparición de especies e individuos de grandes tamaños que abundaban en los bosques naturales del país por la sobreexplotación generalizada (VICTORINO, 2012) y por último, la creciente oferta de madera proveniente de plantaciones satisfaciendo requisitos de sostenibilidad ambiental, que se han convertido, en conjunto, en un elemento de presión social en favor del medio ambiente

(GARCÍA ROMERO, 2013); han redireccionado los mercados, forzando a quienes trabajan con madera en dos sentidos: El primero, es iniciando importaciones desde Europa (*Abies sp.*), EUA (*Pinus spp.*) y Chile (*Pinus radiata*) (PANTOJA DIAZ, 2012); y el segundo, a partir de mudanzas en los modelos de transformación de plantaciones nacionales (*Pinus caribaea*, *Acacia mangium*) o fuentes naturales que pudiesen representar sostenibilidad en el largo plazo (*Prioria copaifera*, *Campnosperma panamensis*) (MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2014; RESTREPO SALAZAR, 2011).

Por lo general la madera proveniente de plantaciones no satisface los tamaños a los que tenía acostumbrado al mercado la madera del bosque natural. Piezas estructurales de hasta 12 m de longitud de *Cariniana pyriformis* en los puntos de comercialización (BELTRÁN ROJAS; LEÓN PRIETO, 2016), son una utopía en el caso de la madera de plantaciones. Normalmente los puntos de optimización de los criterios económicos en las plantaciones, hacen que la madera sea cosechada en un punto donde las trozas difícilmente proporcionarían maderas de grandes dimensiones para las aplicaciones finales (RESTREPO OROZCO, 2010). Y si así fuera, las maderas provenientes de plantaciones no satisfacen *a priori* las características de las maderas con tradición de uso provenientes del bosque natural, donde su aplicación se extendía en un amplio abanico, sin la obligatoriedad de procesos como el secado. Muestra de ello, son las innumerables estructuras de la época colonial, que hoy después de 200 años prevalecen intactas en nuestros países andinos (JARAMILLO JIMÉNEZ, 2004).

Dado lo expuesto, es una realidad que las empresas colombianas deben convivir en su día a día con las particularidades aleatorias de la madera proveniente de plantación y en menor proporción con las maderas de bosques naturales, donde la constante son las pequeñas dimensiones y la presencia abundante de defectos (BERNAL BARAJAS, 2004). Lo anterior empuja hacia modelos industriales donde la madera sea reconstituida en forma de chips o de piezas pequeñas, y es aquí donde tiene cabida la MLE. El presente trabajo tiene por objetivo dar conocer los procedimientos constructivos de MLE de dos empresas ubicadas en el país, haciendo referencia a las debilidades y fortalezas de cada una, visualizando una cultura de fabricación y construcción con este material que sirva de modelo para los nuevos emprendimientos nacionales que quieren incursionar con este material y bajo estos procesos.

4.2. Metodología

4.2.1. Inventario de empresas

Para la selección de las empresas se realizó una búsqueda en los directorios de páginas amarillas a nivel nacional. También se indagó con personal experto en el tema y se asociaron las estructuras en madera laminada más insignes con las empresas fabricantes. Después de generar el listado de las empresas, los autores realizaron contacto con estas, verificando la inclusión de procesos asociados a la elaboración de MLE a través de visitas a sus instalaciones.

4.2.2. Selección de empresas

En el desarrollo del trabajo se indagó en cada una de las empresas sobre la posibilidad de desarrollar actividades de investigación al interior, también se tuvo en cuenta el conocimiento del personal y las potencialidades de los procesos que aseguraran su continuidad. Un factor adicional fue la empatía con el personal vinculado a la empresa y la ausencia de secretos industriales que generarán recelo entre los propietarios. Dos empresas dieron su visto bueno para trabajar allí.

4.2.3. Descripción de los procesos de maquinado

En esta etapa del trabajo se listaron la totalidad de procesos de transformación asociados a la madera laminada. Se verificaron las capacidades a través de la maquinaria presente y los puntos críticos para el control de la calidad. Para ello, se realizó el seguimiento visual de las actividades de cada proceso, registrando los puntos de control en cada uno que al final fueron señalados como determinantes en la calidad final del producto.

4.2.4. Observaciones

Finalmente, el autor realizó algunas observaciones a los diferentes procesos de obtención de MLE, que pueden considerarse como elementos críticos para iniciar los futuros planes de mejora, direccionando dos objetivos: La reducción de costos, el mejoramiento de la calidad.

4.3. Resultados

Del inventario de empresas se obtuvo un listado inicial que es mostrado en la Tabla 4.1. La capacidad instalada está en torno de los 14,000 m³, aunque la capacidad usada es mucho menor. Dos empresas procesan madera importada de Chile, cuatro empresas trabajan con madera de Pino plantado en Colombia, una empresa importa laminados de Europa, dos empresas elaboran MLE con una especie nativa del género *Handroanthus* y una está incursionando recientemente con madera de Acacia. La forma de adquisición de la materia prima cambia según la especie y procedencia. Así, por ejemplo, el pino que viene de Chile se compra como cepillado y seco, en diferentes grados de calidad, dependiendo el proyecto de construcción y sus términos de referencia. Esta madera es adquirida a la empresa Arauco. La madera de Pino y Acacia plantada en Colombia se adquiere en forma de trozas, lo que implica que estas empresas estén articuladas verticalmente. Mientras tanto la madera de Flormorado o Roble (*Handroanthus sp.*) puede adquirirse en bloques escuadrados, donde previamente con la ayuda de una motosierra o sierra circular son convertidas las trozas.

En cuanto a la selección de las empresas, se obtuvo consentimiento en una del centro del país donde la mayor parte del tiempo se trabajan materias primas provenientes de Chile, solo que en esta ocasión se evaluó el proceso para la madera de Sajo (*C. panamense*); y en otra del noroccidente colombiano que está fortaleciendo su industria y en la actualidad lamina madera de Acacia. Estas empresas accedieron para trabajar en su interior y a criterio de los autores, son representativas por la continuidad de los procesos, su participación en el mercado y contacto con el sector de la construcción. No se mencionan los nombres de las empresas por petición de las mismas. La Figura 4.1 da cuenta de algunas obras en MLE realizadas en el país por estas y otras empresas.

Referente a la descripción de los procesos de transformación, la Tabla 4.2 y la Tabla 4.3, listan los procedimientos de la empresa del centro del país (Empresa A) y la del noroccidente (Empresa B). Se presenta el listado, la máquina dominante del proceso, los indicadores de calidad y algunas observaciones relevantes. La Figura 4.2, da a conocer imágenes de los procesos más relevantes.

La adquisición de materia prima como producto aserrado seco o como troza por las dos empresas, marca profundas diferencias. La mera labor de compra de madera lista para elaborar MLE, permite la rápida especialización y control de las especificaciones de producto. Por otro lado, la compra de trozas, su transformación en el aserrío y posterior preparación para el secado, demanda mayores recursos financieros, de personal y administración, desviando la atención de los productos laminados, pues en Colombia las grandes empresas madereras integradas verticalmente, son comparables con pequeñas empresas de Brasil o Chile, incluso, medianas empresas de Argentina, por citar algunos ejemplos. La falta de homogeneidad en la materia prima, la presencia de distintos grados de calidad después de la transformación, coadyuvado con los relativos bajos volúmenes de transformación (20-40 m³.día⁻¹ de trozas) y niveles de aprovechamiento, generan sobrecostos que condicionan todas las operaciones subsiguientes, sobre todo por la obtención de producto no conforme para MLE, que exige la consecución óptima de clientes que consuman la totalidad de grados.

También se puede decir que los registros de información para trazabilidad están en proceso de implementación. Eso sí, las empresas controlan las variables críticas generadoras de calidad como el contenido de humedad, el cual es responsable del 46% de los problemas de desempeño en MLE, según se referencia internacionalmente (DIETSCH; TANNERT, 2015). En el caso de la empresa A, a pesar de que se delega esta responsabilidad al proveedor, se realizan verificaciones intermitentes con higrómetro de puntilla; en la empresa B, el control se hace *block a block*⁴, con higrómetros manuales de contacto. Cuando se presenta producto no conforme, se genera una reclamación o se devuelve al proceso de secado, según se trate de la empresa A o B, respectivamente.

⁴ *Block*: Se denomina así a la pieza de madera maciza básica objeto de FJ, cuya unión longitudinal generará las lamelas que a su vez conformarán el laminado final.

Tabla 4.1 – Listado de empresas que hacen o han participado en la fabricación de MLE en Colombia

Empresa	Ubicación	Procesos, especies	Capacidad (m³/año)	Sitio Web
Ripoll Laminados	Bogotá, D.C.	Fabrica, <i>Pinus</i>	5000	http://co.kompass.com/c/ripoll-laminados-s-a-s/co012680/
Taller de Ensamble	Bogotá, D.C.	Fabrica, <i>Pinus</i>	1368	http://www.tallerdensamble.com/
Inmunizadora Serye	Medellín, Antioquia	Fabrica, <i>Pinus</i>	2000	http://inmunizadoraserye.com.co/
Aserrío y Reforestadora Plantar S.A.	San Pedro de los Milagros (Antioquia)	Fabrica, <i>Pinus</i>	1200	http://www.aserriplantar.com/
Madepátula	Medellín, Antioquia	Fabrica, <i>Pinus</i> , <i>Handroanthus</i> Importa, <i>Abies</i>	1200- α	http://www.paginasamarillas.com.co/empresa/abastecedora+aserrio+madepatula-bello-15492059
Inmunizadora Colombia	Marinilla, Antioquia	Fabrica, <i>Pinus</i> , <i>Handroanthus</i>	1500	http://www.paginasamarillas.com.co/empresa/inmunizadora+colombia-medellin-15553796
Refocosta S.A.S	Villanueva, Casanare	Fabrica, <i>Pinus</i>	1200	http://refocosta.com
Cacerí	Planeta Rica, Córdoba	Fabrica, <i>Acacia mangium</i>	800	http://www.caceri.com/
Cooperación Verde	Orinoquía y Sabana de Bogotá	Fabrica, <i>Acacia mangium</i>	300	http://cooperacionverde.com/

Fuente: (POLANCO, 2013) Modificado 2018

El punto de referencia para la humedad de la madera es 12% ($\pm 2\%$), en las dos situaciones. Las cámaras de secado con mayor participación en el país son: Mahild, Termolegno, Gottert y Secal. Los programas son guiados por los proveedores y ajustados según la necesidad por las empresas nacionales de manera independiente o en colaboración con especialistas en programación y automatización.

En cuanto a la maquinaria, el país no desarrolla máquinas principales para MLE, solo equipamientos como prensas metálicas de hasta 12 m de longitud, compresores y extractores neumáticos. El autor estima que la baja demanda actual no es un aliento para estos emprendimientos. En contraposición, el listado de proveedores de maquinaria importada es grande, ya que al menos cinco empresas se dedican a este rubro. Sobresalen marcas como Omga, Weinig, Benecke, Linares, las cuales son elaboradas en sus países de origen y/o China, además de algunas marcas de Taiwán y China. Normalmente se adquieren paquetes completos desde la preparación de las superficies de la madera aserrada seca, hasta cepillos y lijadoras que dan el acabado final.

Figura 4.1 - Algunas estructuras en MLE instaladas en Colombia: Pabellón Corferías - Bogotá, D.C. (A). Parque Ukumarí – Pereira (B). Iglesia - Bogotá, D.C. (ARQUITECTOS, 2017) (C). Parque ARVI – Medellín (D). Caja de madera – Medellín (E). Iglesia – Medellín (F). Hotel - Medellín (G). Cámara de Comercio de Bogotá – Bogotá D.C (H).

Para las herramientas de corte, son las mismas empresas proveedoras de maquinaria quienes abastecen este segmento, aunque con un soporte técnico diferente, ya que su fabricación no siempre coincide con los fabricantes de máquinas. Las empresas de MLE desarrollan sus propios esquemas de afilado o delegan en pequeñas empresas nacionales aparentemente especializadas.

El otro aspecto relevante hace referencia a los adhesivos y su preparación. A propósito, en Colombia existe una empresa, Akzo Nobel - Interquim S.A., que suministra producto para empresas en Centro y Suramérica. Esto brinda un gran respaldo para la implantación y desarrollo industrial en todas los emprendimientos, que normalmente inician con colas del tipo Polivinil Acetato (PVA) y migran a adhesivos estructurales como Isocianato (EPI), Melamina Úrea Formol (MUF) y Poliuretano (PUR) (LÓPEZ; POLANCO; BERMÚDEZ, 2013). Esta empresa tiene contacto permanente con la multinacional que posee un área de I&D+i⁵ bien consolidado y a la vanguardia del tema en el planeta (AKZONOBEL, 2017). La ubicación de las dos empresas evaluadas es fundamental en los tiempos de fabricación, pues la empresa A está en un área con temperaturas promedio cercanas a 15°C y menos, determinando tiempos de fraguado del adhesivo del orden de 14 horas; mientras que la empresa B, solo precisa alrededor de 4 horas, pues las temperaturas promedio allí rondan los 25°C durante todo el año.

En lo que respecta al tema de interventorías, el país no cuenta con empresas formalizadas y especializadas que se dediquen tiempo completo a la evaluación de estructuras en madera. Normalmente, son contratados consultores, que pueden ser profesores universitarios o ingenieros de las mismas empresas quienes hacen recomendaciones frente a temas específicos o conceptos de carácter técnico-legal.

⁵ Investigación, desarrollo e innovación.

Tabla 4.2 – Procesos iniciales para dos empresas que fabrican MLE en Colombia

Proceso	Máquina/ Equipo	Indicador Calidad Madera-Proceso	Empresa A	Empresa B
Recepción de materia prima troza	Montacargas, Camiones, Tractores trineumáticos	Tamaño, rectitud, conicidad, grietas, manchas (clasificación visual)	No aplica	A partir de plantaciones propias
Clasificación	Manual	Asignación patrones de corte, porcentaje de aprovechamiento	No aplica	Solo por tamaños
Aserrío principal	Aserrío Wood Mizer	Dimensiones- tolerancias, superficies, porcentaje de aprovechamiento	No aplica	Se aísla centro
Aserrío secundario	Aserrío Wood Mizer	Porcentaje de aprovechamiento, dimensiones- tolerancias, superficies	No aplica	Para costaneras
Estibado	Manual	Contenido de humedad, cantidades, forma de apilado, muestreo humedad	No aplica	Normalizado para las cámaras existentes
Secado	Secaderos Mahild- Termolegno	Contenido de humedad, temperatura, alabeos, grietas, manchas, gradiente humedad, dimensiones- tolerancias	No aplica	Se han desarrollado internamente
Acondicionamiento	Manual	Tiempo, temperatura, contenido de humedad, separación	Lo debe realizar el proveedor	No está formalizado, los procesos siguientes demandan agilidad

Tabla 4.3 – Procesos fundamentales para dos empresas que fabrican MLE en Colombia

Proceso	Máquina/ Equipo	Indicador Calidad	Empresa A	Empresa B
Clasificación	Manual	Grados de madera, cantidades por grado	No se realiza en planta, el grado lo define el proveedor	No se realiza
Moldurado	Weinig/V-Hold	Contenido de humedad, dimensiones-tolerancias, calidad superficies	6-20 mL.min ⁻¹	20-35 mL.min ⁻¹
Obtención de blocks	Sierra radial de mesa/ Acolilladora	Grados, longitud mínima, aprovechamiento	Solo a 800 mm	180 - 1000 mm
<i>Finger Joint</i> (FJ)	YNF/Hollywood	Dimensiones, acabados laterales	10-11 mm	10-11 mm
Encolado puntas	Manual	Tiempo desde maquinado	No se contrata	No se contrata
		Proporción adhesivo- catalizador, tiempo abierto-cerrado, spread	En exceso	En exceso
Prensado	YNF/Hollywood	Presión longitudinal presión caras, tiempo prensado, secuencia piezas, longitud- tolerancias, ajuste <i>finger joint</i>	Se controla, no entre especies	Se controla
Fraguado	Manual	Tiempo, temperatura ambiente, humedad relativa, prueba de resistencia (manual o mecánica y no destructiva)	Mínimo 24 horas, sin prueba de resistencia	Mínimo 24 horas, sin prueba de resistencia
Moldurado Caras y/o cantos	Weinig/V-Hold	Dimensiones, porcentaje superficies no maquinadas, velocidad avance, rugosidad	No control de rugosidad	No control de rugosidad
Prearmado	Manual	Secuencia uniones, longitud final, posición lamelas	Se hace	No se hace
Encolado	Manual	Tiempo desde último maquinado	No se contrata	No se contrata
		Proporción adhesivo- catalizador, mezclado, tiempo abierto adhesivo, spread, distribución homogénea	Con brocha	Con rodillo encolador

Proceso	Máquina/ Equipo	Indicador Calidad	Empresa A	Empresa B
Armado	Manual	Separación FJ entre lamelas sucesivas, tiempo cerrado adhesivo	Fuera de la prensa	En la prensa
Prensado	Elaboración propia/ Hollywood	Presión en caras, distribución carga, tiempo prensado, secuencia lamelas, ancho-tolerancias, control puntas	Se controla en compresor	Se controla en prensa
Fraguado	Manual	Tiempo, temperatura ambiente, humedad relativa, microdelaminación-manipulación	Mínimo 24 horas	Mínimo 24 horas
Cepillado/ Lijado	Hurtado	Dimensiones-tolerancia, calidad superficies	Para dimensiones finales	Para acabado
Planeado/ Aserrado ancho	Hurtado/ Sierra circular paralela de mesa	Dimensiones-tolerancia, calidad superficies	Para dimensiones finales	Para acabado
Recorte puntas	Motosierra/Sierra circular paralela de mesa	Dimensiones-tolerancia, calidad superficies, marcación	Para dimensiones finales	Para acabado
Maquillaje	Manual	Apariencia	Para acabado	Para acabado
Embalaje	Manual	Contenido de humedad, dimensiones, marcación	Con polietileno	Con polietileno
Almacenamiento	Montacargas	Tiempo, temperatura ambiente, humedad relativa, prueba de resistencia (manual o mecánica y no destructiva), separación entre piezas	No genera inventario	Si genera inventario

Figura 4.2 - Imágenes de los procesos principales en la obtención de MLE: Fuentes Materia Prima (A)*. Trozas en patio (B). Aserrío (C)*. Secado en cámara (D). Traslado al área de MLE (E). Clasificación (F). Homogenización dimensiones (G). Dimensionamiento longitud (H). *Finger joint* (I). *Finger joint* (J). Fraguado lamelas (K). Homogenización espesor (L). Encolado caras (M)*. Prensado neumático (N). Prensado manual (O)*. Transporte (P)*. Algunas tomadas directamente por el autor y las marcadas con "*" obtenidas de (POLANCO, 2007; WOODMIZER, 2017)

En la actualidad los precios por m³ de la MLE en el país están 1.5 a 2.5 veces por encima del estándar internacional (USD\$1200.m⁻³). Esto es una ventaja en la medida que permite absorber los sobrecostos por ineficiencias del proceso, descarte de materia prima e insumos. A la vez es una desventaja porque los altos precios no estimulan un consumo masivo. Tal vez esta sea la causa de la existencia de MLE importada. Con el tiempo se espera llegar a un equilibrio ajustado a una mayor demanda, dado un mayor aprovechamiento de las capacidades disponibles y la madera, un avance en los temas normativos y un mayor convencimiento de más diseñadores que especifiquen el material. A propósito, la preparación de docentes en los centros de formación será fundamental.

Los principales centros de apoyo a estas empresas son los proveedores de maquinaria, herramientas e insumos. Cuando se presentan problemas técnicos se recurre en primera instancia a las universidades y los consultores especializados en MLE, siendo necesaria la conformación de un instituto especializado en el tema de apoyo permanente, pues los casos internacionales citan que alrededor del 30% de los problemas asociados a los proyectos de MLE son causados por deficiencias en la resistencia (DIETSCH; TANNERT, 2015), situación atribuible a una falta de capacitación y preparación en la temática.

Aunque los indicadores de calidad están bien definidos en cada proceso, es muy difícil la evaluación total de cada uno de ellos, cuando la madera pasa por los diferentes procesos, y menor es aún el registro de información para posterior trazabilidad. El éxito de la fabricación para las dos empresas corresponde a la técnica desarrollada por cada uno de los operarios y auxiliares, quienes con los años han aprendido el arte de la caracterización visual de la madera. Muchos procesos son susceptibles de mejora, como es normal en toda industria, y las escalas del negocio irán permitiendo avances significativos en la medida que aumenten los proyectos concretados. Ya que en el caso de la empresa A no todo el año hay proyectos, propiciando el nivel de ocio, mientras que la empresa B mantiene actividad toda la temporada dada la variabilidad de frentes de trabajo con la madera. Esto incide directamente en la conformación de una estructura administrativa compacta, en el primer caso, que puede dedicar tiempo disponible a la planeación estratégica, incluida labores de investigación, desarrollo e innovación. En el segundo caso, las labores del día a día pueden ahogar esa posibilidad.

4.4. Conclusiones

El país ha venido ganando confianza en la MLE, una razón fundamental es que los especificadores de proyectos resultan convencidos por las obras ya construidas y la seguridad de proveedores nacionales, con quienes actúan de manera permanente.

La confianza se ha visto reflejada en los empeños industriales, sus propietarios han realizado inversiones importantes en asegurar mejores volúmenes, ingeniería en el diseño y la transformación, además de desarrollar capacidades diferenciadas como MLE curva y mayores vanos.

Comparando las dos empresas seleccionadas, la A, representa mayores ventajas en favor de la MLE, en la medida que al no tener que ver con la generación de madera, cosecha, aserrío y secado, puede concentrar esfuerzos hacia adelante en temas como diseño arquitectónico, cálculo estructural e integración horizontal, en especial, de la mano con proveedores del tipo metalmecánico y logístico, en el caso de los herrajes y transporte e instalación.

Lo anterior pone de manifiesto que el futuro de la MLE en Colombia dependerá de una mayor especialización en las empresas, donde las similares al tipo B se encarguen del suministro exclusivo de materias primas secas, y las del tipo A se concentren en la fabricación de MLE en sí y el trabajo conjunto con diseñadores, especificadores, ingenieros, constructores y entidades de I&D+i como los centros de investigación especializados en las universidades.

Un punto flaco al día de hoy corresponde al conocimiento de las normativas de clasificación, fabricación, desempeño y construcción con materias primas y MLE, las cuales han sido adoptadas para especies nacionales de las normas en que se basa el EC5, el NDS y las normas ASTM, dejando algunos vacíos en cuanto a su aplicabilidad, vacíos que son compensados con sobredimensionamiento, que en últimas representan sobrecostos para el mercado.

Referencias

- AKZONOBEL. **AkzoNobel N.V.** [NL]. Disponible em: <<https://www.akzonobel.com/home>>. Acceso em: 31 mar. 2017.
- ARQUITECTOS, C. R. I. **Constructora RB Ingenieros Arquitectos**. Disponible em: <<http://www.constructora-rb.com/proyectos/cubiertas/madera/>>. Acceso em: 31 mar. 2017.
- BELTRÁN ROJAS, J. P.; LEÓN PRIETO, D. O. **Comportamiento del Comercio de Madera Proveniente del Bosque Natural en Colombia**. [s.l.] Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, 2016.
- BERNAL BARAJAS, S. A. **Documentación Técnica del Uso de Maderas en proyectos Constructivos de Viviendas**. [s.l.] Universidad Industrial de Santander, 2004.
- CORTECONSTITUCIONAL. **Sentencia C-030/08** Colombia, 2008. Disponible em: <<http://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2008/C-030-08.htm>>
- DIETSCH, P.; TANNERT, T. Assessing the integrity of glued-laminated timber elements. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 1259–1270, 2015.
- GARCÍA ROMERO, H. **Deforestación en Colombia: Retos y perspectivasEl Desafío del Desarrollo Sustentable en América Latina**. Bogotá, D.C., Colombia: [s.n.]. Disponible em: <[http://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/11445/337/3/KAS SOPLA_Deforestacion en Colombia retos y perspectivas.pdf](http://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/11445/337/3/KAS_SOPLA_Deforestacion%20en%20Colombia%20retos%20y%20perspectivas.pdf)>.
- JARAMILLO JIMÉNEZ, J. O. **Análisis Clásico de Estructuras**. Manizales, Colombia: [s.n.].
- LÓPEZ, F.; POLANCO, C.; BERMÚDEZ, J. Caracterización mecánica estructural para veinte combinaciones de madera laminada encolada. **Revista Colombia Forestal**, v. 16, n. 2, p. 138–157, 2013.
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. **Gobernanza forestal. Corporación Autónoma Regional de Risaralda – CARDER, Colombia.**, p. 8, 2014.
- PANTOJA DIAZ, A. Importación de Madera Maciza : **Revista el Mueble y la Madera**, n. 77, p. 28–35, 2012.
- POLANCO, C. **Comercialización de la Madera en Colombia y sus Oportunidades**. (Alma Mater, Ed.)Ibagué, Colombia: 2007Disponible em: <http://www.almamater.edu.co/Memorias.PDF/5.Comercializacion.de.Madera_Cesar.Polanco_Refocosta.pdf>
- POLANCO, C. **Caracterización mecánica de la madera laminada y posibilidades para el sector de la construcción**. [s.l.] Universidad de los Andes, 2013.
- RESTREPO OROZCO, H. I. **Estimación del rendimiento forestal con información espacialmente explícita y análisis financiero de plantaciones forestales en Colombia**. [s.l.] Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 2010.
- RESTREPO SALAZAR, J. C. **Plan de acción para la reforestación comercial**. Bogotá, D.C.,

Colombia: [s.n.].

VICTORINO, A. R. **Bosques para las personas, memorias del año internacional de los Bosques, 2011**. Bogotá, D.C., Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2012.

WOODMIZER. **Woo Mizer**. Disponível em: <<http://woodmizer.com/eng/Products/Industrial-Equipment/Smart-Log-Processing>>. Acesso em: 31 mar. 2017.

Anexo A

Evaluación de la línea de adhesión en las vigas de MLE fabricadas

Cizallamiento en la línea de cola

Los valores de resistencia en la línea de cola mostraron diferencias significativas para los factores aislados especie y extremo ($q < 0.05$), más no, para los factores aislados, norma y posición. Este último caso, hace referencia a la parte donde fue tomada la pieza laminada, si al lado izquierdo o al lado derecho de la viga. La combinación de los factores norma de clasificación posición, generó diferencias significativas en los esfuerzos de resistencia en la línea de cola ($q < 0.05$). El extremo donde fue extraída la madera incidió en la interacción norma x posición x extremo para que se generarán diferencias significativas en los valores de resistencia de las líneas de cola para esas combinaciones ($q < 0.05$). Los valores pueden ser consultados en la Tabla 4.4.

Las siguientes figuras de este anexo, dan a conocer en el primer caso, los valores de resistencia de la línea de cola por especie (Figura 4.3A). En Acacia, la mayoría de los valores estuvieron entre 3 y 7 MPa, con tendencias a favor del sistema de clasificación de la madera por grados de la NSR-10 y las lamelas centrales. Aunque en un extremo, las líneas de cola 23 y 25 obtuvieron valores de 2 MPa. .

En Sajo sucede la misma tendencia en los valores de resistencia, pero con predominio en el rango 7 a 10 MPa, y en la lamela 13 con un valor cercano a 6 MPa. Respecto al sistema de clasificación, la madera de Sajo no mostró tendencias definitivas respecto al tipo de clasificación sobre la variable evaluada (Figura 4.3B).

Tabla 4.4 – ANOVA para el modelo de una sola variable y cuatro factores en la prueba de cizallamiento sobre la línea de cola de muestras retiradas de vigas de MLE después de fracturadas.

Fuente	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo corregido	3059,191	139	22,01	1,991	0,000
Intersección	13602,25	1	13602,25	1230,439	0,000
Especie	284,89	1	284,89	25,771	0,000
Norma	2,70	1	2,70	0,244	0,622
Extremo	70,95	1	70,95	6,418	0,012
Posición	416,02	25	16,64	1,505	0,060
Especie * Norma	13,88	1	13,88	1,255	0,263
Especie * Extremo	1,25	1	1,25	0,113	0,737
Norma * Extremo	0,59	1	0,59	0,053	0,817
Especie * Norma * Extremo	0,00	0	.	.	.
Especie * Posición	167,31	11	15,21	1,376	0,183
Norma * Posición	436,16	25	17,45	1,578	0,041
Especie * Norma * Posición	121,58	11	11,05	1,000	0,446
Extremo * Posición	202,78	25	8,11	0,734	0,822
Especie * Extremo * Posición	144,76	11	13,16	1,190	0,293
Norma * Extremo * Posición	624,03	25	24,96	2,258	0,001
Especie * Norma * Extremo * Posición	0,00	0	.	.	.
Error	3493,32	316	11,05		
Total	23449,58	456			
Total corregida	6552,51	455			

R cuadrado = ,467 (R cuadrado corregida = ,232)

El promedio de la resistencia máxima en la Acacia fue de 5,45 y 4,85 MPa para la NSR-10 y CP, respectivamente. En el Sajo fueron 8,28 y 8,49 MPa para la NSR-10 y la CP.

Figura 4.3 - Valores de resistencia en la línea de cola para la madera de *Acacia mangium* Willd. (A) y *Campnosperma panamense* Standl. (B) La línea azul indica la clasificación por NSR-10 y la línea verde por Clasificación Propuesta-CP. Todos los valores en MPa.

La Figura 4.4 clarifica la incidencia del sistema de clasificación usado en la madera y su interacción con la posición de la lamela. Situación más evidente para *Acacia* que para *Sajo*, ya que la *Acacia* disponía de 26 líneas de cola por cada elemento laminado, versus las 12 líneas de cola con las que contaba el *Sajo*.

Figura 4.4 - Valores de resistencia en la línea de cola para la madera de *Acacia mangium* Willd. (Línea Azul) y *Campnosperma panamense* Standl. (Línea Verde). A la izquierda las piezas clasificadas por la NSR-10 (A) A la derecha la madera verificada con la Clasificación Propuesta (CP). Todos los valores en MPa (B).

Solo para tenerlo como referencia, la madera maciza de *Acacia* para la misma procedencia marcó un esfuerzo en cortante de 15,5 MPa y la de *Sajo* 8,08 MPa. O sea, que mientras para *Sajo* las líneas de colas mejoraron en un 5% la resistencia encontrada en la madera, para *Acacia*, el mismo valor se redujo a una tercera parte. Tal situación tiene implicaciones más adelante, cuando se calculen las propiedades resistentes del laminado.

Resultados de los ensayos de flexión para uniones *Finger Joint*

El reporte de este ensayo debería hacerse únicamente con material del más alto grado de calidad de la madera (lamelas externas-Ex), pero dada la configuración del ensayo y para hacer los resultados comparables, el autor decidió involucrar las demás calidades de madera pertenecientes las dos normativas (NSR-10 y CP) y las dos especies (*C. panamense* y *A. mangium*). La Tabla 4.5 da a conocer los valores obtenidos. En principio los datos no muestran tendencias definidas para ninguno de los tres factores en las variables seleccionadas. La densidad seca al aire y el módulo de elasticidad están dentro de lo esperado, sin embargo, el esfuerzo en flexión muestra valores atípicos más bajos para la especie *A. mangium* cuando se compara con *C. panamense*.

Llevando los datos del ensayo de flexión para las uniones *finger joint* al análisis de varianza, las variables solo mostraron diferencias significativas en el caso de las especies ($\alpha < 0,05$). Las normativas de clasificación para la elaboración, como las calidades propias de cada posición no dan cuenta de diferenciación en los resultados obtenidos ($\alpha \geq 0.05$), lo cual ratifica la homogeneidad del desempeño de las uniones para las dos normativas, las tres calidades evaluadas y cualquier combinación de estas fuentes de variación. Ver a continuación la Tabla 4.6.

Tabla 4.5 – Valores de densidad seca al aire, módulo de elasticidad y esfuerzo de flexión para las uniones *finger joint* en las maderas *C. panamense* y *A. mangium* extraídas de la MLE.

Variable	Especie	Norma	Posición	N	Promedio	Error	Intervalo de confianza al 95%.		Promedio	Promedio
					Posición	típico	Límite inferior	Límite superior	Norma	Especie
Densidad Seca al Aire (Kg.m-3)	Camposperma panamense	NSR-10	Ex	6	448,3	19,5	409,2	487,3	430,2	428,4
			In	6	401,7	19,5	362,6	440,7		
			Ce	6	440,6	19,5	401,5	479,6		
		Clasificación Propuesta	Ex	6	416,7	19,5	377,7	455,7	426,6	
			In	6	423,9	19,5	384,9	463,0		
			Ce	6	439,2	19,5	400,2	478,3		
	Acacia mangium	NSR-10	Ex	6	604,1	19,5	565,1	643,2	623,4	622,9
			In	6	633,6	19,5	594,5	672,6		
			Ce	6	632,4	19,5	593,4	671,5		
		Clasificación Propuesta	Ex	6	600,8	19,5	561,7	639,8	622,5	
			In	6	643,4	19,5	604,4	682,5		
			Ce	6	623,4	19,5	584,3	662,4		
Ef (MPa)	Camposperma panamense	NSR-10	Ex	6	7101	760	5581,2	8621,2	7619,1	7581,2
			In	6	8117	760	6597,0	9637,0		
			Ce	6	7639	760	6119,2	9159,2		
		Clasificación Propuesta	Ex	6	8214	760	6694,4	9734,5	7543,3	
			In	6	6812	760	5292,5	8332,5		
			Ce	6	7603	760	6083,1	9123,1		
	Acacia mangium	NSR-10	Ex	6	10260	760	8740,3	11780,3	9454,6	9286,3
			In	6	8484	760	6963,8	10003,8		
			Ce	6	9620	760	8099,6	11139,6		
		Clasificación Propuesta	Ex	6	8832	760	7312,1	10352,1	9118,0	
			In	6	9309	760	7788,6	10828,7		
			Ce	6	9213	760	7693,3	10733,3		
fm (MPa)	Camposperma panamense	NSR-10	Ex	6	32,4	4,2	24,1	40,8	34,8	34,0
			In	6	38,9	4,2	30,5	47,3		
			Ce	6	33,2	4,2	24,8	41,6		
		Clasificación Propuesta	Ex	6	35,2	4,2	26,9	43,6	33,1	
			In	6	33,1	4,2	24,7	41,5		
			Ce	6	31,1	4,2	22,7	39,4		
	Acacia mangium	NSR-10	Ex	6	28,8	4,2	20,4	37,2	28,9	25,9
			In	6	27,3	4,2	18,9	35,7		
			Ce	6	30,7	4,2	22,3	39,1		
		Clasificación Propuesta	Ex	6	24,6	4,2	16,3	33,0	22,9	
			In	6	23,7	4,2	15,3	32,1		
			Ce	6	20,2	4,2	11,8	28,6		

Fuente: El autor (2018)

Tabla 4.6 – MANOVA del modelo con los efectos univariados y multivariados usando los factores especies, normativa y posición en las variables densidad seca al aire, módulo de elasticidad y esfuerzo en flexión para las uniones *finger joint* de la MLE.

Fuente	Variable dependiente	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo corregido	DSA	7,0,E+05	11	6,36,E+04	27,82	0,000
	Ef	7,3,E+09	11	6,63,E+08	1,91	0,055
	fm	1,8,E+05	11	1,67,E+04	1,59	0,126
Intersección	DSA	2,0,E+07	1	1,99,E+07	8705,63	0,000
	Ef	5,1,E+11	1	5,12,E+11	1478,15	0,000
	fm	6,5,E+06	1	6,46,E+06	612,48	0,000
Especie	DSA	6,8,E+05	1	6,81,E+05	298,15	0,000
	Ef	5,2,E+09	1	5,23,E+09	15,10	0,000
	fm	1,2,E+05	1	1,18,E+05	11,19	0,001
Norma	DSA	8,7,E+01	1	8,71,E+01	0,04	0,846
	Ef	7,7,E+07	1	7,65,E+07	0,22	0,640
	fm	2,7,E+04	1	2,72,E+04	2,58	0,113
Posición	DSA	3,2,E+03	2	1,62,E+03	0,71	0,496
	Ef	2,4,E+08	2	1,20,E+08	0,35	0,709
	fm	5,0,E+03	2	2,50,E+03	0,24	0,789
Especie * Norma	DSA	3,3,E+01	1	3,25,E+01	0,01	0,905
	Ef	3,1,E+07	1	3,06,E+07	0,09	0,767
	fm	8,7,E+03	1	8,70,E+03	0,83	0,367
Especie * Posición	DSA	9,7,E+03	2	4,85,E+03	2,12	0,129
	Ef	7,0,E+07	2	3,50,E+07	0,10	0,904
	fm	5,3,E+03	2	2,65,E+03	0,25	0,778
Norma * Posición	DSA	3,5,E+03	2	1,73,E+03	0,76	0,474
	Ef	2,2,E+06	2	1,12,E+06	0,00	0,997
	fm	1,0,E+04	2	5,04,E+03	0,48	0,622
Especie * Norma * Posición	DSA	1,5,E+03	2	7,38,E+02	0,32	0,725
	Ef	1,6,E+09	2	8,19,E+08	2,37	0,103
	fm	9,8,E+03	2	4,91,E+03	0,47	0,630
Error	DSA	1,4,E+05	60	2,29,E+03		
	Ef	2,1,E+10	60	3,46,E+08		
	fm	6,3,E+05	60	1,05,E+04		
Total	DSA	2,1,E+07	72			
	Ef	5,4,E+11	72			
	fm	7,3,E+06	72			
Total corregida	DSA	8,4,E+05	71			
	Ef	2,8,E+10	71			
	fm	8,2,E+05	71			

Fuente: El autor (2018)

La explicación para los resultados anteriores debe buscarse primero en la calidad del encolado entre lamelas, ya visualizado con los resultados de la prueba de cizallamiento (Tabla 4.4). Luego, en la disposición correcta de las lamelas, ya que no hubo coherencia entre la denominación del grado y los valores obtenidos en esta prueba de flexión estática en cuatro puntos. Y, por supuesto, en las uniones del *finger joint*, tanto en su cantidad, localización y calidad del encolado del dentado, que se dan a conocer a continuación en la Tabla 4.7.

. Los valores de Acacia estuvieron por debajo frente a la madera maciza 30% menos en el módulo de elasticidad y 70-80% menos en la resistencia en el límite proporcional. En Sajo los valores de la madera maciza son muy similares a los aquí encontrados.

Según el MANOVA de la Tabla 4.6, excepto la variable especies, ninguno de los factores tuvo incidencia en esta prueba, de igual manera las interacciones no reportaron diferenciación.

Resultados del esfuerzo en tensión paralela para evaluar las uniones *Finger Joint*

Los valores de resistencia de las uniones FJ son levemente mayores en la madera de *A. mangium* versus la madera de *C. panamense*. Para el caso de la elasticidad, las diferencias se acrecientan en favor de la Acacia. Con relación a los valores por cada normativa, el módulo de elasticidad siempre es mayor en la madera clasificada por la NSR-10, no así en el esfuerzo a tracción donde se presentaron resultados contrastantes. Donde también se destacaron resultados contrastantes para las dos variables, fue en la posición de las uniones, donde no hay una tendencia en los resultados. La Tabla 4.7, permite divisar en detalle los valores obtenidos de la prueba.

Tabla 4.7 – Valores del módulo de elasticidad y esfuerzo de flexión para las uniones *finger joint* en las maderas *C. panamense* y *A. mangium* extraídas de la MLE y sometidas al esfuerzo de tensión paralela.

Variable	Especie	Norma	Posición	N	Promedio Posición	Error típico	Intervalo de confianza al 95%.		Promedio	Promedio
							Límite inferior	Límite superior	Norma	Especie
Et_paralela (MPa)	Camgnosperma panamense	NSR-10	Ex	6	9389	1476	6436	12342	11620	10689
			In	6	13811	1476	10858	16765		
			Ce	6	11660	1476	8707	14613		
		Clasificación Propuesta	Ex	6	9697	1476	6744	12650	9757	
			In	6	11764	1476	8811	14718		
			Ce	6	7810	1476	4857	10764		
	Acacia mangium	NSR-10	Ex	4	15890	1808	12273	19507	17342	15954
			In	4	16641	1808	13024	20258		
			Ce	4	19496	1808	15879	23113		
		Clasificación Propuesta	Ex	8	14557	1279	11999	17114	15260	
			In	8	14938	1279	12381	17496		
			Ce	8	16285	1279	13727	18842		
ft_paralela (MPa)	Camgnosperma panamense	NSR-10	Ex	6	15,9	2,7	10,5	21,3	15,9	16,9
			In	6	19,2	2,7	13,8	24,6		
			Ce	6	12,5	2,7	7,1	18,0		
		Clasificación Propuesta	Ex	6	21,5	2,7	16,1	27,0	18,0	
			In	6	20,1	2,7	14,7	25,5		
			Ce	6	12,2	2,7	6,8	17,7		
	Acacia mangium	NSR-10	Ex	4	19,9	3,3	13,2	26,5	20,4	17,5
			In	4	17,9	3,3	11,2	24,5		
			Ce	4	23,6	3,3	17,0	30,3		
		Clasificación Propuesta	Ex	8	17,2	2,4	12,5	21,9	16,0	
			In	8	14,7	2,4	10,0	19,4		
			Ce	8	16,0	2,4	11,3	20,8		

Fuente: El autor (2018)

Los resultados estadísticos, producto de la comparación del módulo de elasticidad y esfuerzo a tensión para los factores especie, normativa y posicionamiento en un análisis multivariado, dejan entrever la baja contundencia de los tres factores cuando se tratan individualmente, pues solo la variable módulo de elasticidad mostró diferencias significativas ($q < 0.05$), en los factores especie y norma. No obstante, este resultado queda atrás cuando se evalúan las interacciones especie versus norma, donde se encontraron diferencias significativas para el esfuerzo en tensión (Ft_ paralela), mas no para el módulo de elasticidad (Et_ paralela); mientras que en la interacción especie versus posición, las diferencias encontradas no se extienden al módulo de elasticidad y si al esfuerzo en tensión. Por último, la interacción norma versus posición no indujo diferencias significativas para las variables estudiadas, al igual que con la interacción triple: especie, norma, posición (ver tabla 4.8).

Tabla 4.8 – MANOVA del modelo con los efectos univariados y multivariados usando los factores especies, normativa y posición en las variables módulo de elasticidad y esfuerzo en tensión de las uniones *finger joint* para la MLE.

Fuente	Variable dependiente	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo corregido	Et_paralela	7,1,E+10	11	6,48,E+09	4,95	0,000
	Ft_paralela	7,3,E+04	11	6,65,E+03	1,50	0,155
Intersección	Et_paralela	1,2,E+12	1	1,23,E+12	943,62	0,000
	Ft_paralela	2,1,E+06	1	2,09,E+06	471,41	0,000
Especie	Et_paralela	5,3,E+10	1	5,34,E+10	40,80	0,000
	Ft_paralela	2,8,E+03	1	2,80,E+03	0,63	0,429
Norma	Et_paralela	6,6,E+09	1	6,59,E+09	5,04	0,028
	Ft_paralela	2,4,E+03	1	2,44,E+03	0,55	0,461
Posición	Et_paralela	4,4,E+09	2	2,22,E+09	1,70	0,192
	Ft_paralela	7,6,E+03	2	3,82,E+03	0,86	0,428
Especie * Norma	Et_paralela	2,0,E+07	1	2,04,E+07	0,02	0,901
	Ft_paralela	1,8,E+04	1	1,82,E+04	4,11	0,047
Especie * Posición	Et_paralela	7,5,E+09	2	3,75,E+09	2,87	0,065
	Ft_paralela	3,5,E+04	2	1,75,E+04	3,95	0,025
Norma * Posición	Et_paralela	2,6,E+09	2	1,29,E+09	0,99	0,379
	Ft_paralela	8,2,E+03	2	4,11,E+03	0,93	0,401
Especie * Norma * Posición	Et_paralela	4,3,E+08	2	2,17,E+08	0,17	0,848
	Ft_paralela	1,4,E+03	2	6,82,E+02	0,15	0,858
Error	Et_paralela	7,8,E+10	60	1,31,E+09		
	Ft_paralela	2,7,E+05	60	4,43,E+03		
Total	Et_paralela	1,4,E+12	72			
	Ft_paralela	2,5,E+06	72			
Total corregida	Et_paralela	1,5,E+11	71			
	Ft_paralela	3,4,E+05	71			

Fuente: El autor (2018)

Los valores de contraste para esta prueba se relacionan con la prueba de tensión paralela de la madera laminada encolada (MLE). En el capítulo correspondiente, se puede verificar que los valores son muy similares a los de las dos especies de este ensayo, en especial la resistencia. En cuanto el módulo de elasticidad, solo la Acacia presenta valores más bajos que en este caso.

5. REPORTE DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA DE *Campnosperma panamense* Standl. Y *Acacia mangium* Willd. PROCEDENTES DE COLOMBIA

Resumen

El punto de partida para la utilización de un material en el área de ingeniería es su caracterización. La madera proviene de organismos biológicos y por tanto su formación está afectada por variables asociadas al medio ambiente, la genética y la interacción genética- ambiente, medida a través de la intensidad de los procesos fisiológicos. En Colombia dos especies vienen cobrando importancia para el abastecimiento de materias primas, el *Campnosperma panamense* Standl. y la *Acacia mangium* Willd. La primera proviene de bosques naturales y la segunda de plantaciones. Este documento sintetiza las propiedades físicas y mecánicas de las dos especies y para el caso de la *A. mangium*, en dos procedencias con material contrastante. Las propiedades físicas se determinaron siguiendo las normativas ASTM D2395 y D4442, y las mecánicas siguiendo la norma ASTM D 143. En general el estudio encontró una disminución de los valores de las propiedades mecánicas de la madera de *C. panamense* cuando fue comparada con el reporte realizado casi cuatro décadas atrás, para el caso del módulo de elasticidad los valores fueron 12,7 y $7,33 \pm 1,69$ GPa, respectivamente. Esto como posible consecuencia del cambio climático, la afectación de las actividades de cosecha en los árboles remanentes, la mayor entrada de luz por la apertura del dosel, la eliminación de la competencia al extraer los árboles dominantes y/o la disminución del tiempo entre los ciclos de intervención para las mismas áreas, elementos todos, que han sido abordados en la literatura citada. De otra parte, el estudio encontró diferencias significativas ($q \leq 0.05$) entre los valores de densidad ($0,694 \pm 0,075$ y $0,565 \pm 0,087$ g.cm⁻³) y módulo de elasticidad ($15,9 \pm 3,72$ y $13,3 \pm 3,83$ GPa) para las dos procedencias de *A. mangium* extraídas en el Noroccidente y Oriente colombiano, respectivamente. Las variables de resistencia en el límite proporcional ($80,5 \pm 27,7$ y $76,0 \pm 26,3$ MPa) y módulo de resistencia ($123,9 \pm 32,8$ y $111,4 \pm 39,9$ MPa) no exhibieron tales diferencias. Finalmente, se da a conocer una consecuencia de la aplicación del procedimiento señalado por la ASTM D 2555, en la que se recomienda no sobrepasar algunos valores de variación para las diferentes propiedades básicas en maderas libres de defectos. Al aplicarlos en el presente estudio, se redujo el tamaño de la muestra entre un 25 y 40%, a la vez que aumentaron los valores promedio de algunas variables seleccionadas de la prueba de flexión estática entre 4 y 10%. Los cambios más notables al realizar el procedimiento normativo señalado se dieron en los valores medios característicos, los cuales aumentaron entre 25 y 100% en el tamaño de la muestra filtrada (n), respecto aquellos valores más bajos presentes en la población total de datos (N).

Palabras clave: Ecosistema de Guandal; Plantaciones; Normas de Madera ASTM; Edad de la madera; Procedencia de la madera

5.1. Introducción

La caracterización del material lignocelulósico proveniente de árboles tropicales puede constituir una herramienta fundamental para la toma de decisiones que contribuya a una mejor utilización de las especies, en especial para el sector de la construcción y consecuentemente al manejo forestal sostenible (KOPAČ; ŠALI, 2003; MADSEN, 1992; RETHINK WOOD, 2017). A finales de 1970 tuvo lugar el proyecto de la Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC), que evaluó mecánicamente 104 especies usando vigas de $300 \times 14 \times 4 \text{ cm}^3$ de longitud, este estudio involucró a todos los países del área andina (JUNAC, 1981), y su objetivo fue precisamente caracterizar las maderas tropicales más abundantes del bosque natural con el único fin de dotar de instrumentos para aprovecharlas y comercializarlas de manera prudente, e incorporar las selvas hasta ese momento prístinas o poco intervenidas, a las economías nacionales (KEENAN, F.J.; TEJADA, 1984). Con este derrotero, al menos 20 especies de alta importancia, procedentes Colombia, fueron descritas en sus propiedades físicas y mecánicas. En este paquete se encontraba el Sajo (*Camptosperma panamense* Standl.), la cual abundaba en el occidente del país, en una región conocida como el Chocó biogeográfico, donde crece en ecosistemas inundables conocidos como Guandales y más concretamente en los Sajales (DEL VALLE, 1999, 2000). Se estima que Colombia posee alrededor de 25.000 km^2 con la presencia de esta especie, formando rodales casi puros (DEL VALLE, 1996). Infelizmente, la madera de esta especie fue descartada en el trabajo de la JUNAC para aplicaciones estructurales, dado que su densidad básica era inferior a 400 kg.m^{-3} (370 kg.m^{-3}) y hasta ese momento, la alta abundancia de especies de alta densidad (mayores a 650 kg.m^{-3}), camufló los beneficios mecánicos de especies como el Sajo (COLORADO, 2004). Esta decisión condenó a la especie, incluso hasta el presente, a usos de bajo valor agregado como mangos de escoba, tendidos de cama, muebles de baja especificación y solo se le atribuyó importancia en la industria del *plywood*, donde fue altamente demandada en todo el escenario nacional por más de 20 años, dado su fuste boyante, cilíndrico y ausente de ramas gruesas (SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE, 2010). Desde el trabajo de la JUNAC a finales de la década del 70, no se ha reportado en la literatura científica una caracterización mecánica de la madera de Sajo, por lo que hoy, casi 40 años después, se hace el segundo reporte para la especie de la que según cuentas de entidades nacionales, se consumen más de $300 \text{ mil m}^3.\text{año}^{-1}$ en pío (VAN EYNDE; BLOMLEY, 2015). No obstante, se debe mencionar una excepción donde esta madera

ha despertado el interés para la industria química, pues sus hojas al parecer tienen potencial de utilización para el tratamiento de enfermedades propias del trópico como la leishmaniasis (WENIGER et al., 2001, 2004, 2006).

De otra parte, la madera de *Acacia mangium* Willd. Se ha incorporado en las plantaciones del país desde hace un poco más de 20 años, dado su relativo rápido crecimiento. Pues las primeras experiencias dan cuenta de ciclos de corta inferiores a los 12 años (AWANG; TAYLOR, 1993; BEADLE et al., 2007; DUPONNOIS; Bâ, 1999; KIM et al., 2008; RAO et al., 2012), lo cual impacta de manera positiva los flujos financieros de los inversionistas, y según cálculos del autor, esta especie alcanza un valor presente neto entre tres y cinco veces más alto, si se le compara con maderas de pino, o la misma teca, con destinación al aserrío. En primera instancia, la especie fue usada para la recuperación de suelos previamente utilizados en la minería del oro, donde se alteraba completamente la estructura del suelo, facilitando el rápido desarrollo radicular y generación de biomasa. Aunque los crecimientos medios anuales en el noroccidente del país son alentadores por estar en el rango de rentabilidad (15 a 25 m³. ha⁻¹. año⁻¹) (REFORESTADORA CACERÍ, [s.d.]), aún se deben depositar valiosos esfuerzos para mejorar la forma de las trozas, reducir las tensiones del crecimiento y demás anomalías propias de la silvicultura, que afectan el porcentaje de aprovechamiento de la madera en los escenarios de transformación mecánica (CHOWDHURY; SHAMS; ALAM, 2005; GRIFFIN et al., 2015; JUSOH; ZAHARIN; ADAM, 2014; KIM et al., 2008; RAFEADAH; RAHIM, 2007; SIERRA, 2010; VALE; BRASIL; MARTINS, 1999). El panorama es más complicado cuando se evalúa el desarrollo de la especie en los Llanos Orientales de Colombia, donde los rendimientos de la especie están en el rango 5 a 15 m³. ha⁻¹. año⁻¹, los troncos son delgados (7 a 15 cm a la altura del pecho) y la tortuosidad es evidente. Pero a pesar de todo, la especie representa una alternativa para incorporar los terrenos de la altillanura colombiana a la economía y generar un polo industrial alrededor de la madera.

Este estudio tuvo como objetivo definir las propiedades mecánicas y físicas básicas de la madera de *Camposperma panamense* Standl. y *Acacia mangium* Willd., en este último caso involucrando algunas procedencias regionales determinadas.

5.2. Información Secundaria de las Propiedades Físico-Mecánicas de las Especies Utilizadas

Para el caso de la madera maciza de *C. panamense*, se tiene un único reporte de las propiedades físicas y mecánicas que ha sido reproducido por casi cuatro décadas en el escenario nacional e internacional (ARÉVALO; LONDOÑO, 2005; JUNAC, 1981; KEENAN, F.J.; TEJADA, 1984; LÓPEZ; POLANCO; BERMÚDEZ, 2013; POLANCO-TAPIA; GARCIA; ARÉVALO-FUENTES, 2016) y que se resume en la Tabla 5.1. Se presume que los datos obedecen a valores medios. Entre los criterios que cita la fuente para la selección de esta especie están: Existencia de grandes volúmenes, posibilidades de manejo en reforestación o grandes masas de bosque natural, buen tamaño y porte, existencia de algún conocimiento de sus propiedades, posibilidades de aplicación en la construcción y que, a pesar de su bajo valor comercial, es objeto de transacción en el mercado.

Tabla 5.1 – Reporte de las propiedades físicas y mecánicas de la especie *Campnosperma panamense* Stand.

CHV	CHSA	DV	DSA	DA	DB	CRN	CTN	CVN	CRT	CTT	CVT	T/R
162	14	0.99	0.47	0.44	0.37	3.0	5.4	8.2	5.6	8.8	13.9	1.6
Flexión		Compresión		Cizallamiento		Dureza		Tenacidad		Condición		
ELP	MoR	MoE	ERparal.	ELPperp.	ERrd	ERTg	Lat.	Extr.	Rd	Tg		
32,3	57,9	11,5	24,4	3,4	5,8	5,7	18,6	21,7	0,167	0,146	Verde	
68,5	97,5	12,7	50,3	6,9	6,7	8,3	27,4	42,2	0,24	0,199	Seco 12%	

Fuente: (JUNAC, 1981; KEENAN, F.J.; TEJADA, 1984)

La *A. mangium*, posee diferentes reportes referentes a las propiedades mecánicas de la madera maciza. En la Tabla 5.2 se relacionan, a criterio del autor, los más representativos con la respectiva fuente de información. Aunque existen otros reportes del países asiáticos con datos similares, se citan solo para consulta del lector, dado el desconocimiento en la mayoría de condiciones relacionadas con la genética, silvicultura y desarrollo (LIM; GAN; TAN, 2011).

Tabla 5.2 – Reporte de las propiedades físicas y mecánicas de la especie *Acacia mangium* Willd.

CH V	CHS A	DV	DSA	DA	DB	CRN	CT N	CV N	CR T	CT T	CV T	T/R
160 ¹	16	0.87 ¹	0.66	0.57	0.53	0.83 ¹	2.23 ¹	10.6 ¹	2.72 ¹	5.32 ₁	10.1	1.7 5
Flexión		Compresión			Cizallamiento		Dureza		Tenacidad		Condición	
ELP	MoR	Mo E	ERparal .	ELPperp .	ERrd	ERTg	Lat.	Extr.	Rd	Tg		
78,8	116	11,8	51,2	17,2	11,0	11,2	58,0 ²	--	--	--	Seco 12%	

Fuente: Datos tomados para la localidad donde el presente estudio hizo parte del muestreo del material (SIERRA, 2010). ¹Para madera creciendo en México de 9 años (MUÑOZ-ACOSTA; MORENO-PEREZ, 2013). ²Para madera de 13 años del noroccidente de Colombia (REFORESTADORA CACERÍ, [s.d.]).

Clave para las Tablas 5.1, 5.2, 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7.

HV: Contenido de humedad verde (%), CHSA: Contenido de humedad seco al aire (%), DV: Densidad verde (g.cm⁻³), DSA: Densidad seca al aire (g.cm⁻³), DA: Densidad anhidra (g.cm⁻³), DB: Densidad básica (g.cm⁻³), CRN: Contracción radial normal (%), CTN: Contracción tangencial normal (%), CVN: Contracción volumétrica normal (%), CRT: Contracción radial total (%), CTT: Contracción tangencial total (%), CVT: Contracción volumétrica total (%), T/R: Relación contracción tangencial/contracción radial. ELP: Esfuerzo en el límite proporcional (MPa), MoR: Módulo de resistencia (MPa), MoE: Módulo de elasticidad (GPa), ERparal.: Esfuerzo de resistencia paralelo (MPa), ELPperp.: Esfuerzo en el límite perpendicular (MPa), ERrd: Esfuerzo en el plano radial (MPa), ERTg: Esfuerzo en el plano tangencial (MPa), Lat: Dureza lateral (MPa), Extr: Dureza extremos (MPa), Rd: Radial (MPa), Tg: Tangencial (MPa).

Como ya se mencionó, la madera de *A. mangium* procedente de los Llanos orientales de Colombia aún no dispone de algún reporte que haga referencia a sus propiedades físicas y mecánicas.

5.3. Materiales y Métodos

5.3.1. Obtención del material

La madera de *C. panamense* fue adquirida en la ciudad de Bogotá, D.C., en un aserrío que la emplea para la elaboración de tablas burdas con destino a la construcción. Según el SUN (Salvoconducto Único de Movilización Nacional) que ampara su legalidad, la madera provino de la ciudad de Buenaventura, principal puerto de acopio nacional de esta especie, donde a su vez llega desde todo el litoral Pacífico colombiano, departamento de Nariño en el sur, hasta el departamento de Chocó en el norte. La madera fue comprada en bloques de 300 x 30 x 10 cm³,

aproximadamente, con altos contenidos de humedad, excesivas afectaciones biológicas y agrietamientos, lo cual corresponde a la presentación típica de la especie. Ver Figura 5.1.

Figura 5.1 - Vista general en Buenaventura, Valle del Cauca, Colombia (A) y detallada en la ciudad de Bogotá, D.C. (B) de la madera adquirida de *Campnosperma panamense* para la realización de los ensayos.
Fuente: (A) Claudia Parada y (B) David Urrego

La *A. mangium* fue obtenida en dos procedencias bien contrastantes, el departamento de Córdoba en el noroccidente colombiano y en la región de los Llanos Orientales. En sendos casos, la madera se obtuvo aleatoriamente, siendo posterior al proceso de secado en cámara para el noroccidente y a partir de árboles en pie, en el oriente, ver

Figura 5.2. Se hace esta referencia debido a las notorias diferencias en cuanto al crecimiento y porte de los árboles en las dos locaciones.

Figura 5.2 - Piezas y árboles de *Acacia mangium* obtenidos de la región Noroccidental de Colombia (A) y de los Llanos Orientales (B). Fuente: (A) Autor y (B) Camilo Barrero

5.3.2. Preparación del material y acondicionamiento de las muestras

En el caso de la madera de *C. panamensis* (Cp) y *A. mangium* procedencia noroccidente (Am-NO), fueron extraídas de piezas descartadas en la fabricación de vigas laminadas encoladas, por lo que las piezas habían sido sometidas previamente a procesos de aserrío, secado en cámara, clasificación y remanufactura (Figura 5.3). Para las dimensiones de las muestras se tomaron como referencia, las indicadas en la ASTM D 143 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2010). El proceso de dimensionamiento fue eficiente, en la medida que el material al estar en equilibrio de humedad con el medio, después de su obtención no estuvo sometido a fuertes fluctuaciones en sus dimensiones por variaciones en la humedad del ambiente.

Figura 5.3 - Vista general de la madera laminada encolada (MLE) de *Campnosperma panamensis* (A) y *Acacia mangium* del Noroccidente del país (B). En sendos casos la porción cuadrículada tiene 250 cm.

En el caso de la madera de *A. mangium* del oriente (Am-O), se obtuvieron las trozas directamente de las plantaciones, con la correspondiente marcación, indicando finca, bloque de plantación, clase diamétrica y número de árbol (Figura 5.4). Cada unidad se georreferenció con el fin de hacer correlaciones con los tratamientos silviculturales, calidad de la madera y crecimiento, información que será publicada en un trabajo posterior. En el mismo mes del apeo, las trozas se enviaron a un aserrío en la ciudad de Bogotá, D.C., allí se cortaron en una sierra sinfín de banda en espesores de 30 mm, después fueron sometidas a un proceso de reaserrado para obtener probetas o cuerpos de prueba de 500 mm de longitud. El material fue apilado bajo techo durante cuatro semanas, para que perdieran humedad por debajo del punto de saturación de fibras. Posteriormente, la madera fue cepillada en sus dos superficies hasta alcanzar 25 mm de espesor y después cortada en anchos de 25 - 27 mm para asegurar un mejor

aprovechamiento del material. Finalmente, las piezas fueron dimensionadas en las longitudes requeridas, por ejemplo, a 410 mm en el caso de la prueba de flexión estática, conforme lo estipula la norma. Para el caso de las trozas que se destinaron a la obtención de probetas para las pruebas de compresión perpendicular y cizallamiento, se dimensionaron en el aserrío a espesores de 65 mm y su tiempo de acondicionamiento fue de casi dos meses, hasta alcanzar contenidos de humedad por debajo del punto de saturación de fibras.

Figura 5.4 - Obtención de la madera de *Acacia mangium* proveniente de los Llanos Orientales: (A) Árboles en pie, (B) Aserrío de la madera en Bogotá, D.C., (C) Acondicionamiento de las probetas en la carpintería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

La cantidad de probetas obtenidas por especie, procedencia y cada ensayo se visualiza en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 – Número de probetas obtenidas para la obtención de las diferentes propiedades físicas y mecánicas

Especie- Procedencia (Dimensiones)	Pruebas					
	Flexión Estática (410x25x 25mm ³)	Compresión Paralela (100x 25x 25mm ³)	Compresión Perpendicular (150x50x 50mm ³)	Cizallamiento (65x50x 50mm ³)	Dureza (150x50x 50mm ³)	Propiedades Físicas (100x 25x25mm ³)
<i>Campnosperma panamense</i>	62	74	30	62	64	31
<i>Acacia mangium</i> - Noroccidente	38	31		31		39
<i>Acacia mangium</i> – Oriente	153	76	53	79	53	78

5.3.3. Ejecución de los ensayos

Los ensayos fueron ejecutados siguiendo las normas ASTM D 143, D2395 y D4442 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2010, 2016, 2017), con el objetivo principal de revelar los resultados de las pruebas de flexión estática en tres puntos, compresiones paralela y perpendicular, cizallamiento, dureza, densidades, contracciones en diferentes dimensiones anisotrópicas y contenidos de humedad. En el caso de las maderas de Cp y Am-O, se realizaron las pruebas de compresión paralela, cizallamiento, dureza y compresión perpendicular, para actualizarlas después de 40 años, en el caso de Cp, y reportar por primera vez los datos en el caso de Am-O. Tanto las velocidades de aplicación de la carga como la aplicación de las formulaciones matemáticas se siguieron según los criterios de la norma. Después de ejecutada cada prueba, las piezas o parte de ellas fueron enviadas a una estufa al menos por 24 horas a una temperatura de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ con el ánimo de conocer su contenido de humedad al momento del ensayo. Si la humedad de las probetas era cercana al equilibrio del laboratorio (Humedad relativa $\approx 65\%$ y temperatura $\approx 20\text{-}25^{\circ}\text{C}$) no se reportaban descripciones, por el contrario, si las variaciones eran considerables, se reportaba la observación en la tabla de resultado correspondiente.

5.3.4. Descripción de los equipos

Una vez obtenido el material experimental se dio inicio a los ensayos mecánicos. Estos se condujeron en Bogotá, D.C para la especie Cp y Am-O, en el CIMOC de la Universidad de los Andes. Las probetas de la especie Am-NO fueron trasladadas hasta Piracicaba en SP, Brasil, donde fueron sometidas en el laboratorio LEMAD de la ESALQ-USP. Las máquinas universales usadas en cada caso se dan a conocer en la Figura 5.5. Solo las propiedades físicas de la Am-O, se determinaron en la Universidad de los Andes.

Figura 5.5 - Vista general de los equipos utilizados para la determinación de las propiedades mecánicas. Máquina Universal Cotenco con capacidad hasta 30 t en LEMAD ESALQ-USP (A). Máquina Universal Trittech con capacidad hasta 10 t en el CIMOC Universidad de los Andes (B) y Material Test System (MTS) con capacidad hasta 100 t en el CIMOC (C).

La máquina del CIMOC, Trittech, usó para las diferentes pruebas celdas de medición tipo Futek de 2, 5 y 10 t, las deformaciones se midieron con LVDT (Linear Variable Differential Transformer, por sus siglas en inglés) y la MTS, usó su sistema interno para la celda de carga y los desplazamientos. En el caso de la máquina universal Cotenco, se emplearon celdas de carga de 1,2 y 5 t y las deformaciones se midieron con dos sensores, el interno del equipo y con LVDT externa. En sendos casos, el recorrido de las LVDT fue de 100 mm.

5.4. Análisis de la información

La totalidad de la información fue procesada en Excel[®]. La información obtenida por especie, procedencia y prueba, fue sometida a estadística descriptiva (SOKAL; ROHLF, 1981). Se presentan los promedios para la totalidad de las probetas empleadas, así como la desviación estándar y el percentil al 5%. Solo para efectos de comparación en el uso de la normativa ASTM D2555 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2006a), los datos extremos fueron eliminados hasta obtener los coeficientes de variación máximos permitidos para el reporte de las propiedades en cada caso (LÓPEZ; POLANCO; BERMÚDEZ, 2013). Se evaluó la normalidad de los datos con la prueba de Shapiro-Wilk, para homocedasticidad la prueba

de Levene, independencia lineal con los *test* de Pearson y Spearman. Como se cumplieron los supuestos básicos, no se trabajó con pruebas no paramétricas y no se transformaron datos. Al final, se implementó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) con un nivel de significancia del 5% en la prueba de flexión estática para las dos procedencias de la madera de *A. mangium*, con el objeto de identificar la presencia o no, de diferencias significativas en las variables evaluadas, empleando el test de Tukey. Se usó el paquete estadístico SPSS 14.0 para Windows en el procesamiento de la información (NORUSIS, 2011).

5.5. Resultados

La Tabla 5.4, la Tabla 5.5 y la Tabla 5.6, dan a conocer los diferentes valores medios en la primera fila, junto con las desviaciones estándar, en la segunda y los percentiles al 5%, en la tercera, para las propiedades físicas y mecánicas determinadas por especie y procedencia.

Tabla 5.4 – Reporte de las propiedades físicas y mecánicas de la especie *Campnosperma panamense* Stand.

CHV	CHSA	DV	DSA	DA	DB	CRN	CTN	CVN	CRT	CTT	CVT	T/R
82,4	11,8	0,628	0,426	0,384	0,347	2,68	3,99	6,52	3,96	5,41	9,45	1,583
18,5	0,3	0,064	0,047	0,055	0,049	0,67	0,52	0,72	0,66	0,60	0,85	42,0
62,8	11,4	0,533	0,348	0,303	0,276	0,02	0,03	0,06	2,97	4,42	8,02	0,87
Flexión			Compresión			Cizallamiento		Dureza		Condición Seco 12%		
ELP	MoR	MoE	ELP paral.	MoR paral.	MoR perp.	ELP perp.	ERrd	ERTg	Lat.				Extr.
35,2	54,7	7,33	16,5	28,4	5,74	3,45	8,08	8,08	26,7	50,6	Promedio (X _{0,5})	
11,1	15,9	1,69	3,1	4,5	1,03	0,59	2,3	2,3	6,4	10,3	Desviación Percentil 5	
18,0	28,2	4,38	11,2	19,9	4,16	2,41	4,28	4,28	18,1	35,0	(X _{0,05})	

Tabla 5.5 – Reporte de las propiedades físicas y mecánicas de la especie *Acacia mangium* Willd. procedencia Noroccidente colombiano.

CHV	CHSA	DV	DSA	DA	DB	CRN	CTN	CVN	CRT	CTT	CVT	T/R
116,7			0,694	0,567	0,506				4,13	6,17	10,84	1,5
25,2			0,075	0,098	0,080				1,84	1,86	3,10	1,0
76			0,590	0,432	0,406				2,05	3,99	6,35	
Flexión			Compresión				Cizallamiento		Dureza		Condición	
ELP	MoR	MoE	ELP paral.	MoR paral.	ELP perp.	MoE perp.	ERrd	ERTg	Lat.	Extr.	Seco 9-12%	
80,5	123,9	15,9		62,5			15,5	15,5			Promedio ($X_{0,5}$)	
27,7	32,8	3,72		9,43			2,55	2,55			Desviación	
39,4	76,0	9,91		51,7			10,6	10,6			Percentil 5 ($X_{0,05}$)	

Tabla 5.6 – Reporte de las propiedades físicas y mecánicas de la especie *Acacia mangium* Willd. Procedencia Oriente colombiano.

CHV	CHSA ¹	DV	DSA ¹	DA	DB	CRT	CTT	CVT	T/R		
51,5	13,5	0,718	0,565	0,516	0,479	2,76	3,86	7,07	1,63	Promedio (X _{0,5})	
11,9	0,59	0,071	0,087	0,081	0,074	0,62	1,16	1,08	0,59	Desviación	
37,4	12,7	0,595	0,407	0,367	0,347	1,8	1,5	5,0		Percentil 5 (X _{0,05})	
Flexión ²			Compresión				Cizallamiento		Dureza		Condición Seco 6-12%
ELP	MoR	MoE	ELP paral.	MoR paral.	ELP perp.	MoE perp.	ERrd	ERTg	Tg.	Extr.	
76,0	111,4	13,3	28,3	36,4	9,38		6,46	6,46	62,6	56,6	Promedio (X _{0,5})
26,3	39,9	3,83	8,91	9,93	1,89		1,46	1,46	16,3	14,4	Desviación
34,8	46,2	6,51	12,6	20,5	6,86		4,57	4,57	38,9	36,5	Percentil 5 (X _{0,05})

¹Se presume que no ha llegado al punto de equilibrio

²Reporte al 5,4% de contenido de humedad y densidad de 0,540 g.cm⁻³

5.6. Análisis de Resultados

La gran diferencia, no evaluada estadísticamente, de las propiedades de la madera de *C. panamense* cuando se compara el reporte de finales de los 70's con el del presente estudio, da cuenta de una merma generalizada en las propiedades mecánicas de la especie. Este hecho ha sido reportado en otras especies de manera extendida por varios autores (GÜNTER et al., 2011), donde se hace referencia al efecto de las continuas intervenciones humanas en los bosques y la calidad de la madera (PRETZSCH et al., 2018). Por una parte, la caída de árboles

puede generar heridas en los árboles remanentes, con el consecuente aumento localizado de la densidad del anillo en formación (FORRESTER, 2013), el autor considera que si estos árboles permanecen en el tiempo y se posterga su cosecha, su madera presentará abundantes anomalías o defectos y la densidad del leño puede aumentar por encima de lo normal. Contrariamente, al abrir el dosel por la extracción de árboles dominantes, como es la práctica habitual en estos ecosistemas de Guandal, quedan mayores recursos como nutrientes, agua y sobre todo luz, que son aprovechados por los árboles residuales, quienes inician la formación de anillos de madera temprana, si los demás recursos clave para el crecimiento están presentes y disponibles (DE LARA et al., 2017), los anillos al tener células con paredes más delgadas y lúmenes mayores, son menos densos que los de madera tardía (BEETS; GILCHRIST; JEFFREYS, 2001; FERREIRA; TOMAZELLO FILHO, 2009; LEON; ESPINOZA, 2001; LOVE-MYERS et al., 2009; PERSSON et al., 1995). Este último hecho es más relevante en especies de carácter heliófilo, con maderas de baja a mediana densidad. Adicionalmente, las faenas de aprovechamiento de los bosques inundables del Pacífico colombiano, efectuados por las comunidades locales, han desembocado en intervenciones con lapsos de tiempo cada vez más cortos (ALMARIO GARCÍA, 2009; LEAL; RESTREPO, 2003), lo cual no solo ha tenido consecuencias en las características de la madera sino en una erosión genética conocida como digénesis (DEL VALLE, 1998). Ahora bien, no pueden desconocerse los efectos macro asociados al cambio climático, donde varios autores apoyan la teoría por la cual y de manera natural, un aumento global de la temperatura está generando una afectación en la densidad de la madera en diferentes partes del mundo y con diferentes especies (BOISVENUE; RUNNING, 2006; BOURIAUD et al., 2004, 2005; DIACONU; WASSENBERG; SPIECKER, 2016; FRANCESCHINI et al., 2010; FRANCESCHINI; BONTEMPS; LEBAN, 2012; PRETZSCH et al., 2018)

En el caso de la *Acacia mangium*, es evidente un mejor desempeño mecánico en los individuos del noroccidente del país si se le compara con las muestras obtenidas en la Orinoquia. Lo primero que se debe destacar es la diferencia en edad de las dos procedencias, mientras que los primeros árboles pueden tener 12 años o más, en el segundo caso, las plantaciones disponían entre tres y siete años al momento de la cosecha. Esto podría repercutir en la mayor presencia de madera juvenil en el segundo caso, la cual reflejaría menores valores en las características físico mecánicas más deseables para la mayoría de aplicaciones (DE

AVILA DELUCIS et al., 2013; GATTO et al., 2013; RAFEADAH; RAHIM, 2007; RAO et al., 2012; ROTH et al., 2007). La Am-NO, fue obtenida de una industria de transformación, que normalmente realiza filtros en los diferentes procesos de clasificación y selección desde el mismo apeo, mientras que la madera de Am-O, se obtuvo de la industrialización intensiva de trozas de pequeñas dimensiones, cuyo objetivo era asegurar el mayor rendimiento del tronco, lo que también pudo incidir en la inclusión de piezas con madera juvenil. De acuerdo a reportes de varios autores, las podas ayudan en la mejor forma del tronco y la maduración de la madera (KURINOBU et al., 2006; LACHENBRUCH, FREDERICK C. MEINZER; DAWSON, 2011) Adicionalmente la literatura reporta que la mayor resistencia en esta especie está asociada a una mayor densidad que se alcanza progresivamente con un mayor diámetro (MAKINO et al., 2012).

La normativa ASTM D 2555 menciona el procedimiento de reporte de las propiedades mecánicas y la densidad de la madera por dos métodos, en el caso del método B se recomienda no sobrepasar los límites establecidos para el coeficiente de variación de los datos para cada prueba. Si bien es cierto que tales valores no son estrictos, ameritarían altos niveles de muestreo para caracterizar de manera amplia la especie en cuestión. Para demostrar esta situación, el autor reportó los valores estadísticos obtenidos para la totalidad de las muestras. Advirtiendo información contrastante entre los datos obtenidos inextenso con mayores niveles de variación y los recomendados en la normativa, ver Tabla 5.7. Aquí se evidencia que los valores promedio por el procedimiento de la norma están un 4,5 a 9,5% por encima, frente a los datos del muestreo amplio. Esta misma tendencia la tienen los valores característicos con incrementos del orden 25,8 a 100,4%. Caso contrario ocurre con la desviación estándar la cual presenta una reducción de la variabilidad al caer entre 22,5 y 53,3%.

La pregunta que queda después de este razonamiento es: ¿cuál metodología usar a futuro para el reporte de las propiedades del material? Y aunque no parece existir una respuesta contundente e inmediata, lo que resulta claro es que al utilizar el método B de la norma ASTM D 2555, se incrementa el valor de las variables mecánicas de desempeño (ELP, MoR y MoE) y de manera más significativa en los valores característicos. Lo anterior es muy importante pues estos últimos, son los más empleados para el diseño estructural (YLINEN, 1956), en lo relacionado con la estabilidad y el pandeo lateral (KEENAN, F.J.; TEJADA, 1984).

Tabla 5.7 – Comparación de los valores obtenidos para la prueba de flexión estática en *Campnosperma panamense* y *Acacia mangium* de los Llanos Orientales usando la totalidad de las muestras y una porción según la recomendación de la ASTM D 2555

Prueba de Flexión Estática												
<i>C. panamense</i>						<i>A. mangium</i> (Llanos Orientales)						Especie
Todos los datos N=62			ASTM D 2555 n=46*			Todos los datos N=153			ASTM D 2555 n=92*			
ELP	MoR	MoE	ELP	MoR	MoE	ELP	MoR	MoE	ELP	MoR	MoE	Variable
35,2	54,7	7,33	38,0	59,9	7,79	76,0	110,9	13,3	81,4	118,6	13,9	Promedio ($X_{0,5}$)
11,1	15,9	1,69	8,5	9,3	1,31	26,3	40,7	3,83	15,6	19,0	2,56	Desviación estándar
18,0	28,2	4,38	24,5	43,6	5,51	34,8	45,4	6,51	54,3	91,0	9,72	Percentil 5 ($X_{0,05}$)
			-25,8						-39,9			Número Muestras
			8,0	9,5	6,3				7,1	6,9	4,5	Promedio ($X_{0,5}$)
Variación Porcentual (%)			-23,4	-41,5	-22,5				-40,7	-53,3	-33,2	Desviación estándar
			36,1	54,6	25,8				56,0	100,4	49,3	Percentil 5 ($X_{0,05}$)

*Se descartaron los datos más extremos hasta alcanzar los valores de desviación recomendados por la normativa

Por otra parte, y tomado el ejemplo de la Am-O, el valor característico del MoR pasa de 45,4 a 91,0 MPa, representando un incremento del 100,4%. Siendo esta propiedad tan importante, sería mejor reportar el menor valor alcanzado con la totalidad de datos (N=153), respecto al valor más alto reportado con 92 datos para un procedimiento de diseño. Ahora bien, esta situación desembocaría en una subestimación de la capacidad de la madera de la especie, lo que es contrario al objetivo general del autor, en el presente texto a pesar de trabajar con piezas libres de defectos. Entonces la alternativa parecería ser la inclusión de todo el material y la posterior clasificación por aspectos visuales y mecánicos (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2006b; ÍÑIGUEZ, 2007; JUNAC, 1984), que mejoren las perspectivas de utilización de absolutamente toda la madera extraída de los árboles, con criterios anatómicos, etarios, espaciales y silviculturales en la clasificación.

La comparación de los valores derivados de la prueba de flexión estática para las dos procedencias de *A. mangium* (Tabla 5.8), permite entrever diferencias significativas para los contenidos de humedad, la densidad seca al aire y el módulo de elasticidad, mas no para el módulo de resistencia y la resistencia en el límite proporcional. La respuesta a este fenómeno se encuentra en la dispersión de los datos y el alto valor de MoE reportado para la madera de Am-NO.

Tabla 5.8 – Análisis de varianza para las variables obtenidas de la flexión estática en la madera de *Acacia mangium* Willd. proveniente del noroccidente colombiano (Am-NO) y los Llanos Orientales (Am-O)

Variable		Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media cuadrática	F	Sig.
Contenido de Humedad	Inter-grupos	274,185	1	274,185	30,397	0,000
	Intra-grupos	1641,663	182	9,020		
	Total	1915,848	183			
Densidad Seca al Aire	Inter-grupos	616815,46	1	616815,46	104,176	0,000
	Intra-grupos	1077600,2	182	5920,880		
	Total	1694415,7	183			
Módulo de resistencia (MoR)	Inter-grupos	404026,54	1	404026,54	2,682	0,103
	Intra-grupos	27412554	182	150618,43		
	Total	27816581	183			
Esfuerzo en el Límite Proporcional (ELP)	Inter-grupos	52716,593	1	52716,593	0,751	0,387
	Intra-grupos	12776385	182	70199,918		
	Total	12829101	183			
Módulo de Elasticidad (MoE)	Inter-grupos	18226075558	1	18226075558	12,53	0,001
	Intra-grupos	26457349390	182	1453700515		
	Total	282799569463	183			

No es del interés del presente capítulo avanzar en sistemas de clasificación de la madera, su objetivo se limita al reporte de las propiedades evaluadas y comparación. Por ello, es importante que la madera sea clasificada cuanto antes según parámetros visuales y mecánicos, evitando el uso generalizado de los datos característicos reportados o promedios castigados fuertemente con los factores de seguridad. Para ello el autor propone el uso de metodologías como la descrita en la normativa chilena (INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 1979, 1990, 1991), con el concurso de representantes de la industria de transformación de las dos especies, miembros de la academia especializada, empresas de cálculo, análisis y diseño estructural, y representantes de los institutos de normalización.

5.7. Conclusiones

Después de casi cuatro décadas se hizo nuevamente el reporte de las propiedades básicas de la madera de *C. panamense* encontrando una merma general en los valores de estas. Tal efecto puede atribuirse al cambio climático global, a causas asociadas a la reducción del ciclo en las faenas de intervención de los bosques regionales y/o a la afectación sobre el medio que se genera durante el aprovechamiento. También, se reportaron por primera vez, datos asociados a las propiedades básicas de la madera de *A. mangium* proveniente de los Llanos Orientales de Colombia, encontrando que su edad temprana (< 10 años), en combinación con los tratamientos silviculturales aplicados, ha determinado menores valores en la mayoría de las propiedades mecánicas, si se le compara con la madera de la región noroccidental del país, donde la especie ha mostrado diámetros mayores y avances significativos en los temas de talante silvicultural, con una experiencia superior a 20 años y plantaciones cosechadas mínimo a los 12 años.

Referencias

- ALMARIO GARCÍA, O. De lo regional a lo local en el pacífico sur colombiano, 1780-1930. **HiSTOReLo. Revista de Historia Regional y Local**, v. 1, n. 1, p. 76–123, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2555-17a Standard Practice for Establishing Clear Wood Strength Values**American Society for Testing and MaterialsUSA, 2006a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D245 Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber**, American Society for Testing and MaterialsUSA, 2006b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D143 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber** American Society for Testing and Materials, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4442-16 Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials**, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2395-17 Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials**American Society for Testing and Materials, 2017.
- ARÉVALO, R.; LONDOÑO, A. **Manual para la Identificación de Maderas que se Comercializan en el Departamento del Tolima**. Ibagué, Colombia: CORTOLIMA, Universidad del Tolima, 2005.
- AWANG, K.; TAYLOR, D. **Acacia mangium: Growing and utilization**. MPTS monograph series No. 3 Organization. [s.l: s.n.].
- BEADLE, C. et al. Effect of pruning *Acacia mangium* on growth, form and heart rot. **Forest Ecology and Management**, v. 238, n. 1–3, p. 261–267, jan. 2007.
- BEETS, P. N.; GILCHRIST, K.; JEFFREYS, M. P. Wood density of radiata pine: effect of nitrogen supply. **Forest Ecology and Management**, v. 145, n. 3, p. 173–180, maio 2001.
- BOISVENUE, C.; RUNNING, S. W. **Impacts of climate change on natural forest productivity - Evidence since the middle of the 20th century**Global Change Biology, maio 2006. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2486.2006.01134.x>>. Acesso em: 24 set. 2018
- BOURIAUD, O. et al. Modelling variability of wood density in beech as affected by ring age, radial growth and climate. **Trees - Structure and Function**, v. 18, n. 3, p. 264–276, 3 maio 2004.
- BOURIAUD, O. et al. Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce. **Tree Physiology**, v. 25, n. 6, p. 651–660, 1 jun. 2005.
- CHOWDHURY, M. Q.; SHAMS, M. I.; ALAM, M. **Effects of age and height variation on physical properties of mangium (*Acacia mangium* Willd.) wood**Australian Forestry, 2005.

Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-23844533901&partnerID=tZOtx3y1>>

COLORADO, A. SAJO : El Valioso desconocido. **Revista M&M**, v. 44, p. 1–6, 2004.

DE AVILA DELUCIS, R. et al. Segregação e variação radial de propriedades físicas da madeira juvenil e adulta de cedro (*Cedrela fissilis* Vellozo). **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 41, n. 100, p. 549–556, 2013.

DE LARA, N. O. T. et al. Duration of cambial activity is determined by water availability while cambial stimulus is day-length dependent in a Neotropical evergreen species. **Environmental and Experimental Botany**, v. 141, n. April, p. 50–59, 2017.

DEL VALLE, J. I. Los bosques de guandal del delta del río Patía (Colombia) **Revista académica Colombiana de Ciencias**, 1996.

DEL VALLE, J. I. Impacto de la explotación maderera en los bosques de *Campnosperma panamensis*, Colombia. **Crónica Forestal y del Medio Ambiente**, v. 13, n. 1, 1998.

DEL VALLE, J. I. Mortalidad sobrevivencia y vida media del árbol tropical *Campnosperma panamensis*. **Crónica Forestal y del Medio Ambiente**, v. 14, n. 1, p. 5–16, 1999.

DEL VALLE, J. I. Consideraciones estructurales de los bosques de Guandal del Pacífico Sur colombiano. **Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín**, v. 53, n. 2, p. 1011–1042, 2000.

DIACONU, D.; WASSENBERG, M.; SPIECKER, H. Erratum to: **Variability of European beech wood density as influenced by interactions between tree-ring growth and aspect (Forest Ecosystems, (2016), 3, 1, (6), 10.1186/s40663-016-0065-8)** **Forest Ecosystems**, 27 dez. 2016. Disponível em: <<http://www.forestecosyst.com/content/3/1/6>>. Acesso em: 24 set. 2018

DUPONNOIS, R.; Bâ, A. M. Growth stimulation of *Acacia mangium* Willd by *Pisolithus* sp. in some Senegalese soils. **Forest Ecology and Management**, v. 119, n. 1–3, p. 209–215, jun. 1999.

FERREIRA, A. T. B.; TOMAZELLO FILHO, M. Caracterização dos anéis de crescimento de árvores de *Pinus caribaea* var . *hondurensis* Barr . et Golf . por densitometria de raios X. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, p. 287–298, 2009.

FORRESTER, D. I. Growth responses to thinning, pruning and fertiliser application in *Eucalyptus* plantations: A review of their production ecology and interactions. **Forest Ecology and Management**, v. 310, p. 336–347, 2013.

FRANCESCHINI, T. et al. Decreasing trend and fluctuations in the mean ring density of Norway spruce through the twentieth century. **Annals of Forest Science**, v. 67, n. 8, p. 816–816, jan. 2010.

FRANCESCHINI, T.; BONTEMPS, J.-D.; LEBAN, J.-M. Transient historical decrease in earlywood and latewood density and unstable sensitivity to summer temperature for Norway spruce in northeastern France. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 42, n. 2, p. 219–226, fev. 2012.

GATTO, D. A. et al. Proportion of juvenile wood of açoita-cavalo, pecan and London plane wood. **International Wood Products Journal**, v. 4, n. 1, p. 33–36, fev. 2013.

GRIFFIN, A. R. et al. Breeding polyploid varieties of tropical Acacias: progress and prospects. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 77, n. 1, p. 41–50, 14 jan. 2015.

GÜNTER, S. et al. **Tropical Forestry Silviculture in the Tropics**. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2011.

ÍÑIGUEZ, G. **Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural**. [s.l.] Universidad Politécnica de Madrid, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, I. NCh 178 OF79 **Madera aserrada de Pino Insigne- Clasificación por aspecto** Chile, 1979.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, I. NCh 1207 OF90 **Pino Radiata- Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad** Chile, 1990.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, I. NCh 2150.OF91. **Madera Laminada Encolada- Clasificación mecánica y visual de madera aserrada de pino radiata**. Chile, 1991.

JUNAC, J. DEL A. DE C. **Tablas de propiedades físicas y mecánicas de 24 especies de Colombia**. Lima, Perú: [s.n.].

JUNAC, J. DEL A. DE C. **Manual de clasificación visual para madera estructural**. Lima, Perú: [s.n.].

JUSOH, I.; ZAHARIN, F. A.; ADAM, N. S. **Wood quality of Acacia hybrid and second-generation Acacia mangium** BioResources, 2014. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84892530349&partnerID=tZOtx3y1>>

KEENAN, F.J.; TEJADA, M. **Tropical Timber for Building Materials in the Andean Group Countries of South America**. Ottawa, Canada: International Development Research Centre, 1984.

KIM, N. T. et al. Possibility of improvement in fundamental properties of wood of Acacia hybrids by artificial hybridization. **Journal of Wood Science**, v. 55, n. 1, p. 8–12, 11 nov. 2008.

KOPAČ, J.; ŠALI, S. Wood: an important material in manufacturing technology. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 133, n. 1–2, p. 134–142, fev. 2003.

KURINOBU, S. et al. Growth model for predicting stand development of Acacia mangium in South Sumatra, Indonesia, using the reciprocal equation of size-density effect. **Forest Ecology and Management**, v. 228, n. 1–3, p. 91–97, jun. 2006.

LACHENBRUCH, FREDERICK C. MEINZER, B.; DAWSON, T. E. **Size- and Age-Related Changes in Tree Structure and Function**. Dordrecht Heidelberg, London, New York: [s.n.].

LEAL, C.; RESTREPO, E. **Unos bosques sembrados de aserríos. Historia de la extracción maderera en el Pacífico colombiano**. Medellín, Colombia: Colciencias, Instituto Colombiano

de Antropología e Historia- ICANH, Facultad de Ciencias Humanas y Económicas Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Colección Clío., 2003.

LEON, W.; ESPINOZA, N. **Anatomía de la madera / Williams José León Hernández , Narcisana Espinoza de Pernía**. 1a Edición ed. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes, Consejo de Publicaciones, Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico, Venezuela, 2001.

LIM, S. C.; GAN, K. S.; TAN, Y. E. **Properties of Acacia Mangium planted in Peninsular Malaysia**. Perpustakaan, Negara, Malaysia: Forest Research Institute Malaysia, 2011.

LÓPEZ, F.; POLANCO, C.; BERMÚDEZ, J. Caracterización mecánica estructural para veinte combinaciones de madera laminada encolada. **Revista Colombia Forestal**, v. 16, n. 2, p. 138–157, 2013.

LOVE-MYERS, K. R. et al. Specific gravity responses of slash and loblolly pine following mid-rotation fertilization. **Forest Ecology and Management**, v. 257, n. 12, p. 2342–2349, maio 2009.

MADSEN, B. **Structural Behaviour of Timber**. First Edio ed. Altona, Manitoba, Canada: Timber Engineering LTD. North Vancouver; British Columbia, Canada, 1992.

MAKINO, K. et al. **Wood properties of young Acacia mangium trees planted in Indonesia Forest Products Journal**, 2012. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84867535993&partnerID=tZOTx3y1>>

MUÑOZ-ACOSTA, F.; MORENO-PEREZ, P. A. CONTRACCIONES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE *Acacia mangium* Willd ., *Tectona grandis* L. f. y *Terminalia amazonia* A. Chev , MADERAS DE PLANTACIÓN EN COSTA RICA. **Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**, v. XIX, n. 2, p. 287–303, ago. 2013.

NORUSIS, M. **IBM SPSS Statistics 24 Brief Guide**.Tokio, JapanIBM Corporation, , 2011. Disponível em: <<http://www.ibm.com/support>>

PERSSON, B. et al. Wood quality of *Pinus sylvestris* progenies at various spacings. **Forest Ecology and Management**, v. 76, n. 1–3, p. 127–138, ago. 1995.

POLANCO-TAPIA, C.; GARCIA, J. N.; ARÉVALO-FUENTES, R. **Mechanical performance evaluation for two laminated timber growing in Colombia**. WCTE 2016 - World Conference on Timber Engineering. **Anais...**2016

PRETZSCH, H. et al. Wood density reduced while wood volume growth accelerated in Central European forests since 1870. **Forest Ecology and Management**, v. 429, p. 589–616, 1 dez. 2018.

RAFEADAH, R.; RAHIM, S. Chemical and physical properties of juvenile *Acacia* hybrid and *Azadirachta excelsa*. **Journal of the Institute of Wood Science**, v. 17, n. 5, p. 290–294, 2007.

RAO, R. V. et al. Anatomical variation in the juvenile wood of *Acacias* grown in the South Indian state of Kerala. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 8, n. 2, p. 130–135, 16 maio 2012.

REFORESTADORA CACERÍ. **Acacia Mangium. Lo que usted debe saber sobre Acacia**

mangium. Medellín, Colombia: [s.n.].

RETHINK WOOD. **Mass Timber in North America, Expanding the possibilities of wood building design**. [s.l: s.n.].

ROTH, B. E. et al. Effects of management intensity, genetics and planting density on wood stiffness in a plantation of juvenile loblolly pine in the southeastern USA. **Forest Ecology and Management**, v. 246, n. 2–3, p. 155–162, jul. 2007.

SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE, B. D. C. Cedro, sajo y pino pátula, especies predilectas por la industria maderera en Bogotá. **Observatorio Ambiental de Bogotá, D.C.**, p. 1–5, 2010.

SIERRA, J. C. **Variación de las propiedades tecnologicas de Acacia mangium Willd procedentes de diferentes localidades del noroccidente de Colombia**. [s.l.] Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, 2010.

SOKAL, R.; ROHLF, F. **Biometry**. Second Edi ed. New York: [s.n.].

VALE, A. T. DO; BRASIL, M. A. M.; MARTINS, I. S. Variação axial da densidade básica da madeira de Acacia mangium Willd aos sete anos de idade. **Ciência Florestal**, v. 9, n. 2, p. 85–92, 30 jun. 1999.

VAN EYNDE, K.; BLOMLEY, T. **Causas de la ilegalidad de la madera en Colombia**. WWF-Colomb ed. Reino Unido: [s.n.].

WENIGER, B. et al. Antiprotozoal activities of Colombian plants. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 78, n. 2–3, p. 193–200, dez. 2001.

WENIGER, B. et al. A bioactive biflavonoid from *Camptosperma panamense*. **Fitoterapia**, v. 75, n. 7–8, p. 764–767, 2004.

WENIGER, B. et al. Comparative antiplasmodial, leishmanicidal and antitrypanosomal activities of several biflavonoids. **Phytomedicine**, v. 13, n. 3, p. 176–180, 2006.

YLINEN, A. A method of determining the buckling stress and the required cross-sectional area for centrally loaded straight columns in elastic and inelastic range. 1956.

6. MÉTODO BASADO EN VIBRACIÓN TRANSVERSAL PARA CLASIFICACIÓN DE *Campnosperma panamense* Standl. DESTINADO A LA ELABORACIÓN DE MLE

Resumen

La elaboración de madera laminada encolada (MLE) precisa una clasificación previa del material a fin de asegurar la calidad del producto final a través del estricto control durante todo el proceso de obtención. Inicialmente, las evaluaciones visuales son una herramienta valiosa para descartar aquel material que no cumpla la normatividad local. En Colombia la NSR-10 recomienda seguir una clasificación visual para definir el tipo estructural. Los procedimientos visuales en madera pueden ser tendenciosos e inducir errores, por ello metodologías alternativas como pruebas no destructivas (NDT) constituyen una herramienta valiosa y complementaria en la clasificación que involucra el módulo de elasticidad dinámico (E_d). Este trabajo tiene como objetivo implementar NDT para clasificar *Campnosperma panamense*, usando la metodología de vibración transversal desarrollada por el CIRAD de Francia. Se usaron tres tamaños diferentes: 2000 mm, 800 mm y 410 mm, denominándose lamelas, *blocks* y probetas, respectivamente. Se busca validar las NDT para clasificación en el área de MLE. Para comprobación del método, la madera de menor dimensión también fue sometida a la prueba de flexión estática en tres puntos (ASTM D143), encontrando alta correlación en el módulo de elasticidad estático y dinámico. Para las piezas de 800 mm el método arrojó que las piezas descartadas visualmente para uso estructural poseían valores de E_d cercanos a los de la madera sin defectos. Las lamelas de 2000 mm presentaron un E_d muy similar en los tres tipos de calidad, por lo que se cree que las uniones *finger joint* (FJ) paliaron el efecto de las anomalías.

Palabras clave: Maderas de Colombia; Pruebas no destructivas; Pruebas destructivas; Sajo; *Finger joint*

6.1. Introducción

La especie *C. panamense* Standl. es una de las más usadas en Colombia por la industria maderera. Los volúmenes de consumo anual rondan los 100 mil m³, constituyéndose en una de las especies madereras más demandadas en el país (COLORADO, 2004; VAN EYNDE; BLOMLEY, 2015a). Estas características hacen que la madera en mención genere una oferta que puede ser usada masivamente en la fabricación de edificaciones con aplicación estructural y de manera competitiva.

De otro lado, los productos en madera para construcción deben someterse a pruebas de resistencia que otorguen información a los ingenieros calculistas. Tradicionalmente estas

pruebas son de tipo destructivo, lo que implica altos costos, consumo de tiempo y la necesidad de laboratorios especializados, que no siempre responden a las expectativas del sector privado. Dicho esto, desde los años 50's se vienen adelantando trabajos en el sentido de caracterizar las piezas en madera a través de metodologías no destructivas como la vibración transversal (usada en este trabajo), el ultrasonido, las tomografías acústicas y el escaneo láser (ROSS, 2015), con las que se pretende obtener información de la totalidad de piezas a ser usadas, con alto grado de confiabilidad, lo que no descarta la comprobación con algunos test destructivos.

En este sentido y teniendo en cuenta que los códigos de construcción exigen una caracterización plena del material (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012; ARGÜELLES; ARRIAGA; MARTÍNEZ, 2000), para segmentarlo y asignarlo a una clase resistente (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA, 2010), este trabajo pretende comparar las propiedades elásticas de la madera a través de pruebas no destructivas para tres tamaños diferentes con destino a la fabricación de la madera laminada encolada (MLE) (410 mm, 800 mm, 2000 mm), además de tres tipos de clasificación por calidad (Grado A, Grado B y Grado C).

6.2. Metodología

6.2.1. Procedencia

El material fue obtenido en la ciudad de Bogotá D.C. en un depósito que compra la madera a intermediarios que provienen del Pacífico colombiano, donde es oriunda la especie. La madera viene en presentación de bloques (2700 mm) con la respectiva licencia de aprovechamiento. La totalidad de las piezas obtenidas se tomaron de un trabajo que pretende construir MLE de 7500 mm de longitud con aplicación estructural.

6.2.2. Maquinado

Los procesos de transformación por los que pasó la madera fueron aserrado a 47 mm de espesor, secado en cámara siguiendo las recomendaciones de la Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC, 1989), planeado en dos caras ortogonales, reaserrado y dimensionamiento

en longitud. Hasta este punto se obtuvieron piezas con dimensiones homogéneas (800 mm), las cuales se conocen como “*blocks*”, posteriormente fueron clasificadas siguiendo los criterios de la Tabla 6.1, en Grados A, B y C. Una vez el material fue clasificado, se fresaron sus extremos con herramientas *finger joint* (FJ) de 11-12 mm de longitud, para luego ser encoladas con adhesivo melamínico (MUF) a razón de 250 g.m⁻², procediendo con su unión longitudinal y prensado hasta obtener “*lamelas*” de 6000 mm de longitud.

La última etapa del maquinado consistió en el fresado FJ y prensado del material para la obtención de lamelas tipo “Extremo”, las cuales correspondían a la unión longitudinal de *blocks* grado A de 800 mm; lamelas tipo “Intermedio” fabricadas con *blocks* de 800 mm grado A, B y *blocks* cortos (<800 mm) grado B. Finalmente, se elaboraron lamelas tipo “Centro” con la unión longitudinal FJ de *blocks* largos grado B y *blocks* cortos grado A y B. Una semana después, estas lamelas fueron divididas en tres porciones, obteniendo piezas de 2000 mm, aproximadamente, que fueron usadas en este trabajo. Los laminados tradicionales usan *blocks* de 800 mm de longitud en todos los tipos de lamelas, como este trabajo pretende ser la base de investigaciones futuras, la longitud y grados de calidad de los *blocks* fue modificada para las lamelas tipo intermedio y centro.

6.2.3. Obtención de probetas

Los *blocks* grado C de 800 mm, fueron dimensionados en longitud para convertirlos en grado A y grado B, descartando los defectos incompatibles con la elaboración de MLE. A partir de estos *blocks* se obtuvieron las probetas de 410 mm que satisfacían los criterios de clasificación en los Grados A, B y C, mencionados en la Tabla 6.1. Es de aclarar que esta clasificación es meramente cualitativa, excepto en las dimensiones y perforaciones. Las cantidades del material obtenido según el grado al que pertenece se pueden visualizar en la Tabla 6.2.

Tabla 6.1 – Clasificación visual general para la especie *C. panamense*

Grado A	Grado B	Grado C
Ausencia de nudos	Presencia de nudos vivos sin desprendimiento	Presencia de nudos vivos con desprendimiento y/o nudos muertos
Aristas completas	Presencia de arista faltante sin comprometer dimensiones del producto final	Presencia de arista faltante comprometiendo dimensiones del producto final
Ausencia de médula centrada o en caras	Presencia de médula en las caras y/o en el borde de las secciones transversales	Presencia de médula en las caras y/o en el borde y/o en el centro de las secciones transversales
Ausencia de rajaduras	Ausencia de rajaduras mayores al ancho de la pieza	Presencia de rajaduras en cualquier dimensión
Ausencia de perforaciones	Ausencia de perforaciones grandes (>3mm)	Presencia de perforaciones en cualquier tamaño
	Presencia de perforaciones pequeñas (≤ 3 mm) ya curadas	Presencia de perforaciones vigentes
Homogeneidad de color, tonos y matices	Heterogeneidad de color, tonos y matices	Heterogeneidad de color, tonos y matices
Presencia de mancha azul	Presencia de mancha azul	Presencia de mancha azul
Ausencia de pudriciones	Ausencia de pudriciones	Presencia de pudriciones localizadas
Ausencia de escamadura	Presencia de escamadura sin comprometer dimensiones del producto final	Presencia de escamadura comprometiendo dimensiones del producto final
Homogeneidad en dimensiones	Homogeneidad en dimensiones con o sin presencia de alabeos	Heterogeneidad en dimensiones

Tabla 6.2 – Número de piezas utilizadas en el estudio para cada tamaño y grado

Tamaño (mm)	Número de piezas para el ensayo			Total
	Grado A/ Extremo*	Grado B/ Intermedio*	Grado C/ Centro*	
410	35	15	10	60
800	30	29	30	89
2000 *	27	8	16	51

*Aplica solo para el caso de las Lamelas de 2000 mm

6.2.4. Programa BING y ejecución del ensayo

Este programa denominado *Beam Identification by Nondestructive Grading*, fue desarrollado por el CIRAD en Francia (CIRAD, 2015) y determina las propiedades elásticas del material a partir de parámetros geométricos y físicos de las piezas de madera de hasta 4000 mm de longitud, además de los modos de vibración, cuando se es excitado con un golpe. Tal excitación en uno de los extremos genera una serie de vibraciones que son capturadas en el extremo opuesto por un micrófono del tipo cardiode unidireccional. Siguiendo las teorías de Euler y Bernoulli (BERNHARD; MILNER; RABBILOLO, 2001), en cuanto a los valores de carga- deformación, y los postulados de Timoshenko (TIMOSHENKO, 1957), en lo que respecta al modelo general de vigas, las frecuencias de vibración capturadas son medidas y transformadas por el programa en propiedades mecánicas del material, obteniendo de esta manera un módulo de elasticidad dinámico (E_d), que se corresponde con el módulo de elasticidad estático (MoE) (OTANI et al., 2015).

Es de aclarar que debe darse previamente una especie de “calibración” del material, con varios intentos hasta que la frecuencia de vibración se vuelva repetitiva. La Figura 6.1(A) da a conocer la forma en que se ejecutó esta prueba no destructiva.

6.2.5. Pruebas destructivas

Las pruebas destructivas se practicaron en probetas pequeñas de 410x25x25 mm siguiendo los criterios de la normativa ASTM D 143-12 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2010). Se calcularon las variables carga máxima, deformaciones, cargas en el límite de la proporcionalidad, tipo de falla y densidad seca al aire. Las pruebas fueron ejecutadas en la Escuela Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ-USP) de la ciudad de Piracicaba, usando para ello la máquina universal Contenco UMC 300 con la celda de carga de 5 t. La Figura 6.1 (B) permite tener una idea de la forma en que fue ejecutado el ensayo.

Figura 6.1 - Montaje de referencias para NDT usando el programa BING (A). Prueba de flexion longitudinal con probetas de $410 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$ de la especie *C. panamense* (B).

6.2.6. Análisis estadístico de la información

Los datos obtenidos fueron densidad seca al aire, contenido de humedad, módulo de elasticidad dinámico en todos los tamaños de probetas y módulo de elasticidad estático para el caso de las piezas de 410 mm. Se realizaron las estadísticas descriptivas, también se aplicaron pruebas de normalidad por Shapiro-Will y Kolmogorov-Smirnov, además se evaluaron las pruebas de Levene para homogeneidad de varianzas. En los casos donde no se aceptó la normalidad, se practicaron pruebas no paramétricas de Kruskal Wallis. Las diferencias entre los tratamientos fueron evaluadas por el test de Mann-Whitney-Wilcoxon (MANN; WHITNEY, 1947), a un 95% de confiabilidad. Por último, se implementaron correlaciones no paramétricas (Spearman) entre los tratamientos seleccionados para los factores y las variables E_d y D_{sa} . El programa usado para el análisis de los datos fue IBM SPSS Statistics 24 24 (NORUSIS, 2011)..

6.3. Resultados y Discusión

Para el caso del material experimental más pequeño se obtuvo una correlación altamente significativa ($q < 0.01$) entre los valores de MoE y E_d la cual llegó al 62.7%. Los resultados medios del módulo de elasticidad para cada tratamiento en la madera maciza por el método de la norma ASTM D 143 y el método de la NDT fueron 9.434,38 (± 1831) MPa y 10.318,43 ($\pm 2313,7$) MPa, respectivamente. La expresión para representar un valor en función del otro se da a conocer en la Ecuación 6.1 y aplica para unidades en MPa.

$$MoE = E_d * 0,50905 + 4.148,4$$

Ecuación 6.1

Lo valores de densidad seca al aire (D_{sa}) y E_d se dan a conocer en la Tabla 6.3. Allí se visualiza el número de probetas obtenido por tratamiento. A simple vista, los valores de densidad son muy similares para todos los tratamientos o lo que es lo mismo combinaciones de grados y tamaños, mientras que los valores de E_d tienen un rango de variación más amplio.

Tabla 6.3 – Valores medios de densidad seca al aire (Kg.m^{-3}) y módulo de elasticidad (MPa) obtenido por el procedimiento no destructivo.

Tamaño de <i>C. panamense</i> (mm)	Grados de Clasificación	Número de Probetas	Densidad seca al aire (D_{sa})		Módulo de Elasticidad dinámico (E_d)	
			Media (Kg.m^{-3})	Desviación estándar (Kg.m^{-3})	Media (MPa)	Desviación estándar (MPa)
410x25x25	Grado A	35	422,9	61,8	10732	2005
	Grado B	15	435,7	85,8	10569	2842
	Grado C	10	399,8	56,6	8495	1668
810x62x45	Grado A	30	420,8	45,0	10530	1378
	Grado B	29	421,5	59,1	9175	2199
	Grado C	30	439,3	59,0	9971	1985
2000x62x45	Grado A	27	429,5	32,4	11927	1207
	Grado B	8	441,7	32,4	11885	2644
	Grado C	16	432,1	40,1	12038	1880

Los valores para cada variable fueron puestos en forma de barras de caja y bigote en la Figura 6.2 se visualiza el comportamiento para cada variable. En términos generales los dos menores tamaños de material muestran un patrón similar en el E_d . Mientras que para las piezas de 2000 mm de longitud esta variable presenta valores más altos. En lo que respecta a la densidad, los valores medios son muy similares en todos los tamaños.

Para validar los datos y determinar el camino a seguir en la selección de los modelos estadísticos, se aplicaron los test de normalidad de la Tabla 6.4 y el test de homogeneidad de varianzas de la Tabla 6.5. No obteniendo normalidad en todos los casos, se optó por presentar los resultados agregados para cada variable y correr modelos no paramétricos para presentar valores de salida de las dos variables de manera conjugada. Los datos de estos modelos se presentan en el Anexo B.

Tabla 6.4 – Pruebas de normalidad para las dos variables evaluadas segmentadas por tamaño

Variables	Tamaño (mm)	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Parámetro	g.l.	Sig.	Parámetro	g.l.	Sig.
E_d	410X25X25	0,123	60	0,024	0,967	60	0,108
	810x62x45	0,050	89	0,200*	0,979	89	0,170
	2000x62x45	0,092	51	0,200*	0,987	51	0,858
D_{sa}	410X25X25	0,115	60	0,049	0,959	60	0,040
	810x62x45	0,095	89	0,046	0,970	89	0,035
	2000x62x45	0,090	51	0,200*	0,984	51	0,700

a.: Con la corrección significativa de Lilliefors. *Límite inferior de la significación verdadera. g.l.: Grados de libertad. Sig.: Significancia

Al aplicar la prueba no paramétrica Mann-Whitney-Wilcoxon se obtuvieron diferencias significativas entre tamaños al interior de la variable E_d , mas no en la variable D_{sa} . Gráficamente se puede verificar esta información en la Figura 6.3. Se nota que el E_d es muy sensible al grado de clasificación de la madera, sobre todo en las probetas de 410 y 800 mm de longitud; no así en las piezas FJ de 2000 mm, donde las variaciones del E_d no fueron considerables a pesar de la clasificación diferenciada en los grados del material. En los dos primeros casos (410 y 800 mm) existe una aparente correlación entre los valores medios de E_d con la D_{sa} ; pero dicho efecto se ve disipado en el modelo general cuando se adiciona la información de las piezas de mayor tamaño. La Tabla 6.6 evidencia una correlación positiva y significativa entre las dos variables del estudio ($q < 0.001$) cuando se aplica el estadístico de Spearman. Lo mismo sucede entre el tamaño y la E_d . La correlación entre el grado y la E_d sigue siendo significativa ($q < 0.05$), aunque negativa, lo cual representa que el E_d disminuye en el sentido de los grados A, B, C.

De otro lado, los valores de D_{sa} evidenciaron similaridad estadística, aunque las piezas de 410 mm con defectos no admisibles para uso estructural (Grado C), mostraron la media de tratamiento más baja y esta puede ser una justificación para los menores valores medios en la variable E_d .

Tabla 6.5 – Pruebas Levene para homogeneidad de varianzas en las dos variables evaluadas y su interacción*

	F	g.l.1	g.l.2	Sig.
E_d	2,207	8	191	0,029
D_{sa}	3,361	8	191	0,001

*Prueba la hipótesis nula de que la varianza de error de la variable dependiente es igual entre grupos

g.l.: Grados de libertad. Sig.: Significancia

Figura 6.2 - Diagrama de caja y bigote para el modulo de elasticidad dinámico (A). Densidad seca al aire (B).

Comparando piezas de 2000 y 410 mm se puede entrever que en la medida que se disminuye el tamaño hay una mayor sensibilidad ante la presencia de defectos. Por ejemplo, piezas de 2000 mm con atributos del grado A, B y C⁶ parecen incorporar mejor las diferencias anatómicas, expresando E_d menos diferenciados. No sucede lo mismo en piezas de 410 mm, donde la presencia de los mismos atributos tiene mayor posibilidad de disturbar tejidos y reducir los valores del E_d , al incidir, por ejemplo, en toda la sección transversal y disipar la señal de excitación. En piezas más grandes (2000 mm), donde las características del grado C fueron eliminadas, se encontraron los mayores valores de E_d , a pesar del mayor número de uniones FJ, lo que abre una ventana acerca de la baja a nula influencia que sobre el E_d puede representar el tamaño del *block* en la conformación de lamelas, bajo las condiciones del presente trabajo.

⁶ En este caso, el grado C hace referencia a lamelas con *blocks* grado A y B en dimensiones menores a 800 mm (180-700 mm), intercalados con *blocks* tipo B de 800 mm.

Figura 6.3 - Módulo de elasticidad dinámico para cada tamaño de probetas y grado de calidad (A). Densidad seca al aire para cada tamaño de probetas y grado de calidad (B).

Una consecuencia de eliminar las características típicas del grado C, es la obtención de piezas más cortas y el aumento de uniones FJ para llegar a 2000 mm; este procedimiento puede despertar el interés entre los fabricantes de MLE, ya que podrían incorporar piezas pequeñas a la vez que se conservan los estándares elásticos⁷. Una alternativa prudente puede ser la inclusión de este nuevo material en áreas cercanas al eje neutro de las vigas, donde tendrían una menor exigencia estructural.

⁷ Se debe verificar si los estándares de resistencia máxima y en el límite proporcional también se mantienen.

Tabla 6.6 – Correlación de Spearman para los tratamientos y variables del estudio

Prueba	Variación	Parámetros	Tamaño	Grado	E_d	D_{sa}
Rho de Spearman	Tamaño	Coefficiente de correlación	1,0	0,097	0,288(**)	0,103
		Significación (bilateral)	.	0,174	0,000	0,146
		N	200	200	200	200
	Grado	Coefficiente de correlación		1,0	-,173(*)	0,057
		Significación (bilateral)		.	0,014	0,423
		N		200	200	200
	E_d	Coefficiente de correlación			1,0	0,592(**)
		Significación (bilateral)			.	0,000
		N			200	200
	D_{sa}	Coefficiente de correlación				1,0
		Significación (bilateral)				.
		N				200

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

En las piezas medianas de 800 mm, la respuesta es contrastante, pues características visuales en el material asociado a rechazo (grado C), presentaron un mejor E_d , respecto a aquellas piezas clasificadas como grado B, obteniendo valores cercanos al grado A; circunstancia que pone en entredicho el uso exclusivo del procedimiento visual como herramienta de clasificación. Una causa a esta situación es que gran parte del material en este tamaño con grado C, presenta nudos, médula, dimensiones menores, entre otros (Ver Figura 6.4 y Tabla 6.1), que son características típicas del tejido cercano a la región central de estos árboles maduros. Si se evalúa transversalmente, es una zona que se caracteriza por una mayor densidad, como es típico de las latifoliadas, y de ahí puede desprenderse un mayor valor del E_d , cuyo valor final depende proporcionalmente de este parámetro (ROOHNIA; TAJDINI; MANOUCHEHRI, 2011). El Anexo B, da a conocer los resultados detallados de las comparaciones por métodos no paramétricos entre los diferentes tratamientos, para las dos variables seleccionadas.

Como consideración final puede decirse que desde los inicios de la formulación de las normas de clasificación de la madera en Colombia, que coinciden con los primeros resultados de la JUNAC (KEENAN, F.J.; TEJADA, 1984), a inicios de los 80's, cuando aún existían grandes áreas de bosques prístinos proveedores de material, se ha sido muy estricto con este noble material de construcción. En otras palabras, se ha seguido con una política en extremo, exigente con los términos de referencia que debe cumplir la madera, para que sea digna como pieza estructural. Situación que ha conllevado a que grandes volúmenes de madera sean rechazados en las plantas de transformación por que no cumplen las normativas, desestimulando su uso por la acumulación de productos no conformes y elevados costos en su obtención por cuenta de este rechazo.

Una alternativa corresponde a nuevas propuestas de clasificación de rápida evaluación y la incorporación en conjuntos estructurales como la MLE. Esto brindará la posibilidad de un producto normalizado y más competitivo que los productos y procesos antecesores. Es aquí donde los resultados de esta propuesta cobran relevancia. Pues de manera preliminar, es evidente el mejor comportamiento de la madera cuando hace parte de un conjunto FJ (2000 mm- Grados A, B y C) versus piezas individuales de menor tamaño, especialmente cuando presentan defectos (410 mm- Grado C y 800 mm- Grados B y C), otorgando así la posibilidad de mejorar en muchos sentidos, las perspectivas de utilización de la madera, cuya naturaleza es anisotrópica y de amplia variabilidad; eso sí, sin olvidar los aspectos más relevantes de fabricación, uso y mantenimiento (DIETSCH; TANNERT, 2015). En todo caso deberán definirse, cuantificarse y respetarse los límites de los defectos para cada grado y para cada especie, como ya lo proponen algunas normativas en Norteamérica (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2006c).

Figura 6.4 - Piezas de *C. panamense* de 800 mm de longitud clasificadas como grado C.

6.4. Conclusiones

Es posible representar el módulo de elasticidad estático de la madera a partir del módulo de elasticidad dinámico, calculado a partir de NDT en piezas de $410 \times 2,5 \times 2,5 \text{ mm}^3$, usando para ello el modelo econométrico presentado.

Los valores de densidad seca al aire se mantuvieron constantes en todos los tratamientos independientemente de los diferentes tamaños y grados de calidad. A pesar de visualizar una reducción drástica de esta variable en las piezas de menor tamaño cuando presentan defectos, no puede considerarse una situación estadísticamente significativa.

Los valores de elasticidad por vibración presentaron diferencias significativas cuando se compararon los grados de calidad. Así la madera grado A presentó la media más alta y se diferenció estadísticamente de los grados B y C, que no lograron diferencias entre ellos.

Por otro lado, la madera de 2000 mm presentó los mayores valores de E_d , diferenciándose estadísticamente de los tamaños 800 y 410 mm, que exhibieron igualdad entre ellos.

Las NDT's pueden ser consideradas con potencial de uso para la caracterización y clasificación de la madera de *C. panamense* con destino a la fabricación de MLE en Colombia, por lo que se recomienda incluir su utilización en las normativas de carácter nacional.

Referencias

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D245 Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber.**American Society for Testing and MaterialsUSA, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D143 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber**American Society for Testing and Materials, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, A. **ASTM D3737-93c. Standard practice for Establishing Stresses for Structural Glued Laminated Timber (GLULAM)**United States, 2012.

ARGÜELLES, R.; ARRIAGA, F.; MARTÍNEZ, J. J. **Estructuras de Madera Diseño y Cálculo.** 2a. ed. Madrid, España: AiTiM, 2000.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA. **NSR-10, Título G Norma Sismoresistente Colombiana**Colombia, 2010.

BERNHARD, R. J.; MILNER, F. A.; RABBILOLO, G. Vibrations of a beam and related statistical properties. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 34, n. 5–6, p. 657–675, set. 2001.

CIRAD. **BING®, wood quality analysis system.** Disponible em: <<http://www.cirad.fr/en/innovation-expertise/products-and-services/equipment-and-processes/bing-r-wood-quality-analysis-system>>.

COLORADO, A. SAJO : El Valioso desconocido. **Revista M&M**, v. 44, p. 1–6, 2004.

DIETSCH, P.; TANNERT, T. Assessing the integrity of glued-laminated timber elements. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 1259–1270, 2015.

JUNAC, J. DEL A. DE C. **Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas.** Cali, Colombia: [s.n.].

KEENAN, F.J.; TEJADA, M. **Tropical Timber for Building Materials in the Andean Group Countries of South America.** Ottawa, Canada: International Development Research Centre, 1984.

LU, W. et al. Study on flexural behaviour of glulam beams reinforced by Near Surface Mounted (NSM) CFRP laminates. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 23–31, ago. 2015.

MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 18, n. 1, p. 50–60, 1947.

NORUSIS, M. **IBM SPSS Statistics 24 Brief Guide.**Tokio, JapanIBM Corporation, , 2011. Disponible em: <<http://www.ibm.com/support>>

NUBISSIE, A.; KINGNE TALLA, E.; WOAFO, P. Effects of the combined action of axial and transversal loads on the failure time of a wooden beam under fire. **Materials & Design**, v. 40, p. 331–335, set. 2012.

OTANI, L. B. et al. **Elastic moduli characterization of wood and wood products using the impulse excitation technique**. [s.l: s.n.].

ROOHNIA, M.; TAJDINI, A.; MANOUCHEHRI, N. Assessing wood in sounding boards considering the ratio of acoustical anisotropy. **NDT & E International**, v. 44, n. 1, p. 13–20, jan. 2011.

ROSS, R. J. Nondestructive Testing and Evaluation of Wood. In: ROSS, R. J. (Ed.). . **Nondestructive Evaluation of Wood. General Technical Report FPL-GTR-238**. Second Edition. Madison, WI:U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.: [s.n.]. p. 167.

TIMOSHENKO, S. **Resistencia de Materiales. Primera Parte: Teoría Elemental y problemas**. 2a. ed. Madrid, España: [s.n.].

VAN EYNDE, K.; BLOMLEY, T. **Causas de la ilegalidad de la madera en Colombia**. WWF-Colomb ed. Reino Unido: [s.n.].

YANG, H. et al. Prestressed glulam beams reinforced with CFRP bars. **Construction and Building Materials**, v. 109, p. 73–83, abr. 2016.

Anexo B

Tabla 6.7 – Comparaciones no paramétricas entre los diferentes tamaños

Tamaño 410mm vs 2000mm				Tamaño 410mm vs 800mm				Tamaño 800mm vs 2000mm			
	Grados	E_d	D_{sa}		Grados	E_d	D_{sa}		Grados	E_d	D_{sa}
Mann-Whitney U	1367,5	831,5	1249,0	Mann-Whitney U	1932,500	2495,0	2421,5	Mann-Whitney U	1945,000	965,0	2198,0
Wilcoxon W	3197,5	2661,5	3079,0	Wilcoxon W	3762,500	6500,0	4251,5	Wilcoxon W	3271,000	4970,0	6203,0
Z	-1,072	-4,1	-1,663	Z	-3,057	-0,7	-0,962	Z	-1,499	-5,6	-0,310
Asymp. Sig. (2-tailed)*	0,284	0,000	0,096	Asymp. Sig. (2-tailed)*	0,002	0,498	0,336	Asymp. Sig. (2-tailed)*	0,134	0,000	0,757

*Significancia asintótica para dos muestras

Tabla 6.8 – Comparaciones no paramétricas entre los diferentes grados

Grados A vs C				Grados A vs B				Grados B vs C			
	Tamaño	E_d	D_{sa}		Tamaño	E_d	D_{sa}		Tamaño	E_d	D_{sa}
Mann-Whitney U	2221,0	2065,5	2381,0	Mann-Whitney U	2340,500	1684,5	2273,5	Mann-Whitney U	1184,000	1307,5	1415,0
Wilcoxon W	6499,0	3661,5	6659,0	Wilcoxon W	3718,500	3062,5	6551,5	Wilcoxon W	2562,000	2685,5	2793,0
Z	-1,5	-2,0	-0,8	Z	-0,229	-2,9	-0,493	Z	-1,854	-0,9	-0,252
Asymp. Sig. (2-tailed)*	0,135	0,044	0,441	Asymp. Sig. (2-tailed)*	0,819	0,003	0,622	Asymp. Sig. (2-tailed)*	0,064	0,361	0,801

*Significancia asintótica para dos muestras

: Representa diferencias significativas ($p < 0.05$)

7. CLASIFICACIÓN DE *Camptosperma panamense* Standl. CON DESTINO A LA FABRICACIÓN DE MLE USANDO TÉCNICAS VISUALES TRADICIONALES (TVT) Y DE VIBRACIÓN TRANSVERSAL (NDT)

Resumen

Históricamente la madera de *Camptosperma panamense* Standl. es una de las más usadas en Colombia para múltiples aplicaciones. Las características de los bosques donde crece naturalmente han demostrado alta resiliencia ante la continua y desordenada intervención por las comunidades locales. Se estima un gran potencial de la especie para el continuo suministro de materias primas en la elaboración de productos laminados con destino al sector de la construcción que puedan apalancar la evolución de toda la cadena de suministro. En este sentido, se caracterizó mecánicamente la madera usando técnicas de vibración transversal en tres grados diferentes de calidad discriminados a nivel industrial (A, B, C). Los resultados mostraron que: i) El módulo de elasticidad dinámico (MoE_d) en el grado más selecto de la industria A, coincide con los reportes de la literatura de MoE para madera *clear*. ii) El grado intermedio B posee los menores valores de MoE_d . iii) El menor grado industrial C, presentó valores altos de MoE_d , similares al grado más selecto A, a pesar de la gran cantidad de anomalías presentes. iv) El ordenamiento de los valores de MoE_d , no necesariamente coincide con la clasificación visual llevada en la industria. v) Se comprobó la eficiencia de la vibración transversal en la determinación del MoE de la especie. vi) Se recomienda la complementación de los dos métodos para una mejor discriminación en las plantas de transformación que contemple las anomalías.

Palabras clave: Construcción con madera, Transformación de madera, Comercio de madera, Logística forestal, Litoral Pacífico Colombiano; Sajo

7.1. Introducción

La madera de *Camptosperma panamense* Standl., conocida localmente como Sajo, ha sido usada por más de 200 años en la elaboración de diferentes productos con demanda local (ALMARIO GARCÍA, 2009) y por más de 50 años en la elaboración de contrachapados y la industria del aserrío para atender la demanda nacional (COLORADO, 2004; MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL, 1995). Palos de escoba, tendidos de cama, esqueletos para muebles de sala, correas para cubiertas, entre muchos otros, han sido elaborados de manera tradicional con esta especie (ARÉVALO; LONDOÑO, 2005; POLANCO, 2004). A pesar de los pocos estudios que le han dado relevancia como material de construcción (BRAHAN; BELTRÁN; RAMÍREZ, 2004; CHUDNOFF, 1984; KEENAN; TEJADA, 1984),

muchas razones explican su atractivo como por ejemplo, su relativa abundancia local, el carácter oligoespecífico de los bosques donde crece, la forma cilíndrica de los troncos, la baja a media densidad de la madera, la posibilidad de incursionar con bajos niveles tecnológicos en el corte de la madera, la demanda industrial, los mínimos controles de la autoridad forestal en los bosques (LINARES; AVENDAÑO, 2001) y sobre todo sus bajos precios cotizados en el mercado (SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE, 2010), los cuales son incomprensibles si se tiene en cuenta el gran esfuerzo logístico que debe ser adelantado para colocar la madera en los centros de consumo más importantes del país (POLANCO, 2002). Mas esta madera posee unas características muy interesantes para la elaboración de productos que podrían generar mayor valor agregado como muebles, estructuras macizas y madera laminada encolada (LÓPEZ; POLANCO; BERMÚDEZ, 2013), lo cual favorecería todos los eslabones de la cadena de suministro, incluso con la posibilidad de financiar el manejo forestal en aquellas áreas donde crece, ya que el volumen movilizado en Colombia llegó a 329 mil m³ entre los años 2008-2011 (ZUÑIGA, 2015).

En el país su distribución está restringida al litoral Pacífico en unas 250.000 hás donde crece naturalmente en masas oligoespecíficas junto con otras especies como *Otoba gracilipes*, *Euterpe oleraceae*, *Pterocarpus officinalis*, y *Symphonia globulifera*; su representación se acerca al 84%, lo cual revela su jerarquía regional (DEL VALLE, 1998, 1999, 2000b; PAIJMANS, 1970); su área basal alcanza entre 30 y 40 m².ha⁻¹, y sus ratas de crecimiento se ubican entre 2 y 3 m³.ha⁻¹.año según cálculos del autor a partir de las fuentes primarias (DEL VALLE, 1997; DEL VALLE; LEMA, 1999), representando una gran oportunidad para su regeneración y manejo, lo cual es una verdadera ventaja competitiva frente a la mayoría de especies plantadas y la imposibilidad de adelantar allí otro tipo de actividad económica, pues el ambiente originado por la inundación intermitente, dada la entrada del mar en las horas de la tarde y hasta altas horas de la noche durante todos los días del año, en conjunción con las altas precipitaciones, la red intrincada de raíces, además de las características limoso-arcillosas de los suelos y en general la inclemencia del ambiente tropical, hacen impensable el establecimiento de actividades alternativas en sus áreas naturales diferentes a la forestal con estas mismas especies (DEL VALLE, 1996; PARRA S; JUSTINICO, 2006; RESTREPO et al., 2002)

El objetivo del presente trabajo fue la caracterización mecánica de la madera maciza de Sajo proveniente del litoral pacífico colombiano, avizorando su utilización en elementos

estructurales laminados encolados que puedan suministrarse de forma sostenida al sector de la construcción nacional, bajo un esquema ordenado que respete las posibilidades de renovación y crecimiento en las áreas oferentes, contribuyendo de esta manera con el manejo forestal sostenible. Para ello, se compararon dos criterios de clasificación uno visual practicado a nivel industrial, según la experiencia de los autores y otro exclusivamente mecánico basado en técnicas de vibración transversal con el programa BING desarrollado por el CIRAD (Center for International Cooperation in Research Agricultural for development) de Francia (CIRAD, 2015).

7.2. Metodología

7.2.1. Procedencia de la madera

La madera proviene de la costa pacífica colombiana de los innumerables deltas que forman los ríos de esta región y que pertenecen a los departamentos de Nariño, Cauca, Valle del Cauca y/o Chocó. Debido a la forma de comercialización de la madera en Colombia desde el bosque natural, se dificulta establecer la procedencia exacta del material (VAN EYNDE; BLOMLEY, 2015b). Los bosques donde crece la especie son humedales forestales turbosos desarrollados en áreas de inundación con precipitaciones entre 4.000 y 7.000 mm, las temperaturas corresponden al área tropical por encima de los 24°C, lo que hace de las zonas bosques muy húmedos tropicales (bmh-T) donde la actividad forestal es la predominante (DEL VALLE, 1998). El material usado en la presente investigación fue adquirido a través de un comercializador en la ciudad de Bogotá, D.C. y poseía al momento de la compra, el salvoconducto único nacional, que acreditaba su legalidad.

7.2.2. Características de los bosques de Sajo

El Sajo forma masas muy homogéneas denominadas “sajales”, estos se asocian con áreas también homogéneas denominadas “cuangariales” donde crecen en conjunto un grupo de especies muy similares, que reciben el nombre de “cuángare”. Como cuángare se conocen las especies arbóreas de los géneros botánicos *Virola*, *Iryanthera*, *Dialyanthera* y *Otoba*. El

conjunto de sajales y cuangariales, forma el ecosistema de guandal. Los guandales corresponden a uno de los ecosistemas más representativos de la región y del país, por ser homogéneos y altamente productivos ya que se trata de especies heliófitas (DEL VALLE, 1996).

7.2.3. Transformación del material

Los mejores árboles de Sajo con más de 30 cm de diámetro a la altura del pecho (dap) en su mayoría son apeados con hacha a una distancia aproximada de un metro desde el suelo, luego son desramados y dimensionados a casi 3 metros si su destino es el aserrío, o 2,60 m si se van a desenrollar para producir chapas. Posteriormente, son rodados a través de carrileras construidas con troncos de la misma especie, pero de menor tamaño (latizales), separados entre sí unos dos metros. El material es llevado hasta unas zanjas de un metro de ancho y uno a dos metros de profundidad, que han sido elaboradas con varias semanas o incluso meses de anterioridad, y de forma manual por un grupo comunitario local. Esas zanjas son inundadas de forma natural con agua dulce para que en fila se vayan introduciendo las trozas asegurándolas con guayas y grapas, formando larguísimas hileras de troncos, que son transportadas por flotación hasta los sitios de acopio donde son haladas y/o embarcadas por grupos de cientos, incluso miles, en barcasas especializadas para este tipo de carga.

Las trozas son llevadas hasta los tornos de desenrollado o los aserríos ubicados a las orillas de los caños o del litoral, muy cerca de los centros poblados del pacífico colombiano, donde son dimensionados de forma conveniente. En el caso de la madera que hace parte del presente estudio, fue llevada a las sierras circulares de tipo estacionario que usan discos de hasta un metro de diámetro. Con mal a regular mantenimiento, estas máquinas de aserrado convierten trozas en bloques de dimensiones estándar, siendo $10(12,5) * 30 * 290 \text{ cm}^3$ la más común. De allí la madera es cargada en camiones de 35 Tn que la transportan a las ciudades capitales como Calí, Ibagué, Bogotá, entre muchas otras. En estos sitios es adquirida por depósitos de madera, donde es nuevamente aserrada en dimensiones a pedido de los clientes. En el presente estudio, los bloques fueron transformados en piezas de $7 * 10 * 270 \text{ cm}^3$ en la sierra sinfín con volantes de 90 cm de diámetro, con sierra cinta de cinco pulgadas de ancho y 700 cm de longitud, con dientes recalcados tipo lobo de 1,2 cm de altura y 3,0 cm de paso.

Las repisas obtenidas fueron sometidas a un secado al aire libre bajo techo en la localidad de Barrios Unidos en la ciudad de Bogotá D.C., sin control de las condiciones ambientales y por un término de siete meses comprendido entre octubre de 2014 y julio de 2015. Al final de este periodo, se tomó la humedad en tres puntos, dos extremos y centro, con higrómetro digital de contacto marca Merlin HM8-WS25, encontrando que la madera no poseía un contenido de humedad homogéneo y en la mayoría de los casos superaba el 15%; así que se realizó un secado en cámara marca Secal, siguiendo el programa descrito en el Anexo C, con una duración de 10 días. Después de esto, la madera se dejó reposar una semana y fue llevada a una carpintería.

En la carpintería la madera fue inicialmente dimensionada en sierra radial a 81,5 cm de longitud. Cada una de estas piezas fue planeada, en una canteadora de tres cuchillas, por una cara y por un canto eliminando entre 0,3 y 0,5 cm en total por plano, para una y dos pasadas, respectivamente. Después, se cepilló por la cara no planeada en una máquina de tres cuchillas, para dar espesor final de 6,5 cm. Posteriormente, se pasó dos veces por una sierra circular, cuyo espesor de corte de 0,3 cm de ancho, dio origen a dos piezas finales de 81,5 * 6,5 * 4,5 cm³. La velocidad promedio de maquinado en la dirección longitudinal fue de 10 mL.min⁻¹.

7.2.4. Clasificación de las piezas

A nivel industrial la madera se clasifica según varios factores como por ejemplo los productos finales a elaborar, los procesos de transformación internos y las características de la materia prima. No obstante, en la mayoría de los casos, las industrias colombianas se enfrentan a retos como el hecho de no fabricar un único producto final, no mantener una única secuencia en la producción y utilizar materias primas de diversas procedencias, lo que implica diferentes formas de corte, diferentes dimensiones y algo de gran impacto en la industria, que es la elevada diversidad intrínseca de la madera. Esta variación es identificada en primera instancia de manera visual e inconsciente a través de colores, tonos, matices y uniformidad en sus dimensiones, en este punto hay una primera segregación entre elementos homogéneos y heterogéneos. Por lo general, los elementos homogéneos representan los mejores estándares de clasificación. Luego, aquellas piezas heterogéneas son sometidas a procedimientos más

formales o conscientes de discriminación, donde se evalúan diferentes tipologías que se mencionan en la Tabla 7.1, y que tienen grados de importancia diferentes al momento de la evaluación, en función de su tipo, tamaño, frecuencia y posición, en síntesis, la visualización a criterio del observador. Estos mismos elementos fueron tenidos en cuenta para la clasificación del Sajo.

7.2.5. Pruebas no destructivas por vibración transversal

Las pruebas no destructivas por vibración transversal tienen su fundamentación en las Ecuaciones 7.1 a 7.4, presentadas durante el 19th Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium y desarrolladas de manera continua hace más de 50 años por Jayne (1959), Pellerin (1965), O'Halloran (1969), Wang et al (1993) y Ross et al (1991), todos citados por USDA (United State Department of Agriculture) (ROSS, 2015).

$$M \left(\frac{d^2x}{dt^2} \right) + D \left(\frac{dx}{dt} \right)^c + Kx = P_0 \sin \omega t \quad \text{Ecuación 7.1}$$

En la Ecuación 7.1, una solución para K dará origen a una expresión para el módulo de elasticidad dinámico (MoEd), que hace uso de los parámetros frecuencia de resonancia en Hz (fr), peso de las vigas en lb o Kg.g (W), vano de la viga en in o m (L), momento de inercia en in⁴ o m⁴ (I) y aceleración de la gravedad como 386 in.s⁻² o 9.8 m.s⁻² (g), bajo la formulación presentada en la Ecuación 7.2.

$$\text{MoEd} = \frac{f_r^2 W L^3}{2.46 I g} \quad \text{Ecuación 7.2}$$

La expresión D está asociada a la fricción interna o amortiguación del material, cuya amplitud va disminuyendo de forma logarítmica en la medida que avanza desde una Amplitud 1 (A₁) hasta una Amplitud n (A_n) para dos oscilaciones diferentes y no consecutivas en la curva amplitud vs tiempo, y que para una vibración libre puede ser representada por δ tal cual se da a conocer en la Ecuación 7.3.

$$\delta = \frac{1}{n-1} \ln \frac{A_1}{A_n} \quad \text{Ecuación 7.3}$$

En el caso de vibraciones forzadas o generadas, el componente Δf representa la diferencia de frecuencia para dos puntos de amplitud A , a lado y lado de la curva de resonancia (Amplitud vs frecuencia), donde f_r y A_r corresponden a la frecuencia y amplitud de resonancia, respectivamente. Como A se estima en $0.707A_r$ (half-power point method), entonces la formulación de δ queda reducida a la última porción presentada en la Ecuación 7.4.

$$\delta = \frac{\pi \Delta f}{f_r} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{A_r}{A}\right)^2 - 1}} = \frac{\pi \Delta f}{f_r} \quad \text{Ecuación 7.4}$$

Aunque resulta más conveniente expresar esa última ecuación en función del radio $f_r \cdot \Delta f - 1$ tal cual se da a conocer en la Ecuación 7.5.

$$Q = \frac{\pi}{\delta} \quad \text{Ecuación 7.5}$$

Aplicando esta serie de conceptos se vienen describiendo las propiedades mecánicas de la madera maciza y laminada, demostrando de manera exitosa la relación entre energía almacenada y propiedades de su disipación, usando técnicas de vibración transversal para la prueba específica de flexión estática. También se afirma que esta metodología ha incursionado con éxito desde los 90's por ser de bajo costo y puede ser usada, para discriminar los diferentes grados de la madera por parte de agencias especializadas en el área u organizaciones dedicadas a este campo de la investigación. (ROSS, 2015)

Todas estas nociones son recogidas internamente en el programa BING (Beam Identification by Non-destructive Grading), el cual captura a través de un micrófono externo cardioide unidireccional Shure Beta 57A, las ondas sonoras generadas en el extremo contrario de la madera, respecto a aquel que fue excitado con un impacto. Tal información fue capturada, procesada y convertida de manera directa en MoEd para la prueba de flexión estática. Como parámetros de entrada el programa exige la forma geométrica de la madera, la masa, las dimensiones y el contenido de humedad. Como consideración especial se tuvo en cuenta la forma de soporte del equipo y la pieza de madera, la forma de excitación para generar la vibración y el sistema de captura de la información por decibels o milivoltios.

Información más específica puede ser consultada en la normativa ASTM E 1876.

7.2.6. Análisis estadístico

Se verificó la normalidad de los datos con la prueba de Shapiro-Wilk y la homocedasticidad con la prueba de Levene. Se implementaron tres análisis de varianza con un único factor seleccionado, siendo este la calidad. El primer análisis, incluyó los valores de MoEd y densidad seca al aire (Dsa) para tres calidades (A, B y C) obtenidas a nivel industrial. En el segundo, los valores de MoEd fueron ordenados de menor a mayor obteniendo los grupos 1, 2 y 3, en esta situación no se encontró homogeneidad en las varianzas, por lo que se usó el test no paramétrico de Mann-Whitney para el modelo y la prueba de Kolmogorov-Smirnov para discriminar los grupos. En el tercero, se unieron los dos modelos anteriores obteniendo seis grupos de manera conjunta. Las diferencias significativas, cuando se presentaron en los modelos uno y tres, fueron segregadas con el test de Tukey al 95% de probabilidad y 5% de significancia.

También se implementaron modelos de correlación entre el MoEd y la Dsa y de regresión en todos los tratamientos para determinar la importancia de la densidad en la elasticidad dinámica de la madera, solo se presentan los resultados cuando hubo significancia.

7.3. Resultados

7.3.1. Clasificación visual

Después de la transformación de la madera, los autores pudieron identificar tres grupos de acuerdo con la clasificación visual. Los elementos mencionados en la Tabla 7.1, dan cuenta de esas categorías en la madera de Sajo, los cuales fueron recopilados de manera sistemática solo después de realizada la clasificación. Para una mayor claridad de este procedimiento, se presentan en la Figura 7.1 los ejemplos de las calidades A, B y C. En esta figura, se identifica con mayor sensatez que el criterio de agrupación obedece en primera instancia a la tonalidad y homogeneidad entre las piezas (A), seguido de las dimensiones (B) y terminando con la presencia de anomalías que deben ser descartadas para uso estructural (C) siendo coherentes con las recomendaciones de la normatividad nacional (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA, 2010).

Tabla 7.1 – Anomalías más relevantes para clasificación de la madera de Sajo tenidas en cuenta para la clasificación industrial.

Clasificación Visual General		
Calidad A	Calidad B	Calidad C
Ausencia de nudos	Presencia de nudos vivos sin desprendimiento	Presencia de nudos vivos con desprendimiento y/o nudos muertos
Aristas completas	Presencia de arista faltante sin comprometer dimensiones del producto final	Presencia de arista faltante comprometiendo dimensiones del producto final
Ausencia de médula centrada o en caras	Presencia de médula en las caras y/o en el borde de las secciones transversales	Presencia de médula en las caras y/o en el borde y/o en el centro de las secciones transversales
Ausencia de rajaduras	Ausencia de rajaduras mayores al ancho de la pieza	Presencia de rajaduras en cualquier dimensión
Ausencia de perforaciones	Ausencia de perforaciones grandes	Presencia de perforaciones en cualquier tamaño
	Presencia de perforaciones pequeñas ya curadas	Presencia de perforaciones vigentes
Homogeneidad de color, tonos y matices	Presencia de mancha azul	Presencia de mancha azul
Ausencia de pudriciones	Ausencia de pudriciones	Presencia de pudriciones localizadas
Ausencia de escamadura	Presencia de escamadura sin comprometer dimensiones del producto final	Presencia de escamadura comprometiendo dimensiones del producto final
Homogeneidad en dimensiones	Homogeneidad en dimensiones con o sin presencia de alabeos	Heterogeneidad en dimensiones

Figura 7.1 - Ejemplos seleccionados al azar de piezas pertenecientes a las calidades: calidad A (A), calidad B (B) y calidad C (C).

7.3.2. Módulo de Elasticidad Dinámico (MoEd) para la prueba de flexión estática

Los datos de MoEd obtenidos para la madera clasificada visualmente se dan conocer en la Tabla 7.2. En las columnas se pueden encontrar los respectivos valores de elasticidad dinámica para las calidades A, B y C, determinadas en la industria, siendo estos 10.529, 9.174 y 9.970 Kg.cm⁻², respectivamente. En las filas se dan a conocer los valores del mismo parámetro ordenado desde los más bajos hasta los más altos, siendo estos 7.802, 9.998 y 11.966 Kg.cm⁻²; lo cual dilucida en principio, la falta de correspondencia entre el ordenamiento de los valores por elasticidad dinámica y la clasificación industrial, ya que se esperaba que el grado A obtuviera los mayores valores de MoEd y el grado C los menores.

Tabla 7.2 – Correlación Comparación de los valores del MoEd (MPa) en tres clasificaciones industriales y tres grados mecánicos.

	Grado Mecánico	Clasificación en la Industria			Promedio por Calidad Mecánica
		A	B	C	
Clasificación de los valores ordenados por módulos elásticos	Menores Valores (1)				
	N	5	15	10	30
	Promedio	8608,8	7552,4	7775,7	7802,9
	Desviación	280,5	1518,7	1182,8	
	Valores Intermedios (2)				
	N	12	8	10	30
	Promedio	9951,8	9935,3	10104,6	9998,3
	Desviación	593,9	517,8	507,0	
	Mayores Valores (3)				
	N	13	6	10	29
	Promedio	11801,8	12215,8	12031,6	11966,7
	Desviación	783,9	571,7	974,0	
N Total		30	29	30	
Promedio por Calidad Industrial		10529,6	9174,6	9970,6	9891,6

7.3.3. Diferencia entre los módulos elásticos

Las diferencias obtenidas en los modelos se presentan en la Tabla 7.3. Para el modelo 1, que tuvo en cuenta la clasificación en la industria se presentaron diferencias significativas entre los grupos A y B para el MoEd, no así para el grupo C que mostró relacionamiento con los otros dos grupos; en el caso de la Dsa, no se encontraron diferencias significativas para los

tres grupos. En el modelo 2, como era de esperarse, se presentaron diferencias significativas entre todos los grupos tanto para el MoE_d como para la Dsa . En el modelo 3, que tuvo en cuenta los datos de los dos modelos anteriores, se presentaron los valores más altos de MoE_d y Dsa en el grupo 3 y los más bajos en el grupo 1 para el modelo dos; los demás valores se ubicaron en posiciones intermedias, destacándose los altos valores alcanzados del MoE_d en el grado A.

Tabla 7.3 – Diferencias estadísticas entre las medias de tratamiento para el MoE_d (MPa) y Dsa ($Kgr.m^{-3}$) de los tres modelos construidos en el trabajo.

Clasificación	Modelo 1*		Modelo 2**		Modelo 3*	
	MoE_d	Dsa	MoE_d	Dsa	MoE_d	Dsa
Grado A	10529,6 ^a	420,8 ^{NS}			10529,6 ^b	420,8 ^{bc}
Grado B	9174,6 ^b	421,5 ^{NS}			9174,6 ^c	421,5 ^{bc}
Grado C	9970,6 ^{ab}	439,3 ^{NS}			9970,6 ^{bc}	439,3 ^{ab}
Calidad 1			7.802,9 ^c	386,4 ^c	7.802,9 ^d	386,4 ^c
Calidad 2			9.998,3 ^b	432,2 ^b	9.998,3 ^{bc}	432,2 ^{ab}
Calidad 3			11.966,7 ^a	464,5 ^a	11.966,7 ^a	464,5 ^a

*Pruebas paramétricas

**Las diferencias se determinaron por pruebas no paramétricas

7.3.4. Dependencia entre MoE_d y Dsa a través de modelos de correlación y regresión

Dado el ordenamiento existente entre los módulos elásticos y densidad, el autor apostó por correlacionar estas dos variables en cada uno de los tratamientos, encontrando que no en todos los casos las dos variables mostraban alta dependencia. Solo en el modelo uno es evidente la correlación para las dos variables pertenecientes al Grado A ($N=30$), donde se alcanzó un valor de 0,800, mientras que al usar todos los datos ($N=89$), la correlación llegó a solo 0,512; ver Tabla 7.4 y Tabla 7.5.

En los modelos de regresión se incluyó además del MoE_d y la Dsa , el momento de inercia (I) y el contenido porcentual de humedad al instante de la prueba (%CH). Las Ecuaciones 7.6 y 7.7 dan a conocer los modelos de regresión lineal que predicen el valor del módulo de elasticidad dinámico según los parámetros expuestos, cuyos coeficientes de regresión ajustados (R^2) fueron 0,66 y 0,27, respectivamente. En las ecuaciones se observa como el Grado A del modelo uno, tiene mayores valores en los parámetros tanto para el punto de corte como para la Dsa , consolidando la tendencia de mayor MoE_d para este grado de calidad

dentro del conjunto. En esas ecuaciones los símbolos hacen referencia a **: $q < 0.01$, *: $q < 0.05$ y NS: $q > 0.05$, con un $\alpha=0.95$.

Tabla 7.4 – Correlación para los diferentes factores pertenecientes al Modelo 1 – Grado A (N=30)

Factor	MoEd (MPa)	Dsa (Kg.m ⁻³)	I (cm ⁴)	%CH
MoEd (MPa)	1			
Dsa (Kg.m ⁻³)	0,800	1		
I (cm ⁴)	-0,410	-0,228	1	
%CH	0,532	0,665	-0,157	1

$$MoEd = 10.266,5^* + Dsa * 22,9^{**} - I * 190,1^* - \%CH * 1,8^{NS} \quad \text{Ecuación 7.6}$$

Tabla 7.5 – Correlación para los diferentes factores pertenecientes a los Modelos 1 y 2 – Todos los Grados y Calidades (N=89)

Factor	MoEd (MPa)	Dsa (Kg.m ⁻³)	I (cm ⁴)	%CH
MoEd (MPa)	1			
Dsa (Kg.m ⁻³)	0,512	1		
I (cm ⁴)	-0,174	-0,113	1	
%CH	0,450	0,677	-0,101	1

$$MoEd = 8.193,9^{NS} + Dsa * 13,3^{**} - I * 126,9^{NS} + \%CH * 197,5^{NS} \quad \text{Ecuación 7.7}$$

7.4. Análisis y Discusión

Según los reportes de la literatura la madera de Sajo posee una Dsa que llega a 470 kg.m⁻³ y un MoE para el estado seco al aire entre 10.391 y 12.700 MPa (CHUDNOFF, 1984; JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA, 1981), lo cual no está muy lejos de los resultados encontrados en el presente estudio para los valores más altos de calidad en los modelos propuestos. A pesar de ello existen piezas de madera con valores muy bajos respecto a esas referencias. Los autores parten de cuatro premisas para justificar esta situación.

La primera es aquella relacionada con la dependencia entre MoEd y Dsa la cual ya ha sido citada con anterioridad (NIEMZ; AGUILERA; ROLLERI, 1994). La claridad con la que el

modelo 2 explica la dependencia de los módulos elásticos dinámicos con la densidad es irrefutable (Tabla 7.3 –). Al respecto diferentes autores (GUILLEY; HERVÉ; NEPVEU, 2004) señalan que la densidad puede variar para la misma especie en función de la procedencia, la silvicultura y a calidad de sitio. Y es que en el caso del Sajo, la gran extensión que ocupa en el pacífico colombiano y la diversidad de condiciones ambientales dominantes en la región donde crece y su dinámica natural (RESTREPO et al., 2002), influyen determinadamente en la densidad de la madera y por ende en el módulo de elasticidad dinámico. En estos días es más probable encontrar en los centros de comercialización de las grandes urbes, madera de Sajo mezclada en cuanto a procedencias, lo que da lugar a un amplio espectro de variación en sus propiedades.

La segunda, tiene que ver con el hecho que los pocos reportes de la literatura citan valores de densidad y resistencia para piezas libres de cualquier anomalía, pues en ese momento, se seguían normas técnicas de caracterización al pie de la letra, pues había material prístino y en abundancia, por lo que hacía más probable hallar muchas piezas libres de defectos, una situación más dispendiosa hoy en día. Además los bosques de guandal, a los que pertenecen los sajales, tienen una tradición de manejo con efectos disgénicos, ya que la población local cosecha primero los individuos más vigorosos que para una misma edad representarían los de mayor rata de crecimiento, dejando para la reproducción y segunda generación, aquellos más rezagados y defectuosos (DEL VALLE, 1994; SILVA, 2006).

La tercera, se refiere al tamaño de las piezas, pues es bien sabido que el tamaño sugerido de la norma ASTM D-143 más usado en el país corresponde a $2,5 \times 2,5 \times 41 \text{ cm}^3$ (ASTM INTERNATIONAL, 2010), dimensión que tiene menor probabilidad de inclusión de anomalías, respecto al tamaño de las piezas usadas en el presente estudio ($4,5 \times 6,5 \times 81,5 \text{ cm}^3$). Es por ello que estas normas recomiendan la aplicación de factores de reducción de resistencia en la madera maciza, en la medida que se usen piezas estructurales de mayor tamaño (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA, 2010; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010; CALIL JR.; MOLINA, 2010; FERNÁNDEZ-GOLFÍN; HERMOSO; DIEZ, 1995; MADSEN, 1992).

La cuarta, corresponde a aquella versión que estima que para la fecha de los reportes citados (más de 30 años atrás), los bosques no se encontraban tan intervenidos como en la actualidad y la madera poseía un mayor estado de madurez representado en mayor densidad

y resistencia, sin los efectos asociados a la explotación, como por ejemplo daños por árboles abatidos (DEL VALLE, 1998), entrada directa de luz que incide en la formación de anillos de madera temprana que disminuyen la densidad global y de paso la resistencia. Aunque la literatura reporta que este último aspecto pueden tener un efecto contrastante (GUILLEY; HERVÉ; NEPVEU, 2004).

El hecho de encontrar hoy por hoy madera en un amplio espectro de densidad y resistencia pone de manifiesto la necesidad de clasificarla por métodos expeditos para su utilización a nivel estructural. La ausencia de madera en grandes volúmenes para la calidad A, respecto a la disponibilidad total, coloca en alerta a los empresarios que deseen iniciar emprendimientos con Sajo y es que las proporciones hablan por sí solas, pues del 100% de la madera obtenida en el proceso de remanufactura, 45% correspondió a la calidad A, 32% a la B y 23% a la C. Pero esta clasificación visual por sí sola no otorga total certeza de los módulos elásticos dinámicos de la madera, aunque resulte de gran ayuda en la discriminación inicial. Para descartar anomalías evidentes y dimensiones, es necesario complementar las técnicas tradicionales con otros métodos como los no destructivos o los semidestructivos aplicados sobre las materias primas (FEIO; MACHADO, 2015), en especial si esta tiene grandes dimensiones (ÍÑIGUEZ, 2007) o está en servicio (IBRAHIM, 2014; MACHADO; RIGGIO; D'AYALA, 2015; NOWAK; JASIENKO; HAMROL-BIELECKA, 2016).

De otro lado, se debe resaltar que los resultados arrojaron subcategorías para cada clase, encontrando para el grado A tres tipos de elasticidade dinámica, según la evaluación no destructiva (las filas de la columna A en la Tabla 7.3 –). En este caso específico, y dentro de la categoría A, con destino a la fabricación de madera laminada, las maderas com mayores módulos de elasticidade dinámica ($n=13$) deberían estar en la zona de tracción, la de valores intermedios ($n=12$), en la zona de compresión y aquellas com los menores valores ($n=5$), cercanas al eje neutro. Lo mismo debería suceder con la madera de Grado B y algunas piezas del grado C, después de ser redimensionadas.

Y aunque las anomalías de la madera parecen una limitante para la implementación de ensayos no destructivos, trabajos como el de (SHARMA; SHUKLA, 2012) ya proveen metodologías para diferentes especies, lo cual es un indicativo de la necesidad de no descartar, sino gerenciar dichas anomalías cuando aparecen. En tal sentido, la Tabla 7.6, ofrece un listado de las anomalías más influyentes durante el presente estudio en la madera de Sajo. Los nudos

encabezan el listado, pues ya es reconocida su influencia en la pérdida de resistencia por la disminución del momento de inercia, por la desviación del grano y particularmente por su baja adhesividad en la etapa de encolado (GRUNWALD et al., 2014).

Tabla 7.6 – Anomalías más influyentes en los valores de elasticidad dinámica para las pruebas de vibración trasversal en la madera de Sajo.

Flexión Estática	Compresión Paralela
Nudos radiales (tipo, posición, cantidad)	Nudos radiales (tipo, posición, cantidad)
Nudos tangenciales (tipo, posición, cantidad)	Nudos tangenciales (tipo, posición, cantidad)
Dirección de la fibra	Dirección de la fibra
Grano entrecruzado	Escamaduras
Grano inclinado	Grano entrecruzado
Densidad del material	Densidad del material
Separación natural de tejidos en la dirección longitudinal (tangencial y/o radial) como acebolladuras	Bolsas con contenidos
Bolsas con contenidos	Médula incluida
Corteza incluida	
Efecto de las enfermedades y accidentes en la formación de anillos de crecimiento	
Escamaduras	
Rajaduras	
Médula incluida	

7.5. Conclusiones

La madera de Sajo se perfila como una gran promesa de los bosques naturales en Colombia para el suministro de materias primas que supla la producción seriada de piezas laminadas con destino al sector de la construcción. Lo anterior dada su oferta, las características de los bosques, su ubicación, la tradición foresto-maderera de los habitantes que conforman la localidad donde crece, el empoderamiento otorgado por el gobierno a las mismas y sobre todo las propiedades tecnológicas de la madera.

Este estudio demostró que a pesar de que los parámetros de clasificación industrial coinciden con los términos de referencia de los productos a fabricar, solo cumplen parcialmente con los criterios de clasificación mecánica determinados por métodos no destructivos de vibración transversal, por lo que es preponderante la complementación de las dos metodologías para agregar valor a la madera y asegurar sus requisitos en el mercado de uso estructural y no estructural.

El hecho que los módulos elásticos dinámicos del Sajo estén muy relacionados con la D_{sa} , más que con la presencia de anomalías o defectos en la madera, pone de manifiesto la necesidad de conocer más este producto con nuevos estudios de caracterización, transformación, generación de productos de vanguardia como Glulam (Madera Laminada) o CLT (Cross Laminated Timber) y los posibles escenarios de aplicación, además de conocer los valores de resistencia por procedimientos normativos tradicionales.

Se recomienda incluir una valoración cualitativa y cuantitativa de las anomalías encontradas para definir su participación en los valores elásticos de la madera, para que no se descarten las piezas anómalas, sino que se puedan vincular al mercado en diferentes grados de clasificación. Esta puede ser la punta de lanza para que, en Colombia de la mano con entidades como el ICONTEC, las Universidades, Fedemaderas que agrupa a los empresarios, ONG's, la Súper Intendencia de Comercio, Industria y Turismo, entre otros, promuevan la legalidad de la madera desde el bosque natural, su adecuada transformación y clasificación con criterios mecánico – estructurales y comercio justo.

Referencias

- ALMARIO GARCÍA, O. De lo regional a lo local en el pacifico sur colombiano, 1780-1930. **HiSTOReLo. Revista de Historia Regional y Local**, v. 1, n. 1, p. 76–123, 2009.
- ARÉVALO, R.; LONDOÑO, A. **Manual para la Identificación de Maderas que se Comercializan en el Departamento del Tolima**. Ibagué, Colombia: CORTOLIMA, Universidad del Tolima, 2005.
- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA. **NSR-10, Titulo G Norma Sismoresistente Colombiana** Colombia, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, A. **NBR7190/2010: Projeto de Estruturas de Madeira**, 2010.
- ASTM INTERNATIONAL. **Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber 1 This standard is for EDUCATIONAL USE ONLY**. **Annual Book of ASTM Standards**, 2010.
- BRAHAN, W. K.; BELTRÁN, A. B.; RAMÍREZ, N. F. T. Efectos de la aplicación de cinco tratamientos ignifugantes sobre la combustibilidad de las maderas de aceite maria, cedro macho, guino y Sajo. **Colombia Forestal**, v. 7, n. 15, p. 29–40, 2004.
- CALIL JR., C.; MOLINA, J. C. **Coberturas em Estruturas de Madeira: Exemplos de Cálculo**. Sao Carlos, SP, Brasil: [s.n.].
- CHUDNOFF, M. **Tropical Timbers of the World**. [s.l: s.n.].
- CIRAD. **BING®, wood quality analysis system**.
- COLORADO, A. SAJO : El Valioso desconocido. **Revista M&M**, v. 44, p. 1–6, 2004.
- DEL VALLE, J. I. **El problema de la selección disgenica en los bosques de guandal y propuesta para su solución**. En Memorias Seminario Nacional, “Políticas, Silvicultura y Protección Forestal”. **Anais...**Medellín, Colombia: 1994
- DEL VALLE, J. I. **Los bosques de guandal del delta del río Patía (Colombia)****Revista académica Colombiana de Ciencias**, 1996.
- DEL VALLE, J. I. ¿Será sostenible la producción maderera en los bosques de guandal?: Distrito Forestal Satinga, Colombia. **Crónica Forestal y del Medio Ambiente**, v. 12, n. 1, p. 1–9, 1997.
- DEL VALLE, J. I. Impacto de la explotación maderera en los bosques de *Camposperma panamensis*, Colombia. **Crónica Forestal y del Medio Ambiente**, v. 13, n. 1, 1998.
- DEL VALLE, J. I. Mortalidad sobrevivencia y vida media del árbol tropical *Camposperma panamensis*. **Crónica Forestal y del Medio Ambiente**, v. 14, n. 1, p. 5–16, 1999.
- DEL VALLE, J. I. CONSIDERACIONES ESTRUCTURALES DE LOS BOSQUES DE guandal DEL PACIFICO SUR COLOMBIANO. **Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín**, v. 53, n. 2, p. 1011–1042, 2000.

DEL VALLE, J. I.; LEMA, Á. **Crecimiento de cohortes de árboles coetáneos en rodales espacialmente dispersos: el caso de *Campnosperma panamensis*** Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 1999.

FEIO, A.; MACHADO, J. S. In-situ assessment of timber structural members: Combining information from visual strength grading and NDT/SDT methods – A review. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 1157–1165, jun. 2015.

FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J. I.; HERMOSO, E.; DIEZ, M. R. Análisis del efecto del volumen sobre la resistencia característica a flexión de la madera de los pinos silvestre y laricio de procedencia española Analysis of the effect of volume on the bending strength of the Spanish scot and laricio pine timber. **Materiales de Construcción**, v. 52, n. c, p. 43–55, 1995.

GRUNWALD, C. et al. Adhesively bonded timber joints – Do defects matter? **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 55, p. 12–17, dez. 2014.

GUILLEY, E.; HERVÉ, J.-C.; NEPVEU, G. The influence of site quality, silviculture and region on wood density mixed model in *Quercus petraea* Liebl. **Forest Ecology and Management**, v. 189, n. 1–3, p. 111–121, fev. 2004.

IBRAHIM, M. E. Nondestructive evaluation of thick-section composites and sandwich structures: A review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 64, p. 36–48, set. 2014.

ÍÑIGUEZ, G. **Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural**. [s.l: s.n.].

JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA. **Tablas de propiedades físicas y mecánicas de 24 especies de Colombia**. Lima, Perú: [s.n.].

KEENAN, F. J.; TEJADA, M. **Tropical Timber for Building Materials in the Andean Group Countries of South America**. [s.l: s.n.].

LINARES, R.; AVENDAÑO, J. Cualificación de los planes de manejo forestal como instrumentos para el aprovechamiento sostenible de los bosques naturales en Colombia. Estudio de caso: Costa Pacífica De Nariño, Colombia. **Colombia Forestal**, v. 7, n. 14, p. 55–70, 2001.

LÓPEZ, F.; POLANCO, C.; BERMÚDEZ, J. Caracterización mecánica estructural para veinte combinaciones de madera laminada encolada. **Revista Colombia Forestal**, v. 16, n. 2, p. 138–157, 2013.

MACHADO, J. S.; RIGGIO, M.; D'AYALA, D. Assessment of structural timber members by non- and semi-destructive methods. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 1155–1156, dez. 2015.

MADSEN, B. **Structural Behaviour of Timber**. First Edio ed. Altona, Manitoba, Canada: Timber Engineering LTD. North Vancouver; British Columbia, Canada, 1992.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. **Colombia : Informe Nacional**

Para La Conferencia Tecnica Internacional De La Fao Sobre Los Recursos Fitogeneticos. Conferencia Tecnica Internacional De La Fao Sobre Los Recursos Fitogeneticos. **Anais...**1995

NIEMZ, P.; AGUILERA, A.; ROLLERI, A. Velocidad de propagación del sonido en algunas especies creciendo en Chile y su relación con propiedades físicas. **Bosque**, v. 15, n. 2, p. 49–54, 1994.

NOWAK, T. P.; JASIEŃKO, J.; HAMROL-BIELECKA, K. In situ assessment of structural timber using the resistance drilling method – Evaluation of usefulness. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 403–415, 2016.

PAIJMANS, K. Land evaluation by air photo interpretation and field sampling in Australian New Guinea. **Photogrammetria**, v. 26, n. 2–3, p. 77–100, 1970.

PARRA S, L. N.; JUSTINICO, A. J. Geomorfología de la región del Patía. **Revista Ambiental**, v. I, n. 1988, p. 12, 2006.

POLANCO, C. Aplicación de la tecnología de maderas en la solución de un problema evidente de la industria forestal de madera aserrada. **Colombia forestal**, v. 7, n. 148, p. 153–162, 2002.

POLANCO, C. Modelo Determinístico-Estocástico para el Cálculo de Variables Sin Registros Historicos. Estudio Caso: Generación de Residuos Madereros en la Localidad de Barrios Unidos, Bogotá D.C. Colombia. **Colombia Forestal**, v. 9, n. 18, p. 128–148, 2004.

RESTREPO, J. D. et al. Morphodynamics of a high discharge tropical delta, San Juan River, Pacific coast of Colombia. **Marine Geology**, v. 192, n. 4, p. 355–381, dez. 2002.

ROSS, R. J. Nondestructive Testing and Evaluation of Wood. In: ROSS, R. J. (Ed.). . **Nondestructive Evaluation of Wood. General Technical Report FPL-GTR-238**. Second Edition. Madison, WI:U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.: [s.n.]. p. 167.

SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE, B. D. C. Cedro, sajo y pino pátula, especies predilectas por la industria maderera en Bogotá. **Observatorio Ambiental de Bogotá, D.C.**, p. 1–5, 2010.

SHARMA, S. K.; SHUKLA, S. R. Properties evaluation and defects detection in timbers by ultrasonic non-destructive technique. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 9, n. 1, p. 66–71, jul. 2012.

SILVA, L. Ensayo de manejo del bosque secundario del Magdalena medio en el corregimiento de Puerto Pinzón municipio de Puerto Bolívar. **Revista Colombia Forestal**, v. 9, n. 19, p. 45–60, 2006.

VAN EYNDE, K.; BLOMLEY, T. **Causas de la ilegalidad de la madera en Colombia**. WWF-Colombia ed. Reino Unido: [s.n.].

ZUÑIGA, J. **Estudios exploratorios del valor de la madera en Colombia Proyecto Gobernanza Forestal- CARDER**. [s.l.: s.n.].

Anexo C

Tabla 7.7 – Programa usado para el secado de madera de Sajo

Contenido de Humedad (%)	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Humedad de Equilibrio (%)
Igualación			
Mayor al psf*	40	70	12
psf*	45	60	10
25	50	50	8
20	55	40	6,5
15	55	30	5
Acondicionamiento			
Enfriamiento			

*psf: Punto de saturación de fibras

8. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE TABLEROS LAMINADOS COLADOS DE *Acacia mangium* Willd. FABRICADOS EN COLOMBIA

Resumen

La *Acacia mangium* Willd. es una especie recientemente usada en Colombia para Reforestación. Dado su rápido crecimiento en conjunción con las notorias propiedades de la madera, han permitido la expansión de su uso, especialmente en el mercado de productos aserrados y laminados. Un reto de los empresarios es la agregación de valor para este material, pues la silvicultura, que se encuentra en los primeros estadios de desarrollo (20 - 30 años), ha dado origen a madera estándar sin el establecimiento de requisitos deseables de calidad, incidiendo negativamente en los coeficientes de aprovechamiento durante las faenas de corte en los centros de transformación. Una opción es la elaboración de tableros laminados con adhesivos a base de isocianato como el EPI 1974/1993 para atender la demanda nacional. En ese sentido, el objetivo de este trabajo fue la caracterización mecánica de los tableros laminados producidos con esta madera procedente del norte de Colombia en tres espesores. Se dan a conocer los resultados de las pruebas mecánicas para el ensayo de flexión estática referentes al módulo de elasticidad (E) y resistencia máxima (MoR), al igual que de cizallamiento en la línea de cola (LC) y madera (M). En general, los valores de resistencia de los laminados no difirieron de los valores de resistencia con madera maciza reportados en la literatura. Se revela una mayor y significativa susceptibilidad de LC respecto a M, sin importar el espesor evaluado. Finalmente, se recomienda una revisión de los procesos de encolado para aumentar la resistencia de la LC y llevarla a los valores de cizallamiento de la M, para lo cual se mencionan los posibles puntos de control.

Palabras clave: Adhesivos EPI; Prensado de madera; Calidad de MLC; Bosques Plantados Colombia

8.1. Introducción

Ante el aumento de la población y el consiguiente impacto en la demanda mundial de materiales, materias primas renovables para la industria están ganando cada vez más espacio en el mercado, especialmente por el bajo impacto ambiental y la reducción de costos en comparación con las fuentes consideradas como no renovables. Entre las fuentes renovables, la madera es digna de mención, debido entre muchas razones, asu amplia distribución y disponibilidad en todo el mundo e inmensa versatilidad y variedad de usos. Una especie que demuestra las características antes mencionadas es la *Acacia mangium* Willd.

La *A. mangium* Willd. es una especie arbórea nativa de Australia, Papúa Nueva Guinea, Indonesia e Islas Molucas. És explotada en todo el mundo, tanto para usos madereros (celulosa, carbón, madera para enchapado y productos aserrados), como no madereros (forraje para el ganado, la producción de tanino, apicultura) (BALIEIRO et al., 2004; TONINI; HALFELD-VIEIRA, 2006). Tiene gran capacidad de adaptación (SUZUKI et al., 2011), que surge de características tales como el crecimiento rápido, baja necesidad de nutrientes, tolerancia a la acidez y compactación del suelo y altas tasas de fijación de nitrógeno cuando hace simbiosis con bacterias fijadoras de nitrógeno, siendo por esto considerada una especie nitrificadora (ANTONIO et al., 2000; BALIEIRO et al., 2004). La especie tiene una gravedad específica promedio de 0,524 g.cm⁻³ a los siete años (VALE; BRASIL; MARTINS, 1999), puede ser fácilmente aserrada, cepillada, lijada, pegado, clavado y recibir tratamientos de protección para aumentar su durabilidad en la albura (ROSSI; AZEVEDO; SOUZA, 2003).

En América del Sur y el Caribe, la introducción de la especie se realiza principalmente con finalidades forestales (MATTHEWS et al., [s.d.]), debido a su aporte en el ciclo de nutrientes y la fijación de nitrógeno en el suelo, su uso se ha fomentado también en proyectos de recuperación de áreas degradadas en los últimos años (FAO, 2014). En Colombia, las primeras plantaciones se produjeron a principios de 1990, mientras que en el Caribe las primeras plantaciones datan de 1995 (GIRALDO, 2014; TORRES VÉLEZ; DEL VALLE, 2007).

Debido a la notable calidad de la madera de *A. mangium* Willd., una interesante forma de aumentar el valor agregado de sus productos es el mercado de la madera de construcción. Este ha sido un reto para los productores colombianos y caribeños, ya que en el sector forestal aún se encuentra todavía en las primeras etapas de desarrollo, generan madera de baja calidad, que influye negativamente en los coeficientes de las etapas de procesamiento. Una alternativa eficiente sería la producción de madera laminada encolada, como paliativo a las desventajas mencionadas.

La madera laminada encolada (MLE) es el material producido a partir de laminillas (tiras o tablas de madera) de dimensiones relativamente reducidas en comparación con las dimensiones de la pieza final así constituida. Estas tiras se pegan en paralelo entre sí a través de adhesivos sintéticos (CALIL NETO, 2011). Entre las razones de su uso están el mayor aprovechamiento de la madera, facilidad de montaje, la versatilidad de formas, bajo costo, de bajo impacto ambiental y alta resistencia a la tensión mecánica.

El rendimiento del adhesivo es de fundamental importancia para el buen uso del potencial de la madera en la producción de MLE y su selección para el uso en elementos estructurales depende esencialmente de las condiciones ambientales en que operan y las condiciones de exposición (PIZZI, 1994). Otros factores intervienen en la calidad de la unión adhesiva, como el efecto del tipo de acabado superficial en la madera en la estructura microscópica de la pared celular, interfiriendo con la penetración del adhesivo (SINGH, 2002, CALIL NETO, 2011), y la calidad de la madera que influye en la capacidad de retención de adhesivo y la uniformidad de su distribución en la madera (GUO et al., 2002, CALIL NETO, 2011).

Los adhesivos utilizados para la fabricación de MLE son muchos, sin embargo, se hará hincapié en la emulsión de polímero en isocianato (EPI). Esta emulsión se forma de una unión fuerte e impermeable entre el adhesivo y el endurecedor de isocianato, obteniendo buenos resultados con tiempos de prensado de 45 a 60 minutos y temperaturas inferiores a 70 ° C, utilizando el sistema de EPI 1974/1993 (LÓPEZ; POLANCO; BERMÚDEZ, 2013). Boerhorst (2007) explica que el EPI tiene tanto un endurecimiento físico y químico, por lo que es menos sensible a la humedad y los cambios de temperatura en su entorno, asegurando propiedades para soportar cargas en vigas de hasta seis metros de luz. Este estudio tuvo como objetivo caracterizar la mecánica de tableros laminados encoladas mediante ensayos destructivos de acuerdo con la norma ASTM D143-09.

8.2. Metodología

El proceso fue realizado en Colombia y Brasil siguiendo la metodología que se expone a continuación.

8.2.1. Obtención de la madera

La madera provino de plantaciones maduras, con Diámetros a la Alutra del Pecho (DAP) promedio superior a 25 cm y de 12 años de establecido, ubicadas en el nordeste de Colombia, en la región conocida como el departamento de Córdoba. Los árboles fueron abatidos en el mes de abril del 2015 con motosierra y dimensionados en trozas de tres metros

de longitud. La madera se llevó en forma rolliza al aserradero ubicado en el centro del departamento donde fueron aserrados con una sierra angosta Wood Mizer, aquí fue obtenido un núcleo central de 7 cm de espesor, el cual fue desorrillado por una sierra con dos discos paralelos, llamada Twin Edger, al máximo ancho posible. Después ese núcleo pasó por una Multi Head, para obtener tablas de 2,5 y 2,0 cm de espesor, en anchos de 7 cm y longitudes variables entre 100 y 300 cm con pasos cada 50 cm. Por último, la madera fue secada a un 12% de humedad en un horno de caldera durante dos semanas y acondicionada al ambiente local por un período de una semana, este producto obtenido se denominó Madera Aserrada Seca (MASS).

8.2.2. Fabricación de los tableros laminados

Cuando la MASS estuvo lista en el área de acondicionamiento, se llevó a la planta de remanufactura. Allí fue processada en una molduradora cuatro caras de la marca HW, a una velocidad de 25 mL por minuto. De cada superficie se debastaron entre 1 y 2 mm. El proceso continuo en unas sierras manuales DeWalt donde fueron descartadas las piezas con defectos como nudos, médula, arista faltante, rajaduras, bolsas, entre otros. En esta etapa, el material se separó en tres calidades de *block*: madera de albura, madera de albura/duramen y madera de duramen, con dimensiones entre 30 y 80 cm. Posteriormente, cada tipo de *block* fue maquinado en los dos extremos con un par de fresas de *finger joint* de 11-12 mm de profundidad y se encolaron a razón de 150 gr.m² en toda la superficie. Se formaron lamelas de 3 m de longitud, las cuales fueron obtenidas en la misma máquina con una presión que varió de 7 a 12 kgr.cm⁻², según fuera el espesor de la pieza de madera.

Las lamelas obtenidas en el punto anterior se dejaron fraguar por un término de 12 a 24 horas, para luego ser nuevamente cepilladas en sus cantos en la misma máquina molduradora a fin de homogenizar su ancho entre 5 y 6 cm; después de lo cual se aplicó el adhesivo EPI 1974/1993, que se compró en una presentación bicomponente (Adhesivo + Catalizador) al distribuidor de Akzo-Nobel en el país. Tal aplicación se hizo con la ayuda de un rodillo de hule electromecánico, con velocidad de giro ajustable para la adecuada dosificación del adhesivo, en este caso 250 gr.m². Se armaron los tableros en una prensa hidráulica Taylor de seis bandejas, colocando tantas lamelas de 5 - 6 cm hasta alcanzar los

anchos especificados desde 40 hasta 100 cm, a una presión de 5-10 Kgr.cm⁻². Se respetaron los tempos abiertos, cerrados y de prensado recomendados por el distribuidor de la cola.

Al final los tableros fueron escuadrados en una sierra perpendicular, lijados y reparados en los puntos necesarios con una masa de aserrín y cola, para almacenarlos horizontalmente envueltos en una película plástica tipo vinipel (Majipack).

8.2.3. Obtención de las muestras

Para la obtención del material experimental, se seleccionaron 12 tableros en el área de almacenamiento para cada uno de los espesores de 1.0, 1.5 y 1.8 cm. Se procedió a tomar en cada uno de sus bordes laterales una pieza que abarcará dos lamelas completas, con la LC en el centro y al menos una unión FJ presente, este material tuvo una longitud de 41 cm. El procedimiento de muestreo se repitió en los extremos del tablero, aquí el ancho de los cuerpos de prueba fue de 6 cm y en la longitud de 41 cm se incluyeron al menos siete lamelas diferentes.

Los cuerpos de prueba del primer caso se usaron para las pruebas de flexión estática y los del segundo caso para las pruebas de cizallamiento.

La Figura 8.1 da a conocer los dos tipos de material obtenido en el experimento. En la parte inferior (B), foto de un cuerpo de prueba para flexión estática y encima para cizallamiento (A).

Figura 8.1 - Fotos de los cuerpos de prueba para cizallamiento (A) y para flexión estática (B).

8.2.4. Testeo del material

Los ensayos mecánicos fueron conducidos en el Laboratorio de Ingeniería de Madera de la Escuela de Agricultura “*Luiz de Queiroz*” en la ciudad de Piracicaba. Antes de testar mecánicamente el material, las dimensiones de cada cuerpo de prueba fueron tomadas en espesor, ancho y longitud. Así como su peso, para conocer los valores de densidad. La máquina utilizada para las pruebas fue la universal UMC300 con capacidad de 30 Tn, suministrada por la empresa Cotenco.

8.2.4.1. Para la prueba de flexión estática

Para las pruebas de flexión estática se utilizaron 36 cuerpos de prueba. Doce para cada tipo de espesor (1.0, 1.5 y 1.8 cm). Se siguieron las directrices de la ABNT 7190, en términos de velocidad de aplicación de la carga (2.5 KN.min⁻¹). En este caso, todo el material fue sometido a dos tests, el primero utilizando una luz de 38 cm para todas las probetas y en el segundo, una luz equivalente a 15 veces el espesor del cuerpo de prueba ($15=L/h$). Así para los espesores de 1.0, 1.5 y 1.8 cm se usaron luces de 15, 22.5 y 27 cm, respectivamente. En los dos casos, las pruebas se condujeron manualmente, teniendo mucho cuidado de trabajar en la zona elástica del material, sin pasar a la zona plástica en el primer caso.

Como no se llegó a carga máxima en el primer caso, el software de la máquina universal no calculó los valores de resistencia deseados, así que fue necesario calcular el valor de la pendiente en la gráfica carga vs deformación de forma manual, para ello se tuvieron en cuenta los datos de carga reportados por la máquina y dos valores de deformación. El primero, suministrado por el encoder interno del sistema de carga y el segundo, consistente en un encoder externo que medía la deformación del material en la línea neutra para uno de los cantos, tal cual se visualiza en la Figura 8.2.

Con la experiencia del autor, se eligieron los valores de carga y el promedio de las deformaciones de los dos sistemas ajustados a un modelo significativo de regresión simple con $R^2 > 0.90$ y $q < 0.01$ para reportar el valor de la pendiente en Kg.cm⁻¹ para cada probeta. El ejemplo se puede visualizar en la Figura 8.3. Las cargas aplicadas fueron puntuales en el centro del vano de la madera.

Figura 8.2 - Detalle de la prueba de flexión estática en la máquina universal. En el lado izquierdo se visualiza encoder externo.

Figura 8.3 - Valores típicos de carga (Kgr) vs deformación (cm) para una probeta de 1.8 cm (línea verde). Encoder externo: Línea roja, Encoder interno: Línea azul.

El valor de la pendiente de la curva carga vs deformación ($p \cdot \lambda^{-1}$), junto con las dimensiones de los cuerpos de prueba fueron utilizados en la Ecuación 8.1, para determinar el Módulo de Elasticidad (E).

$$E = \frac{pL^3}{4\lambda bh^3} \quad \text{Ecuación 8.1}$$

$$RoM = \frac{3PL}{2bh^2} \quad \text{Ecuación 8.2}$$

Donde:

E: Módulo de elasticidad ($\text{Kg} \cdot \text{cm}^{-2}$).

MoR: Resistencia máxima en la prueba de flexión estática ($\text{Kg} \cdot \text{cm}^{-2}$).

P: Valor de carga máximo o punto de la rotura de la curva carga vs deformación (Kg).

p: Valor de la carga en un punto cualquiera de la curva carga vs deformación, en la región elástica (Kg).

L: Longitud entre apoyos (cm).

λ : Deformación del material en un punto de la curva carga vs deformación, al interior del límite elástico (cm).

b: Base de los cuerpos de prueba (cm).

h: Altura de los cuerpos de prueba (cm).

La variable MoR que se debe calcular según lo visto en la Ecuación 8.2, fue obtenida directamente de la información del software de la máquina universal de ensayos mecánicos, según el valor de “p” o “P” alcanzado en los ensayos primero y segundo, respectivamente. Se insiste que “P” no se alcanzó en las primeras mediciones dado que se estaba explorando la zona elástica. Para las segundas mediciones ese valor estuvo más cercano al punto de rotura. Siendo que 12 de las 36 probetas se rompieron y alcanzaron ese punto.

Se aclara que el MoR para las primeras mediciones se calculó con “p” y para las segundas se calculó con “P”.

8.2.4.2. Para la prueba de cizallamiento

Se usaron los cuerpos de prueba obtenidos en los extremos superiores de los tableros. En este caso la madera fue sometida a la prueba de corte según la norma brasilera ABNT 7190. Para ello, se hicieron dos muescas en cada punta de las piezas. Como se indica en la

Figura 8.1. Una de las muescas se practicó en la Madera (M) y la otra en la línea Encolada (LC). El reporte de la máquina en este caso fue carga máxima, el cual se dividió entre

el área de cizallamiento para determinar la resistencia máxima en este esfuerzo (RM), tal cual se expone en la Ecuación 8.3.

$$RM = \frac{P'}{bh'} \quad \text{Ecuación 8.3}$$

Donde:

RM: Resistencia máxima en la prueba de cizallamiento (Kg.cm⁻²).

P': Valor de carga máxima o punto de rotura (Kg).

b: Base de los cuerpos de prueba (cm).

h': Altura de los cuerpos de prueba descontados en 1 cm, equivalente a la altura de la muesca (cm).

8.2.5. Análisis de la información

Los valores obtenidos para las diferentes pruebas fueron procesados con los estadísticos descriptivos. Además, fueron implementados dos análisis de varianza para determinar posibles diferencias estadísticas entre los valores de flexión estática y cizallamiento, usando como variaciones el espesor y la luz utilizada en el ensayo. Para la discriminación se implementó la prueba de Tukey al 95% de significación para todas las variables, excepto MoR para los tres espesores, donde fue aplicada la prueba T3 de Dunnet, dada la ausencia de homocedasticidad en los datos. Los valores de cizallamiento para M y LC se analizaron siguiendo el mismo procedimiento.

8.3. Resultados

Todos los valores de resistencia obtenidos para la madera se resumen en la Tabla 8.1. Ninguno de los datos presentados está discriminado por factor alguno.

Tabla 8.1 – Valores de estadísticos descriptivos para la totalidad de probetas y ensayos.

Propiedad	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica
Módulo de Elasticidad (1000 Kg.cm ⁻²)	72	57,299	174,416	113,017	21,244
Resistencia Máxima Flexión (Kg.cm ⁻²)	72	282	1188	568	198
Resistencia Cizallamiento (Kg.cm ⁻²)	72	43	163	102	23

Los resultados para cada división propuesta se dan a conocer en la Tabla 8.2. Las cifras dan cuenta de los mayores valores de E para las mediciones uno y dos en el espesor de 1 cm. De otro lado, las cifras más bajas se dieron en el espesor 1.5 cm.

Para el caso de la RM en cizallamiento, se presentó una mayor oposición al corte en la madera maciza, cuando se comparó con las líneas de cola. No hay un espesor dominante para los dos casos.

Tabla 8.2 – Valores de resistencia para flexión (E y MoR) y cizallamiento (RM).

Variable	Medición 1			Medición 2		
	1.0 cm	1.5 cm	1.8 cm	1.0 cm	1.5 cm	1.8 cm
E (Kg.cm ⁻²)	133855	110763	122411	114843	95904	100327
MoR (Kg.cm ⁻²)	475	340	418	778	636	758
RM (Kg.cm ⁻²)	85 LC	102 LC	91 LC	118 M	112 M	105 M

*En cizallamiento LC: Línea de cola, M: Madera.

Los datos agregados por espesores y momento de medición se ilustran en la Figura 8.4. Los mayores valores para el E se dieron en la secuencia 1,0 cm, 1,8 cm y 1,5 cm; siendo el tablero de 1,0 cm el que obtuvo un mayor E con 124349 Kg.cm⁻² (± 3415 Kg.cm⁻²), seguido del espesor 1,8 cm con 111369 Kg.cm⁻² (± 3387 Kg.cm⁻²) y el espesor 1,5 cm, que alcanzó 103333 Kg.cm⁻² (± 5014 Kg.cm⁻²) (Figuras 4a y 4b). Según el test de Tukey, los E para los espesores 1.5 y 1.8 cm son estadísticamente iguales, no así para las demás combinaciones ($\alpha < 0.05$).

El MoR entre los tres espesores también mostró diferencias significativas según el test de Dunnett. En este sentido, los espesores 1.0 cm y 1.5 cm, así como 1.0 cm y 1.8 cm mostraron diferencias significativas entre las medias de tratamiento. Los espesores 1.5 cm y 1.8 cm no mostraron diferencias significativas entre sí, idéntica tendencia se presentó en el E.

Para los períodos de medición 1 y 2, también se encontraron diferencias. En el E hay un descenso entre los valores cuando se pasa de la primera (122343 ± 2753 Kg.cm⁻²) a la segunda medición (103691 ± 3589 Kg.cm⁻²). Mientras que para el MoR, se presenta el caso contrario, los valores aumentaron en la segunda medición (724 ± 26 Kg.cm⁻²), respecto a la primera (411 ± 13 Kg.cm⁻²). (Figuras 4a y 4b). Esas diferencias para el E y MoR fueron significativas en los períodos de medición uno y dos.

En la prueba de cizallamiento, se dieron diferencias significativas entre las medias de tratamiento para la RM entre LC y M. La media de RM para LC fue 93 Kg.cm⁻² (± 19.5 Kg.cm⁻²),

en tanto que, para M, la media alcanzó 111 Kg.cm^{-2} ($\pm 22.7 \text{ Kg.cm}^{-2}$). Adicionalmente, en esta prueba no se detectaron diferencias significativas para los tres tipos de espesor analizados. Ver Figura 8.5.

Figura 8.4 - Valores de resistencia en la prueba de flexión estática (Kg.cm^{-2}): Módulo de Elasticidad (E) (A y C) y Resistencia Máxima (MoR) (B y D).

Figura 8.5 - Valores de resistencia en la prueba de Cizallamiento (Kg.cm⁻²): para tres espesores (1=1.0 cm, 2=1.5 cm, 3=1.8 cm) (A) y para Línea de Cola (LC) (1) y para Madera Maciza (M) (B).

8.4. Análisis y Discusión

Los resultados para las pruebas de flexión estática y cizallamiento dan cuenta de unos números obtenidos para el rango de la especie, según reportes previos de la literatura para madera maciza y laminada (GIRALDO, 2014; LÓPEZ; POLANCO; BERMÚDEZ, 2013; MUÑOZ-ACOSTA; MORENO-PEREZ, 2013a), exceptuando algunos reportes que muestran valores más altos de resistencia (BHAT et al., 2010; HERAWATI; MASSIJAYA; NUGROHO, 2010). A pesar de eso, resulta interesante conocer porque la madera de menor espesor exhibió mayores valores em E y MoR.

Al parecer los mayores valores de E y MoR en el espesor de 1.0 cm tienen su justificación en la calidad del material. Un menor espesor incide en una menor variabilidad; por consiguiente, condiciones más homogéneas pueden incidir em mayor resistencia. Esto es particularmente cierto en la madera de *A. mangium* Willd., donde en el proceso constructivo se premia al duramen por sus características estéticas. La madera de duramen es reconocida como de mayor resistencia, frente a la madera de albura en latifoliadas (CETINKOL et al., 2012; KOKUTSE et al., 2004; NIKLAS, 1997). De esta forma una madera de 1.8 cm de espesor tiene mayor probabilidad de contener porciones, incluso caras completas de albura, siendo más heterogénea y menos resistente, si es comparada con una madera de 1.0 cm.

La explicación de una menor resistencia en el caso de la madera de 1.5 cm de espesor, frente a los otros dos espesores, tiene justificación en el proceso constructivo, pues la unión longitudinal de las lamelas se realizó a través del sistema FJ horizontal, que contrasta con el FJ vertical característico en los tableros de 1.0 y 1.8 cm. Aunque la literatura especializada reporta resultados contrastantes en la resistencia de los dos tipos de FJ (BATISTA et al., 2002; JOKERTS, 1981; MARIN, 2006); y a pesar que los valores de resistencia en este tipo de laminado dependen de una gran cantidad de elementos, este estudio ratifica aquellas versiones que están a favor de una mayor resistencia del FJ vertical en la prueba de flexión estática.

Figura 8.6 - Imagen de probetas después de ser sometidas al esfuerzo en flexión estática: la flecha señala la hendidura formada en la zona de compresión en FJ horizontal en madera de 1.5 cm (A) y en la zona de tracción en FJ vertical en madera de 1.8 cm (B).

La Figura 8.6 ilustra la diferencia en el tipo de falla para las dos uniones y sus implicaciones en la geometría de las piezas y la predisposición física de los dientes a la falla, pues en el FJ horizontal, la arista de la punta del diente tiene mayor probabilidad de coincidir con el eje neutro de la probeta al momento del ensayo, convirtiéndose en una amenaza de corte longitudinal, si las condiciones del proceso productivo no están sintonizadas. Al mismo tiempo, la arista del FJ horizontal en la zona de compresión hiende la madera sometiéndola a un esfuerzo adicional de clivaje que puede debilitar elemento al favorecer la generación de un plano de falla. Por otra parte, el FJ vertical expone estas mismas aristas de manera perpendicular al eje neutro de la pieza, reforzando en cierta forma el eje neutro, y aunque las

aristas de las dentaduras verticales también pueden hendir la madera en la parte comprimida, representan un riesgo de menor importancia.

Respecto al menor E reportado en la segunda medición de las probetas, se debe recurrir al concepto de plasticidad del material. Pues a pesar de conducir el ensayo de forma manual, es posible que se haya violado el supuesto de elasticidad durante el primer ensayo, para trabajar involuntariamente en la zona plástica. La otra probabilidad es que la LC haya sufrido microfracturas durante el primer ensayo, pues fue común en algunas probetas la emisión de ruidos como una forma de liberación de energía dada la carga actuante.

En el caso del MoR, se debe recordar que el presente estudio trabajó esta variable con los reportes de la máquina a través del software. En muchos de los casos el operario de la máquina dejó avanzar la carga hasta alcanzar la rotura en las probetas, fue por ello, que se presentaron aumentos inusitados en los valores de carga máxima, frente a aquellos donde se detuvo el ensayo en algún punto de la zona elástica, propiciando mayores valores de MoR.

Para el caso de las pruebas de cizallamiento, la evidente homogeneidad de respuesta en la resistencia unitaria de los tres espesores es a criterio del autor, un efecto asociado sobre todo al proceso normalizado de obtención de los tableros. Estos resultados de resistencia fueron similares a los obtenidos por (GUTEMBERG et al., 2015), quien usó melamina úrea formaldehído (MUF) y fueron superiores a la madera maciza de ese mismo estudio que, obtuvo la *A. mangium* Willd. Proveniente de plantíos brasileiros de 18 años de edad.

Respecto a la respuesta diferente para LC y M, queda la preocupación del por qué las LC fueron menos resistentes que la M, pues un derrotero en la MLE, es que las LC exhiban la misma o mejor resistencia que el elemento de M. Son muchas y variadas las hipótesis que pueden surgir; el autor expone algunas de ellas: i) el irrespetar los niveles óptimos de humedad de la madera, ii) la preparación errada de las superficies de la madera, iii) la forma de aplicación del adhesivo, iv) su preparación y v) dosificación, vi) los diferentes tiempos que se contemplan en la fabricación, vii) la misma intensidad y duración del prensado, viii) algo más crítico como es la especificación de la cola junto con su afinidad física y química con la madera, ix) hasta las condiciones medioambientales y x) la forma como se manipula el producto después de la fabricación, pueden incidir de manera drástica em este resultado.

Según los reportes científicos algunas causas asociadas a este hecho pueden estar relacionadas con el tiempo y la temperatura de curado, o la ausencia de productos como el

metanol, cuando se usan colas del tipo resorcinol formaldehído (ALAMSYAH; YAMADA; TAKI, 2008). De cualquier modo, se requiere una intervención inmediata de la situación para corregirla y asegurar su implementación y control en la factoría.

8.5. Conclusiones

Los laminados de *A. mangium* son susceptibles de elaborar con el adhesivo EPI 1974/1996.

Los resultados en las pruebas de flexión estática dan cuenta de la gran similaridad de resistencia entre la MLC y madera maciza.

Se deben procurar, profundizar, corregir y comprobar las causas de la menor resistencia en las pruebas de cizallamiento en las LC para dar mayor confiabilidad a los tableros.

Según la evidencia de este estudio, no se recomienda el uso de FJ horizontal para MLE en esta especie para elementos sometidos a flexión estática, dada su tendencia al clivaje.

Se recomienda una revisión para los espesores 1.5 y 1.8 cm, los cuales no mostraron diferencias significativas en el módulo de elasticidade para aislar la influencia del tipo de FJ.

Referencias

ALAMSYAH, E. M.; YAMADA, M.; TAKI, K. Bondability of tropical fast-growing tree species III: curing behavior of resorcinol formaldehyde resin adhesive at room temperature and effects of extractives of *Acacia mangium* wood on bonding. **Journal of Wood Science**, v. 54, n. 3, p. 208–213, 2008.

BALIEIRO, F. DE C. et al. Acúmulo de nutrientes na parte aérea, na serapilheira acumulada sobre o solo e decomposição de filódios de *Acacia mangium* Willd. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 1, p. 59–65, mar. 2004.

BATISTA, A. et al. EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE MADERA CON UNIONES DENTADAS. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 4, n. 2, p. 168–178, 2002.

BHAT, I.-H. et al. Effect of weathering on physical, mechanical and morphological properties of chemically modified wood materials. **Materials & Design**, v. 31, n. 9, p. 4363–4368, out. 2010.

CETINKOL, Ö. P. et al. Structural and chemical characterization of hardwood from tree species with applications as bioenergy feedstocks. **PloS one**, v. 7, n. 12, p. e52820, jan. 2012.

GIRALDO, E. J. **La utilización de la madera de *Acacia mangium* en Colombia**. Primer Simposio Caribeño sobre *Acacia mangium*. **Anais...**Boca Chica: 2014

GUTEMBERG, P. et al. Madeira lamelada colada (MLC) com *Acacia mangium* e adesivos estruturais Glued laminated timber (GLULAM) with *Acacia mangium* and structural adhesives. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 43, n. 107, p. 533–540, 2015.

HERAWATI, E.; MASSIJAYA, M. Y.; NUGROHO, N. Performance of Glued-Laminated Beams Made from Small Diameter Fast-Growing Tree Species. **Journal of Biological Sciences**, v. 10, n. 1, p. 37–42, jan. 2010.

JOKERTS, R. W. **Finger-Jointed Wood Products**. [s.l.] USDA, Forest Service. Forest Product Laboratory, 1981.

KOKUTSE, A. D. et al. Proportion and quality of heartwood in Togolese teak (*Tectona grandis* L.f.). **Forest Ecology and Management**, v. 189, n. 1–3, p. 37–48, fev. 2004.

LÓPEZ, F.; POLANCO, C.; BERMÚDEZ, J. Caracterización mecánica estructural para veinte combinaciones de madera laminada encolada. **Revista Colombia Forestal**, v. 16, n. 2, p. 138–157, 2013.

MARIN, C. P. **Evaluation of the resistance in finger joints for glulam**. [s.l.] Universidade de São Paulo, abr. 2006.

MATTHEWS, S. et al. **GISP - Programa Global de Espécies Invasoras**.

MUÑOZ-ACOSTA, F.; MORENO-PEREZ, P. A. Contracciones y propiedades físicas de *Acacia mangium* Willd., *Tectona grandis* L. f. y *Terminalia amazonia* A. Chev , maderas de plantación en Costa Rica. **Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**, v. XIX, n. 2, p. 287–303, ago. 2013.

NIKLAS, K. Mechanical Properties of Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.) Wood. Size- and Age-dependent Variations in Sap- and Heartwood. **Annals of Botany**, v. 79, n. 3, p. 265–272, mar. 1997.

SUZUKI, S. et al. Analysis of expressed sequence tags in developing secondary xylem and shoot of *Acacia mangium*. **Journal of Wood Science**, v. 57, n. 1, p. 40–46, 2011.

TONINI, H.; HALFELD-VIEIRA, B. D. A. Desrama, crescimento e predisposição à podridão-do-lenho em *Acacia mangium*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 7, p. 1077–1082, jul. 2006.

TORRES VÉLEZ, D. A.; DEL VALLE, J. I. Growth and yield modelling of *Acacia mangium* in Colombia. **New Forests**, v. 34, n. 3, p. 293–305, ago. 2007.

9. REPORTE DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA LAMINADA ENCOLADA (MLE) FABRICADA CON LAS ESPECIES *Campnosperma panamense* Standl. Y *Acacia mangium* Willd.

Resumen

Se ensayaron ocho vigas de MLE, seis de *C. panamense* Standl. encolada con adhesivo MUF a razón de 350 g.m⁻² y dos de *A. mangium*, encoladas con adhesivo EPI a razón de 350 g.m⁻². La fábrica para el armado de las vigas se localizaba en la Sabana de Bogotá, en el centro de Colombia. Se acondicionó la madera de Sajo y se armaron un total de siete vigas entre enero y febrero del año 2016. Un año más tarde fueron confeccionadas las vigas de Acacia (08-02-2017). Entre noviembre y diciembre de 2017 las vigas fueron llevadas a un marco de carga con capacidad máxima de 70 t, donde fueron sometidas a flexión estática en cuatro puntos hasta la rotura. Las vigas se estabilizaron lateralmente con cuatro contraventamientos en la zona de compresión, que no impedían el desplazamiento vertical. Después de la rotura el material sobrante fue dimensionado para obtener cuerpos de prueba que se caracterizarían mecánicamente para el reporte de las propiedades mecánicas, siguiendo los lineamientos normativos ISO EN 408 y ISO/FDIS 13910. Este último para la prueba de cizallamiento y tensión perpendicular, obteniendo los siguientes valores de las pruebas.

Para Sajo: $E_{m,medio} = 9474$ MPa; $E_{m,k} = 8871$ MPa; $f_{m,k} = 16,1$ MPa; $f_{t,0,k} = 9,9$ MPa; $f_{t,90,k} = 0,11$ MPa; $f_{c,0,k} = 17,7$ MPa; $f_{c,90,k} = 2,48$ MPa; $f_{v,k} = 1,68$ MPa; $E_{c,0,medio} = 10719$ MPa; $E_{c,0,k} = 8030$ MPa; $E_{c,90,medio} = 535,1$ MPa; $E_{c,90,k} = 119,1$ MPa; $D_{s,a} = 426$ Kg.m⁻³; $D_{s,a,k} = 360$ Kg.m⁻³.

Para Acacia: $E_{m,medio} = 10022$ MPa; $E_{m,k} = 9384$ MPa; $f_{m,k} = 10,9$ MPa; $f_{t,0,k} = 12,7$ MPa; $f_{t,90,k} = 0,0$ MPa; $f_{c,0,k} = 34,1$ MPa; $f_{c,90,k} = 5,9$ MPa; $f_{v,k} = 0,79$ MPa; $E_{c,0,medio} = 13957$ MPa; $E_{c,0,k} = 7479$ MPa; $E_{c,90,medio} = 702,1$ MPa; $E_{c,90,k} = 127,3$ MPa; $D_{s,a} = 633$ Kg.m⁻³; $D_{s,a,k} = 543$ Kg.m⁻³.

Se reportan los valores de resistencia de la MLE con las dos especies, encontrando diferencias significativas ($\alpha < 0,05$) a través del estadístico de Tukey en los valores de $E_{t,0}$; $f_{t,0,k}$; $E_{c,0}$; $f_{c,0,k}$; $f_{c,90,k}$; $f_{t,90,k}$. Entre normativas hubo diferencias para $E_{t,0}$; $f_{c,0,k}$; $f_{t,90,k}$. Entre grados de lamelas se expresaron diferencias para $E_{c,0}$; $f_{c,0,k}$.

La delaminación presentada en la madera de Acacia es imputable a diferentes factores, entre ellos sobresale la temperatura máxima alcanzada en el local, el día asignado para el prensado. A pesar de que en probetas funciona, se recomienda tener cautela en la especificación Acacia + EPI para uso estructural a escala real. Los resultados de las pruebas seguidos con la normativa ISO 13910 estuvieron muy por debajo, si se comparan con la normativa ASTM, se recomienda avanzar en el estudio de su implementación. Los módulos de rigidez aumentaron cuando se pasó de probetas a madera estructural en Sajo. Ocurrió lo contrario en Acacia. También se deben verificar las propiedades de la Acacia haciendo uso de otro adhesivo.

Palabras clave: Pruebas a escala real; Flexión estática; Compresión paralela; Compresión perpendicular; Cizallamiento; Tensión paralela; Tensión perpendicular; MUF; EPI; ISO EN 408; ISO/FDIS 13910

9.1. Introducción

Uno de los grandes retos de los fabricantes madereros es la agregación de valor a sus productos, sin importar el hecho que la madera provenga del bosque natural o de plantaciones (HERAWATI; MASSIJAYA; NUGROHO, 2010). No obstante, a la hora de evaluar las posibilidades del mercado, se encuentran con limitaciones por tamaño de las piezas, niveles de transformación, grados visuales, sobrecostos logísticos, entre otros (CUBBAGE et al., 2010). La articulación vertical en la cadena de suministro resulta difícil para ellos, a menos que se cuenten con grandes volúmenes de transformación que permitan inversiones considerables en maquinaria y colocación en mercados diversos (RAMAGE et al., 2017a, 2017b). Pues bien, la madera laminada encolada (MLE), ofrece posibilidades de agregación de valor, porque normalmente es un producto que correctamente especificado y elaborado, puede ofrecer garantías a los compradores, sean estas empresas de transformación, instalación, ingeniería o consumidores finales (DICKSON et al., 2003; ONG, 2015). Además de las promesas de estabilidad del producto, el sector de la construcción exige el acompañamiento de las propiedades mecánicas y sus niveles de variación, el cumplimiento de esta exigencia, sin duda es el primer paso para viabilizar el consumo de madera en un mercado específico, que, sin vacilación, reporta mayores retribuciones económicas, si se le compara con los usos tradicionales, en especial si se trata de las maderas de *Campnosperma panamense* Standl. y *Acacia mangium* Willd. (POLANCO, 2002).

Las propiedades mecánicas, no solo ayudan en las labores de diseño estructural, también surten información importante para la selección de materiales y sus diferentes presentaciones, permitiendo una validación si está dentro de los límites financieros (RESTREPO OROZCO, 2010) Es más, las propiedades mecánicas, son una herramienta fundamental en las últimas etapas de especificación, donde un adecuado balance entre el peso y la resistencia puede jugar a favor de la madera.

Ahora bien, las propiedades mecánicas no son el único criterio para la toma de decisiones, la vida útil, la facilidad y estabilidad de las conexiones, la presencia de entes

certificadores, la certidumbre frente a temas como fuego, la resistencia ante agentes de deterioro biológico, la facilidad en el mantenimiento, la posibilidad de acabados superficiales, pesan de la misma manera o más para muchos compradores. Pero, la clasificación por resistencia es una exigencia no negociable, es decir un atributo del producto (BREYER, D. E. ; FRIDLEY, K. J. ; POLLOCK, D. G. COBEEN, 2003).

9.2. Objetivo

Este capítulo tiene como objetivo general caracterizar mecánicamente la madera laminada encolada de las especies *Campnosperma panamense* Standl. y *Acacia mangium* Willd. procedente de Colombia, haciendo uso de las normativas ISO EN 408 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004) e ISO/FDIS 13910 (INTERNATIONAL ORGANIZATIONS FOR STANDARDIZATION, 2013), esta última en la determinación de los módulos de rigidez y esfuerzos.

9.3. Revision de Literatura

9.3.1. Clasificación por resistencia de la madera

Las diferentes normativas establecen tipos de clasificación de la madera maciza y/o laminada, en el caso de la normativa colombiana solo se establecen valores de resistencia para madera maciza (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA, 2010), igual sucede con la norma brasilera vigente (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996), aunque este país ha avanzado en una propuesta normativa que involucra este material (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017a). Se presentan los valores de resistencia para MLE de acuerdo al Eurocódigo 5, la normativa NCh 1198, y muy parcialmente el suplemento del NDS 2018, las cuales son mostradas en la Tabla 9.1, Tabla 9.2, y Tabla 9.4, respectivamente (AMERICAN WOOD COUNCIL, 2017; EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004; INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 2006). La norma brasilera tiene algunos valores de resistencia para dicotiledóneas que son dados a conocer en la Tabla 9.4. Esta última norma establece que las

propiedades de la MLE deben determinarse a partir de cuerpos de prueba retirados del mismo laminado estructural y se acepta que las propiedades de esas láminas corresponden a las propiedades de la MLE estructural. Otro punto interesante, es que la responsabilidad de las propiedades del laminado son atribuidas al productor a la luz de los controles de calidad que este implemente durante el proceso de fabricación (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996).

Tabla 9.1 – Valores de resistencia y densidad para las diferentes clasificaciones de madera laminada encolada combinada UNE EN 1194.

Clase de Resistencia de Madera Laminada	Símbolo	GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
Resistencia a Flexión	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
Resistencia a Tracción paralela a la fibra	$f_{t,0,g,k}$	14	16,5	19,5	22,5
Resistencia a Tracción perpendicular a la fibra	$f_{t,90,g,k}$	0,35	0,4	0,45	0,5
Resistencia a Compresión paralela a la fibra	$f_{c,0,g,k}$	21	24	26,5	29
Resistencia a Compresión perpendicular a la fibra	$f_{c,90,g,k}$	2,4	2,7	3	3,3
Resistencia a Cortante	$f_{v,g,k}$	2,2	2,7	3,2	3,8
Módulo de Elasticidad paralelo a la fibra medio	$f_{0,g,medio}$	11.600	12.600	13.700	14.700
Módulo de Elasticidad paralelo a la fibra característico	$f_{0,g,k}$	9.400	10.200	11.100	11.900
Módulo de Elasticidad perpendicular a la fibra medio	$f_{90,g,medio}$	320	390	420	460
Módulo de Cortante	$G_{g,medio}$	590	720	780	850
Densidad (Kg.m ⁻³)	$\rho_{g,k}$	350	380	410	430

Tabla 9.2 – Tensiones básicas para madera laminada encolada fabricados con dos calidades de madera aserrada de *Pinus radiata* chileno (INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 2006)

Flexión Respecto Eje X-X					
Laminación Horizontal: Carga normal a las caras de las láminas					
Grado	Flexión $F_{f,b,i}$ (MPa)	Cizalle (MPa)	Tracción Normal (MPa)	Compresión Normal (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)
Nota 1	2	3	4	5	6
A	19	1,3	0,43	2,8	11.000
B	19	1,3	0,43	2,8	9.000

Notas: 1. Grado de la madera aserrada clasificada según la norma NCh 2150. 2. Valores deducidos de vigas de 300 mm de altura. Los valores calculados por la norma ASTM 198 darán valores característicos del percentil 5% de exclusión, equivalentes a 2.1 veces el reporte tabulado. 3. Basada en el percentil 5% de exclusión (dividido por el factor 4,1) de la muestra formada por las resistencias de probetas normalizadas libres de defectos. 4. Equivale a 1/3 del valor de tensión básica de cizalle. 5. Determinado por el promedio de carga en el límite proporcional (dividido 1.5 veces) de la muestra formada por las resistencias de probetas normalizadas libres de defectos. 6. Determinado del ensayo de vigas laminadas horizontalmente con 300 mm de altura.

Tabla 9.3 – Valores de Diseño para MLE estructural de Coníferas según el NDS (AMERICAN WOOD COUNCIL, 2017)

	Bending About X-X Axis Loaded Perpendicular to Wide Faces of Laminations							Bending About Y-Y Axis Loaded Parallel to Wide Faces of Laminations						Axially Loaded		Fasteners
	Extreme Fiber In Bending		Compression Perpendicular to Grain	Shear Parallel to Grain	Modulus of Elasticity			Extreme Fiber In Bending	Compression Perpendicular to Grain	Shear Parallel to Grain	Modulus of Elasticity			Tension Parallel to Grain	Compression Paralell to Grain	Specific Gravity For Fastener Design
	Bottom of Beam Stressed In Tension (Positive Bending)	Top of Beam Stressed In Tension (Negative Bending)			For Deflection Calculations	For Stability Calculations	For Deflection Calculations ⁽¹¹⁾				For Stability Calculations					
Stress Class	F _{bx} * (psi)	F _{bx} ⁽¹⁾ (psi)	F _{clx} (psi)	F _{vx} ⁽⁴⁾ (psi)	E _{x true} (10 ⁶ psi)	E _{x app} (10 ⁶ psi)	E _{x min} (10 ⁶ psi)	F _{by} (psi)	F _{cl,y} (psi)	F _{Vy} ⁽⁴⁾⁽³⁾ (psi)	E _{y true} (10 ⁶ psi)	E _{y app} (10 ⁶ psi)	E _{y min} (10 ⁶ psi)	F _t (psi)	F _c (psi)	G
16F-1.3E	1600	925	315	195	1.4	1.3	0.69	800	315	170	1.2	1.1	0.58	675	925	0.41
20F-1.5E	2000	1100	425	195 ⁽⁶⁾	1.6	1.5	0.79	800	315	170	1.3	1.2	0.63	725	925	0.41
24F-1.7E	2400	1450	500	210 ⁽⁶⁾	1.8	1.7	0.90	1050	315	185	1.4	1.3	0.69	775	1000	0.42
24F-1.8E	2400	1450 ⁽²⁾	650	265 ⁽³⁾	1.9	1.8	0.95	1450	560	230 ⁽³⁾	1.7	1.6	0.85	1100	1600	0.50 ⁽¹⁰⁾
26F-1.9E ⁽⁷⁾	2600	1950	650	265 ⁽³⁾	2.0	1.9	1.00	1600	560	230 ⁽³⁾	1.7	1.6	0.85	1150	1600	0.50 ⁽¹⁰⁾
28F-2.1E SP ⁽⁷⁾	2800	2300	805	300	2.2 ⁽⁹⁾	2.1 ⁽⁹⁾	1.09 ⁽⁹⁾	1600	650	260	1.8	1.7	0.90	1250	175	0.55
30F-2.1E SP ⁽⁷⁾⁽⁸⁾	3000	2400	805	300	2.2 ⁽⁹⁾	2.1 ⁽⁹⁾	1.09 ⁽⁹⁾	1750	650	260	1.8	1.7	0.90	1250	1750	0.55

Tabla 9.4 – Clases de resistencia para las maderas dicotiledóneas según la NBR 7190

Clase	Flexión F_{c0k} (MPa)	Cizalle F_{vk} (MPa)	Módulo de Elasticidad $E_{c0,m}$ (MPa)	$\rho_{bas,m}$ (Kg.m ⁻³)	$\rho_{aparente}$ (Kg.m ⁻³)
C20	20	4	9.500	500	650
C30	30	5	14.500	650	800
C40	40	6	19.500	750	950
C60	60	8	24.500	800	1000

9.3.2. Cálculo del momento de inercia

A continuación, se da a conocer la demostración del momento de inercia (I) en elementos isotrópicos con secciones rectangulares o cuadradas (SINGER, 1971). La Figura 9.1, muestra una geometría rectangular con base (b) y altura (h) conocidas, donde el centro de gravedad (*c. d. g.*) corresponde al centroide de la figura. Al tomar una sección infinitesimal d_A con base b y altura d_y e integrando para los límites máximos a lado y lado de h , es posible demostrar que $I_{x_0} = \frac{bh^3}{12}$, como se presenta a continuación.

Figura 9.1 - Detalle de una sección transversal con centro de gravedad en el centro geométrico de la pieza.

$$I = \int_A y^2 dA \quad \text{Ecuación 9.1}$$

$$I_{x_0} = \int y^2 dA = \int_{-h/2}^{h/2} y^2 b dy = b \left[\frac{y^3}{3} \right]_{-h/2}^{h/2} = \frac{bh^3}{12} \quad \text{Ecuación 9.2}$$

$$I_x = \int (y + d)^2 dA = \int y^2 dA + 2d \int y dA + d^2 \int dA = I_{x_0} + Ad^2 = \frac{bh^3}{12} + (bh) \left(\frac{h}{2} \right)^2 = \frac{bh^3}{3}$$

Ecuación 9.3

En el desarrollo de la expresión el primer término hace referencia a I_{x_0} , el último a un desplazamiento en un plano paralelo del punto y el término central es igual a cero debido a que: “ $\int y dA$, es el momento estático del área respecto de X_0 , que es igual a Ay , siendo y , la distancia del centro de gravedad al eje de referencia, que es nula por pasar X_0 , la cual es equivalente al centro de gravedad”. Esto es lo que se conoce como el teorema de Steiner (BOTELLO, [s.d.]; SINGER, 1971).

9.3.3. Cálculo de la sección transversal transformada

Debido a que muchas veces los materiales usados en ingeniería carecen de homogeneidad en su composición o se pretende hacer un uso mixto de ellos, es necesario ajustar sus características a partir de la delimitación de cada uno en la sección transversal; esto con el fin de reportar en un solo dato sus propiedades de conjunto. Tal situación, se logra aplicando el concepto de la sección transversal transformada. Supóngase que se tiene una viga laminada encolada, conformada por tres grados de madera, dispuestos de manera simétrica según la Figura 9.2, en su lado izquierdo (A). Los grados de la madera tienen unas propiedades que deberían ir disminuyendo lógicamente, desde la parte externa (superior e inferior) hacia la parte central, en lo posible simétricamente. Como la geometría de la pieza es homogénea, la reducción consecutiva de cada grado se traduce en una reducción de su sección transversal a través de su base b ó su altura h . Para comodidad, si se afecta b , la sección transformada se comportaría como la sección mostrada en el lado derecho (B) de la Figura 9.2.

El siguiente procedimiento matemático, revela la forma en que se pondera cada grado presente hasta lograr la expresión matemática que permite conocer el factor de afectación en

la sección transformada. Como ejemplo se empleó la letra E , que representa el módulo de elasticidad de cada grado.

Momento de Inercia de la sección transversal original:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad \text{Ecuación 9.4}$$

Momento de Inercia de la sección transversal transformada:

$$I_t = \frac{bh^3}{12} - \frac{h_1^3(b-b_B)}{12} - \frac{h_C^3(b_B-b_C)}{12} \quad \text{Ecuación 9.5}$$

$$h_1 = h_C + 2h_B$$

Factor de la sección transversal transformada (T)

$$T = \frac{I_t}{I} = \frac{E_A h^3 - h_1^3(E_A - E_B) - h_C^3(E_B - E_C)}{E_A h^3} \quad \text{Ecuación 9.6}$$

Hasta aquí, en todos los casos:

$$E_A > E_B > E_C; \quad b_C = \frac{E_C}{E_A} b; \quad b_B = \frac{E_B}{E_A} b; \quad b_A = \frac{E_A}{E_A} b = b \quad \text{Ecuación 9.7}$$

Figura 9.2 - Detalle de la equivalencia de la sección transversal en una pieza con tres grados de material. Sección original (A), representación de su sección transformada (B).

Hay otras situaciones de por sí fortuitas, y no por ello lógicas, que dan origen a diferentes posiciones de los grados de material en la sección transversal. En esos casos se debe aplicar la propuesta de la Tabla 9.5, calculada por el autor.

Tabla 9.5 – Diferentes casos de localización de grados en la sección transversal y sus respectivas ecuaciones de corrección para el momento de Inercia I . El ancho de la pieza construida se representa con el tono oscuro, el ancho de la pieza blanca refleja la reducción de resistencia dado el módulo de elasticidad de cada lamela (E). Aplican las convenciones de la Figura 9.2.

Factor de Corrección del momento de Inercia ($T =$)	$\frac{E_A h^3 - h_1^3 (E_A - E_C) - 2 h_B^3 (E_C - E_B)}{E_A h^3}$	$\frac{E_B h^3 - h_C^3 (E_B - E_C) - 2 h_A^3 (E_B - E_A)}{E_B h^3}$
Acomodación de Grados A, B y C en la Sección Transversal de una Viga
	$E_A > E_C > E_B$	$E_B > E_C > E_A$
Factor de Corrección del momento de inercia ($T =$)	$\frac{E_C h^3 - 2 (h_B + h_A)^3 (E_C - E_A) - 2 h_B^3 (E_A - E_B)}{E_C h^3}$	$\frac{E_C h^3 - 2 (h_B + h_A)^3 (E_C - E_B) - h_A^3 (E_B - E_A)}{E_C h^3}$
Acomodación de Grados A, B y C en la Sección Transversal de una Viga
	$E_C > E_A > E_B$	$E_C > E_B > E_A$

9.4. Materiales y Métodos

9.4.1. Obtención de la madera para las pruebas mecánicas

La fuente de la madera, al igual que la logística de suministro y los procesos de transformación específicos, pueden consultarse de manera detallada en el capítulo especializado del presente documento (capítulo 4), que profundiza no solo en las especificaciones de la materia prima, sino que avanza en la documentación de los indicadores de calidad necesarios en cada etapa del proceso productivo para la obtención de la MLE de las dos especies citadas, conforme las normativas internacionales referentes a la calidad (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, 1995a, 1995b, 1995c; INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 2010).

En total fueron fabricadas 14 vigas laminadas encoladas con disposición horizontal de lamelas. Las siete vigas con madera de *C. panamense* Standl. se componían de 13 lamelas y las vigas con madera de *A. mangium* Willd., de 27 lamelas. Hubo una gradación en el tipo de lamelas, el tipo extremo (Ex) componía el 32% de cada viga, el tipo intermedio (Int) componía otro 32% y las lamelas tipo centro (Ce), el restante 36%. La disposición de las lamelas se visualiza en la Figura 9.3. Las vigas fueron sometidas previamente a 12 tratamientos de carga (Tres puntos de aplicación de la fuerza X cuatro tipos de contraventamiento o arriostamiento) sin superar el límite elástico en todos los casos. Después de esto, seis vigas de Sajo y dos de Acacia fueron llevadas a condiciones extremas de rotura y con el material resultante, se obtuvieron piezas por medio de una sierra circular, con las que se determinaron las propiedades mecánicas reportadas en el presente capítulo. A propósito, algunas normativas recomiendan que las probetas de caracterización mecánica, deben ser extraídas de material con tamaño estructural, como corresponde en este estudio (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017b). La Figura 9.4 ejemplifica el procedimiento de obtención de probetas para cada prueba, junto con las dimensiones. Para la prueba de flexión estática, se tomó la pieza original (de mayor tamaño) y una vez rota, las demás probetas. Tanto la prueba de flexión como los procedimientos que usaron las probetas cinco a nueve, hacen referencia a las propiedades mecánicas de este capítulo. Los tipos de probetas uno a cuatro, se usaron para caracterizar el proceso de fabricación y los resultados se muestran en el capítulo respectivo (capítulo 4).

Figura 9.4 - Disposición Muestreo del material en cada viga laminada colada (VLC=MLE). Los espacios en color obedecen a cuerpos de prueba a ser retirados para las pruebas de calidad y resistencia. El área clara central corresponde a la posible influencia de grietas y rajaduras durante la rotura.

9.5.1. Prueba de flexión estática vigas, apoyados en los extremos y dos cargas centralizadas

Las condiciones del ensayo se ilustran en la Figura 9.5. Las piezas de MLE se dimensionaron en $750\text{ (780)} \times 50 \times 5\text{ cm}^3$. Los detalles del montaje implicaron una luz a cada extremo equivalente a $5h$, para un total de $10h$, en el centro se mantuvo la relación $5h$, para un vano total de $15h$. En los extremos libres se dejaron entre $0,1$ y $0,5h$. Los accesorios para las pruebas respetaron los lineamientos de la norma en lo referente a los tipos de apoyo, no se usó la carátula de deflexión en el eje neutro. En lugar de ello, dos láseres fueron dispuestos en cada punto de este eje para acceder a las deformaciones del eje neutro. Fue empleado un actuador articulado en dos puntos para acompañar el desplazamiento a lo largo de la viga y en la dirección perpendicular al plano principal. También fueron usadas restricciones laterales en los extremos de las vigas y cuatro a lo largo del vano, de forma equidistante con una separación de 150 cm entre ellas, para contrarrestar el desplazamiento lateral. Otros detalles se ven en las fotografías del ensayo (Ver Figura 9.6 y Figura 9.7).

Figura 9.5 - Descripción de la forma de apoyo y las dimensiones en la prueba de flexión estática para la MLE. Fuente: (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004)

Siguiendo la normativa, el equipo de aplicación de la carga midió con una precisión menor o igual al 1% respecto la carga máxima aplicada (4 a 5 t), y los intervalos de las deformaciones registradas fueron inferiores a 2 mm con errores menores al 1%. Para esta prueba se dispuso de un pórtico metálico con dos actuadores con capacidad de 372 kN (37 t aprox.) y una precisión de 32 Kg. La adquisición de los datos de carga no provino de los actuadores sino de celdas de carga de 5 t del siguiente tipo: i) Futek 5 t LSB400 (ADVANCED

SENSOR TECHNOLOGY INC., 2018), ii) TEDEA 620 5 t (VISHAY PRECISION GROUP, 2012). Para el caso de los desplazamientos verticales y laterales se dispuso de nueve LVDT's (*Linear variable differential transformer*), de tipo inductivo con precisión 0,02% (PEI, 2005) y posibilidad de registro hasta 2000 datos.s⁻¹, aunque en este caso se registraron solo 20 datos.s⁻¹. Los instrumentos usados para este caso fueron: i) Waycon Lrw-M-300-S y Lrw-M-150-S, ii) Waycon Lzw1-A-50, iii) Novotechnik TR-50 y TR-100. También se usaron tres láseres para medir el desplazamiento en el canto inferior de la viga y en los ejes neutros en la dirección de los dos actuadores. El montaje real y la ubicación de los instrumentos puede ser visto en la Figura 9.6. El sistema de adquisición de datos consistió en un Chasis de la serie C NI cDAQ-9178 y un Módulo de Entradas Analógicas del tipo C NI 9205.

Una descripción general de los equipos usados en la instrumentación para las pruebas de flexión, tanto en rotura como en la determinación de las formas de pandeo, es mostrada a continuación:

i) Futek LSB 400 – Es una celda de carga tipo S usada para la medición de cargas en esfuerzos de tensión y compresión hasta 10.000 lb. Los rangos de salida en desempeño para no lineabilidad, histéresis, y no repetibilidad corresponden al $\pm 0,05\%$. El rango eléctrico de salida es de 2mV/V, el puente de resistencia es de 350 Ohm, la conexión se realiza con cable de seis hilos, #28 AWG en poliuretano. El peso aproximado es de 53 oz, la seguridad de sobrecarga es del 150%, el material corresponde a 17-4 PH stainless-steel. El rango de temperatura para operación es -50 a 93 °C.

ii) Tedeo 620 – Esta celda está diseñada para medir cargas en el rango 500-5.000 kg. Se usa tanto en cargas de tensión como de compresión. Los rangos de salida en desempeño para no lineabilidad, histéresis, y no repetibilidad corresponden al $\pm 0,02\%$. El rango eléctrico de salida es de $2 \pm 0,10\%$ mV/V, la impedancia de entrada es de 400 ± 320 Ohms, la conexión se realiza con cable de seis hilos, #28 AWG en poliuretano. El peso aproximado es de 1,9 kg, la seguridad de sobrecarga es del 150%, el material corresponde a stainless-steel, sus dimensiones externas son 120x100x45 mm. El rango de temperatura para operación es -30 a 80 °C.

Figura 9.6 - Descripción del montaje para la prueba de flexión estática en cuatro puntos, con limitación del pandeo lateral usando cuatro contraventamientos, CIMOC, Universidad de los Andes, Bogotá D.C, Colombia. **Covenciones:** 1,2: Actuadores 35 t, 3: Futek de 5t, 4: Tedeo 5t, 5,6,7,8: Contraventamientos Laterales con rodillos, 9,10: LVDT's Extremos superiores, 11,12: LVDT's Laterales izquierda y derecha, 13,14: Láseres desplazamiento vertical eje neutro, 15: Láser desplazamiento vertical canto central, 16,17: LVDT's Inferiores izquierda y derecha, 18: LVDT Lateral central superior, 19: LVDT Lateral central inferior, 20: MLE de 7500 x 500 x 50 mm³ y 21: Marco de Carga.

iii) Waycon LRW-M-300-S y LRW-M-150-S – Esta serie de LVDT fue construida para medir en el rango 50 a 900 mm. Son equipos de tipo rectangular para facilitar la sujeción. El desplazamiento puede llevarse hasta 10 m/s sin problemas de medición, aunque en la versión IP67 el límite es 3 m/s. La fuerza para desplazamiento debe ser menor o igual a 25 N. La lineabilidad límite es de 0,05%. La repetibilidad es de 0,01 mm, la tolerancia en resistencia es $\pm 20\%$, el máximo voltaje aplicable es 60 V. El rango de temperatura para su uso es -30 hasta 100 °C, aunque en condiciones de almacenamiento el rango es -50 hasta 120 °C. El ciclo de vida es mayor que 25×10^6 m o mayor a 100×10^6 operaciones. Cumple la normativa EN60079-11. El material de construcción es aluminio anodizado y Nylon 66 G 25.

iv) Waycon LZW1-A-50 – Esta LVDT es redonda, por lo que para su sujeción precisó la elaboración de una caja en impresora 3D para su sujeción. Son equipos de medición con 12,9 mm de diámetro y hechos para ser usados en el rango 25 a 250 mm. Vienen dotados con puntas redondeadas y rodillos para mejor desempeño durante su uso. El desplazamiento debe ser menor a 10 m/s, la lineabilidad superior es $\pm 0,1\%$. La temperatura de trabajo está en el rango -30 a 100 °C. El ciclo de vida es mayor que 25×10^6 m o mayor a 100×10^6 operaciones. Cumple la normativa EN60079-11. El material de construcción es aluminio anodizado y Nylon 66 G 25 y su peso es de 80 g.

v) Novotechnik TR-50 y TR-100 – LVDT's de tipo cuadrado con rango de medición entre 10 y 100 mm. El desplazamiento puede llevarse hasta 10 m/s sin problemas de medición. La fuerza para desplazamiento debe ser menor o igual a 2,5 N en la posición extendida y menor a igual a 5 N en la posición extendida, en el momento de la finalización del ensayo la fuerza máxima admisible en el equió es de 5 N. La lineabilidad límite es de 0,15% y 0,075% para las versiones de 50 y 100 mm, respectivamente. La repetibilidad es de 0,002 mm, la tolerancia en resistencia es $\pm 20\%$, el máximo voltaje aplicable es 42 V. El rango de temperatura para su uso es -30 hasta 100 °C. El ciclo de vida es mayor a 100×10^6 operaciones. Cumple la normativa EN60529. El material de construcción es aluminio anodizado y Nylon 66 G 25. Para la versión de 50 mm, el peso es de 150 g y para la versión de 100 mm es de 200 g. El máximo torque permitido para montaje es de 140Ncm.

vi) Láser Análogo para desplazamiento LAM Series – Estos equipos logran mediciones en el rango 0,5 a 200 mm, con una resolución en la medición de 0,2 μm , la lineabilidad hasta $\pm 20 \mu\text{m}$, ideal para mediciones de frecuencia hasta 100 kHz. La temperatura

de trabajo va de 0 a 50 °C. Precisa una interfaz tipo Ethernet TCP/IP. La salida análoga corresponde a ± 10 V y entre 4 y 20 mA. La impedancia a la salida es de 0 ohm aproximadamente (10 mA máximo). El drift de temperatura es 0,02 %/°K. La intensidad lumínica ideal es de 0-10 Lux, con riesgo de subexposición cuando es menor a 3 y riesgo de sobreexposición cuando es mayor a 8. La fuente de luz es un diodo láser rojo con longitud de onda de 650 a 670 nm. El láser es clase 2,00.

vii) Láser Micro-Epsilon optoNCDT 1402 de 600 mm – El rango de medición es de 200 a 800 mm. La lineabilidad está en el rango 120 a 3000 μm (menor o igual a 0,5% FSO). La resolución media para 64 valores es de 80 μm , la resolución dinámica va de 80 a 600 μm . La resolución digital es de 64 bits. Fuente de luz es un semiconductor láser de 1 mW, 670 nm (rojo). El láser pertenece a la clase 2 (II) según la normativa IEC 60825-1 de 2007. La protección es IP67, la vibración llega a 115 g/10 Hz-1kHz. Peso 130 g, aproximadamente. El rango de temperatura para operación es del orden de 0 a 50 °, mientras que para almacenamiento es -20 a 70 °C. Medición de los valores de salida análoga 4 a 20 mA 12 bit o RS422 en el caso de la salida digital. El controlador es un Procesador de Señal Integrado.

viii) Chasis de la serie C NI cDAQ-9178 – Entrada análoga: Tamaño de la entrada FIFO equivalente a 127 muestras por slot. Rango máximo de muestras determinado por el módulo de la serie I/O. Precisión para tiempo del orden de 50 ppm del rango de la muestra. Resolución para tiempo de 12,5 ns. Salida análoga: Hasta 16 canales. Características de la forma de onda digital: Adquisición de 127 muestras por slot, generación de 2,047 muestras en los slots 1 a 4 y 1,023 muestras en los slots 5 a 8.

ix) Módulo de Entradas Analógicas del tipo C NI 9205 – Es compatible con el sistema CompactDAQ o CompactRIO. Cada canal es programable con rangos de entrada de ± 200 mV, ± 1 V y ± 10 V. Para protección de transientes este módulo incluye ± 30 V de protección contra sobrevoltajes entre los canales de entrada y comunes (COM). Además, este módulo también incluye una barrera de doble aislamiento de canal a tierra para seguridad, inmunidad al ruido y sobre voltaje. El NI 9205 está clasificado para 1,000 Vrms de protección contra sobretensiones transitorias.

Detalles técnicos adicionales de estos equipamientos pueden ser consultados en las páginas de las casas matrices de fabricación. A continuación detalles del procedimiento.

La fricción entre las vigas y los contraventamientos se limitó usando rodillos que permitían el desplazamiento vertical, a la vez que restringían el movimiento lateral (elementos 5, 6, 7 y 8 de la Figura 9.6). Además, el sistema de doble articulación cruzada, presente en los actuadores, permitió adaptaciones a los leves movimientos laterales provocados en las vigas y a la curvatura del canto superior en la dirección principal. Dos articulaciones hacían parte integral del actuador generador de la carga y una, la inferior, fue fabricada (Ver Figura 9.7).

La carga se aplicó de manera constante a una velocidad de $0,002h \text{ mm.s}^{-1}$, como lo estipula la normativa, hasta alcanzar 600 s, en ese momento se retiraron la mayoría de los instrumentos para evitar su daño físico y se continuó el ensayo hasta el punto de rotura.

Figura 9.7 - Detalle del tipo de articulaciones provistas en los actuadores usados en la prueba de flexión estática: La rótula superior permite el desplazamiento lateral, ortogonal al plano de la viga (A). El accesorio de la parte inferior permite la adaptación a la curvatura de la viga durante la aplicación de cargas (B).

9.5.2. Módulo de elasticidad local

Este módulo mide la deformación en el eje neutro de la viga durante la acción de la carga. La Ecuación 9.8, determina su forma de cálculo.

$$E_{m,l} = \frac{a l_1^2 (F_2 - F_1)}{16 I (w_2 - w_1)}$$

Ecuación 9.8

9.5.3. Módulo de elasticidad global

La deformación medida en el canto inferior de la viga en el régimen elástico determina este módulo con la ayuda de la Ecuación 9.9.

$$E_{m,g} = \frac{l^3 (F_2 - F_1)}{bh^3 (w_2 - w_1)} \left[\left(\frac{3a}{4l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right] \quad \text{Ecuación 9.9}$$

9.5.4. Módulo de corte (G)

Para la determinación de las deformaciones por esfuerzo cortante, se hizo necesario del módulo de corte. Importante en la estimación de los límites de pandeo para cada especie y grado de calidad de madera. Para su cálculo se precisa conocer primero el módulo de elasticidad aparente.

Determinación del Módulo de Elasticidad Aparente

$$E_{m.app} = \frac{l_1^3 (F_2 - F_1)}{48 I (w_2 - w_1)} \quad \text{Ecuación 9.10}$$

Determinación del Módulo de Corte

$$G = \frac{k_G h^2}{l_1^2 \left[\frac{1}{E_{m.app}} - \frac{1}{E_{m,l}} \right]} \quad \text{Ecuación 9.11}$$

Donde:

a : Distancia del apoyo extremo al punto de carga más cercano, $6h \pm 1,5h$. l_1 : Distancia entre los puntos de medición de los láseres del eje neutro, $5h$. F_1 : Carga al 0,1 de F_{max} . F_2 : Carga al 0,4 de F_{max} . w_1 : Deformación correspondiente F_1 . w_2 : Deformación correspondiente F_2 . I : Momento de Inercia afectado por $RR_{f,i}$. l : Distancia entre apoyos, vano de la viga. b : Base de la viga. h^3 : Altura de la viga elevado a la tercera potencia $K_G = 1,2$ para secciones rectangulares y/o cuadradas.

Para el cálculo de los módulos de elasticidad local y aparente, fue necesario calcular el factor de afectación del momento de la inercia de la sección dada la posición de las lamelas (T) y la razón de resistencia de cada grado de material ($RR_{f,i}$). Para ello, se acudió a las formulaciones presentadas en el marco teórico, específicamente en la Tabla 9.5.

Los diferentes módulos de elasticidad y cortante se analizaron con estadística descriptiva al interior de cada uno de ellos y en conjunto. En este último caso, se implementó

un análisis multivariado para dos factores (dos especies y dos tipos de clasificación), cada uno con tres unidades experimentales. Asumiendo que las medias de cada tratamiento seguían una distribución de *t-student*, se discriminaron con la prueba de Tukey, con una significancia del 5%, previo análisis de normalidad y homocedasticidad.

9.5.5. El Esfuerzo en flexión

Todos los esfuerzos del ensayo de flexión fueron obtenidos del procedimiento que dio a conocer los diferentes módulos de elasticidad y cortante. Seis vigas de *C. panamense* y dos de *A. mangium* fueron llevadas a punto de rotura, en un sistema que aplicó cargas a uno y dos tercios del vano, con contraventamientos, trabas o riostras a cada quinto del vano. Como el punto de rotura fue instantáneo y violento, no hubo oportunidad de tomar información referente a agrietamientos sucesivos, como se había previsto inicialmente en la propuesta de la cualificación.

9.5.5.1. Esfuerzo máximo

Esta prueba se realizó al final de la etapa de experimentación, se reportaron los datos de aquellas vigas llevadas a la carga máxima de rotura con cuatro contraventamientos laterales. La madera de determinar este esfuerzo se da a conocer en la Ecuación 9.12.

$$f_{max} = \frac{aF_{max.}}{2W} \quad \text{Ecuación 9.12}$$

9.5.5.2. Esfuerzo en el límite proporcional

$$f_m = \frac{aF_{prop.}}{2W} \quad \text{Ecuación 9.13}$$

Donde:

$f_{prop.}$: Esfuerzo en el límite proporcional; f_{max} : Esfuerzo de rotura de la pieza;
 a : Distancia del apoyo extremo al punto de carga más cercano, $6h \pm 1,5h$;
 W : Módulo de resistencia.

Para cuando la madera llegó a rotura final, se tomaron fotografías en cada una de las vigas, con el fin de realizar un análisis cualitativo y cuantitativo de las grietas formadas en el tercio central y con menor rigurosidad en toda la longitud. En el modelo propuesto para análisis, los factores correspondieron a especies y tipos de clasificación, además las características de las grietas.

9.5.6. Análisis de fallas

Todos los ensayos para llegar al punto de rotura fueron grabados y fotografiados en extenso. Con la ayuda de este material se analizó cada uno de los casos por especie y tipo de clasificación. Evidenciando los elementos críticos desde la constitución anatómica en combinación con la aplicación de la carga. Se dan a conocer las imágenes que ponen de manifiesto el relacionamiento entre las anomalías presentes, el proceso constructivo de la MLE y detalles del ensayo como la falla máxima en presencia de pandeo lateral.

9.6. Prueba de tensión paralela

Para esta prueba se usaron seis cuerpos de prueba por viga laminada, para un total de 72 unidades, extraídas conforme indica la Figura 9.4. Estas piezas otorgaron conjuntamente el módulo de elasticidad y la resistencia máxima para el esfuerzo en mención. Detalles del montaje pueden verse en la Figura 9.8.

Esta prueba se realizó en las instalaciones del CIMOC de la Universidad de los Andes en Bogotá, D.C., Colombia. La máquina usada para la prueba fue la MTS (Material Tests System) con capacidad hasta 100 t. Las piezas de madera fueron extraídas de las vigas previamente sometidas al punto de rotura para la prueba de flexión estática en cuatro puntos. El sitio de procesamiento de la madera fue la carpintería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en la ciudad de Bogotá, D.C. Para este caso específico se usó toda la sección transversal del laminado con una esbeltez mínima de 9:1. Como los cuerpos de prueba poseían una sección transversal de $5 \times 2 \text{ cm}^2$, entonces la dimensión a usar correspondió a $55 \times 5 \times 2 \text{ cm}^3$. Se estimó una longitud para sujeción de la mordaza de 5 cm en cada extremo, quedando un vano libre ℓ de 45 cm, como se aprecia en la Figura 9.8. La presión de las mordazas se reguló

para cada tipo de madera, siendo mayor en el caso de la *A. mangium*. Algunas veces fue necesario agregar o retirar presión al interior de la misma especie, en función de su desempeño en la prueba. Todo el material fue fotografiado antes, durante y después del ensayo, para posteriores análisis de falla (ver capítulo 4).

La carga se aplicó por debajo del límite elástico a una razón menor que $0,00005 \ell \text{ mm.s}^{-1}$. Los equipos de carga y medición reportaron un error menor al 1%. La medición de las deformaciones se realizó con dos equipos en paralelo para minimizar la distorsión de los datos. En este caso, los extensómetros, MTS, que después de instalados midieron automáticamente los desplazamientos y transmitieron en tiempo real la información a la base de datos (Figura 9.9)

Figura 9.8 - Forma y dimensiones del cuerpo de prueba usado en tensión paralela para Sajo (A) y acacia (B). Para medir las deformaciones se usaron un par de extensómetros MTS con 100 mm de separación entre puntas

Figura 9.9 - Sistema de adquisición de datos del MTS: vista general (A) y detalle del tablero de mando (B)

9.6.1. Módulo de elasticidad en tensión paralela al grano

Para el reporte del módulo de elasticidad se aplicó la siguiente ecuación:

$$E_{t,0} = \frac{l_1 (F_2 - F_1)}{A (w_2 - w_1)} \quad \text{Ecuación 9.14}$$

9.6.2. Esfuerzo en tensión paralela al grano

Esta prueba ameritó la ausencia de flexión en los cuerpos de prueba. La duración de la prueba fue de al menos 300 s (± 120 s). La forma de falla quedó registrada y su análisis total se dará a conocer en otro trabajo, fuera del alcance de esta tesis. Este capítulo hace referencia a algunas formas de falla en la sección final. La expresión para el cálculo de este esfuerzo se da a conocer en la Ecuación 9.15.

$$F_{t,0} = \frac{F_{max}}{A} \quad \text{Ecuación 9.15}$$

Donde:

l_1 : Distancia entre los puntos de anclaje de los relojes comparadores; F_1 : Carga al 0,1 de F_{max} . F_2 : Carga al 0,4 de F_{max} ; w_1 : Deformación correspondiente en F_1 , resultado de la lectura promedio de dos deformímetros localizados a lado y lado del cuerpo de prueba; w_2 : Deformación correspondiente en F_2 , resultado de la lectura promedio de dos extensómetros localizados a lado y lado del cuerpo de prueba; A : Área de la sección transversal.

9.7. Prueba de Compresión Paralela

Para esta prueba se cortaron y ensayaron seis cuerpos de prueba por laminado, totalizando 72 elementos, que fueron extraídos conforme indica la Figura 9.4. Estas piezas otorgaron conjuntamente el módulo de elasticidad y la resistencia máxima para el esfuerzo. La forma de las piezas y sus dimensiones se da a conocer en la Figura 9.10. En todos los casos se tomaron fotos antes, durante y después del ensayo. Esta información se usó con fines de evaluación del tipo de falla.

Figura 9.10 - Forma y dimensiones del cuerpo de prueba usado en compresión paralela para Sajo (A) y Acacia (B).

9.7.1. Módulo de elasticidad en compresión paralela al grano

Para este caso la norma habla que se debe usar toda la sección transversal del laminado con una esbeltez mínima de 6:1. Como los cuerpos de prueba poseen una sección transversal de $5 \times 5 \text{ cm}^2$, entonces la dimensión final usada fue $30 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$, siendo $\ell = 30 \text{ cm}$, la longitud del vano libre.

La carga se aplicó a una velocidad máxima de $0,00005\ell \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. El equipo de carga y medición tuvo un error menor al 1%. La medición de las deformaciones se efectuó con

extensómetros MTS, para minimizar la distorsión de los datos. El reporte del módulo de elasticidad se calculó con la siguiente ecuación:

$$E_{c,0} = \frac{l_1 (F_2 - F_1)}{A (w_2 - w_1)} \quad \text{Ecuación 9.16}$$

Antes de iniciar el ensayo se colocó una pieza testigo para conocer la carga máxima de rotura y una aproximación de la carga en el límite elástico, lo anterior con el fin de saber el momento de retirar los equipos de lectura de deformación.

9.7.2. Esfuerzo en compresión paralela al grano

Esta prueba procuró la ausencia de flexión en los cuerpos de prueba, caso más difícil de satisfacer en *A. magium*, la cual presentó delaminación durante el ensayo en algunas probetas. El equipo de aplicación de carga presentó un error menor al 1%. La duración de la prueba fue de 300 s (± 120 s). La forma de falla se registró fotográficamente y será analizada totalmente en otro trabajo. En este solo se reportan los casos más llamativos. La expresión para el cálculo de esta prueba se da a conocer en la Ecuación 9.17.

$$F_{c,0} = \frac{F_{max}}{A} \quad \text{Ecuación 9.17}$$

Donde:

l_1 : Distancia entre los puntos de anclaje de los relojes comparadores; F_1 : Carga al 0,1 de F_{max} ; F_2 : Carga al 0,4 de F_{max} ; w_1 : Deformación correspondiente en F_1 , resultado de la lectura promedio de dos deformímetros localizados a lado y lado del cuerpo de prueba; w_2 : Deformación correspondiente en F_2 , resultado de la lectura promedio de dos extensómetros localizados a lado y lado del cuerpo de prueba; A : Área de la sección transversal

9.8. Prueba compresión perpendicular al grano

El test se realizó conforme la recomendación de la EN 408. Según esta normativa se deben retirar dos cuerpos de prueba por pieza estructural, para un total de 24 unidades. La máquina de ensayo tuvo un error menor o igual al 1% respecto a la carga máxima aplicada. La velocidad del ensayo alcanzó en 300 s (± 120 s) por prueba, hasta el punto de rotura.

Se verificó que las caras de los cuerpos de prueba fueran paralelas y/o perpendiculares entre sí, aunque en algunas piezas se presentó pandeo lateral, el cual se contrarrestó con cuñas en la misma madera. El material se elaboró conforme la Figura 9.11. Debido a la base tan pequeña de las vigas originales (5 cm), se compensó el área de aplicación

de la carga con longitud, de ahí, las dimensiones finales de los cuerpos de prueba ($50 \times 40 \times 5\text{cm}^3$).

Figura 9.11 - Forma y dimensiones previstas antes del ensayo, del cuerpo de prueba, usado en compresión perpendicular para Sajo y acacia (A) y principio de la prueba (B). Fuente: ISO EN 408.

La norma sugiere las dimensiones para los cuerpos de prueba, sin embargo, por las características especiales de las vigas de este estudio, tales dimensiones fueron modificadas tal cual se especifica en la Tabla 9.6.

Tabla 9.6 – Dimensiones sugeridas por la norma ISO EN 408 y modificadas para la prueba de compresión para MLE.

Test	Dimensión	Norma ISO EN 408	Dimensiones Modificadas este estudio
Compresión-Tensión Perpendicular	Volumen (m^3)	0,01	0,01
	$b \times l$ (mm^2)	25000	50×400
	b mínimo (mm)	100	50
	h (mm)	400	500

9.8.1. Módulo de elasticidad en compresión perpendicular al grano

Para determinar el módulo de elasticidad se utilizaron los mismos cuerpos de prueba empleados en el cálculo de los esfuerzos en compresión perpendicular. Fueron instalados dos extensómetros simultáneamente, para minimizar los errores de la medición. Estos se colocaron en las caras opuestas de los cuerpos de prueba, sobre los cantos y se estimó su precisión

durante la medición, con un error menor al 1%, respecto a la deformación máxima. La formulación para el cálculo del módulo de elasticidad se presenta a continuación.

$$E_{c,90} = \frac{h_c (F_2 - F_1)}{b \cdot l (w_2 - w_1)} \quad \text{Ecuación 9.18}$$

Con los datos obtenidos se dibujó el diagrama carga vs deformación para cada probeta, este fue similar al de la Figura 9.12, con este, se calculó el valor de $F_{c,90,max}$. Se realizó el ejercicio de construir una línea (1) desde el origen hasta el punto de falla para cada cuerpo de prueba, con los datos arrojados por el MTS, marcando los valores de carga y deformación en 100%, 40% y 10% de la carga máxima. Después se ubicó una línea paralela (2), a una distancia $0,01 h_c$, y esta se prolongó desde la referencia horizontal de carga cero, hasta que se cruzó con la curva carga-deformación. En este punto se midió el valor de la carga que corresponde con el parámetro $F_{c,90,max}$, siempre y cuando este valor presentara una diferencia menor al 5% con relación a la carga máxima obtenida en el ensayo.

Figura 9.12 - Diagrama carga deformación para la prueba de compresión perpendicular. Fuente: ISO EN 408.

9.8.2. Esfuerzo de compresión perpendicular al grano

En el caso de la prueba en compresión, apoyos laterales fueron necesarios para evitar la rotación del cuerpo de prueba. Estos apoyos fueron hechos con la misma madera y soportados con MLE de la especie.

$$F_{c,90} = \frac{F_{c,90,max}}{b \cdot l} \quad \text{Ecuación 9.19}$$

Figura 9.13 - Forma y dimensiones durante el ensayo de compresión perpendicular para Sajo (A) y Acacia (B). Fuente: ISO EN 408.

9.9. Esfuerzo de Tensión Perpendicular al Grano

Para esta prueba se siguió la norma ISO/FDIS 13910. Para la elaboración del cuerpo de prueba y el montaje del ensayo en tres puntos, se siguieron los lineamientos de la Figura 9.14. En este caso $h = 50 \text{ cm}$ y corresponde con la altura de la MLE, el valor de $L_h = 18 \text{ cm}$ y $b = 5 \text{ cm}$, coincidiendo con la base de la viga original. El muestreo de este material se hizo conforme la Figura 9.4. Se obtuvo un solo cuerpo de prueba por viga estructural, de ahí, que este ensayo se realizara doce veces.

Figura 9.14 - Esquematización del montaje de la pieza en la prueba de tracción perpendicular. Los números 1 y 2 se refieren a los tipos de apoyo móvil y fijo, respectivamente. Fuente: ISO/FDS 13910.

Para el cálculo del esfuerzo máximo de tracción perpendicular, se aplicó la Ecuación 9.13. La Figura 9.15, da a conocer los detalles de la prueba. El equipo utilizado en este caso obedece a un marco de carga con capacidad de 10 t, aunque se usó una celda de carga de 5 t del tipo Futek, ya descrita con anterioridad en el ensayo de flexión estática.

$$F_{t,90} = \left(\frac{3,75 \cdot F_{ult.}}{b \cdot h} \right) \cdot \left(\frac{0,03 \cdot b \cdot L_h^2}{800^3} \right)^{0,2} \quad \text{Ecuación 9. 20}$$

Figura 9.15 - Montaje en el equipo Tritech para la prueba de tracción perpendicular de madera laminada encolada (MLE) en *Camptosperma panamense* (A) y *Acacia mangium* (B).

9.10. Prueba de Cizallamiento

Esta prueba se realizó conforme los lineamientos de la norma ISO/FDIS 13910. Para la elaboración del cuerpo de prueba y el montaje del ensayo en tres puntos, se siguieron los detalles de la Figura 9.16. En este caso $h = 16$ cm, corresponde con la altura de la muestra tomada de la VLC, el valor de $L = 112$ cm, de los cuales 96 cm corresponden al vano de la viga durante el ensayo, y $b = 5$ cm, coincide con la base de la VLC. El muestreo de este material se hizo conforme la Figura 9.4, retirando una unidad experimental por VLC de tal forma que el centro coincidiera con una línea de cola. El montaje final del ensayo se aprecia en la Figura 9.17.

La forma de cálculo de la resistencia en cizallamiento paralelo se da a conocer en la Ecuación 9.21.

$$f_{ciz.} = \frac{0,75 \cdot F_{ultimo}}{b \cdot h} \quad \text{Ecuación 9.21}$$

Figura 9.16 - Esquematización del montaje de la pieza en la prueba de cizallamiento paralelo. Los números 1 y 2 se refieren a los tipos de apoyo móvil y fijo, respectivamente. Fuente: ISO/FDS 13910.

Figura 9.17 - Montaje en el equipo Trittech para la prueba de cizallamiento paralelo de madera laminada encollada (MLE). Madera de *Campnosperma panamense* (A). Madera de *Acacia mangium* (B).

9.11. Resultados

9.11.1. Cálculo de los factores de la sección transversal transformada debidos a la combinación de tres grados de lamelas, dos sistemas de clasificación y dos especies

Trayendo los módulos de elasticidad de la madera de *C. panamense* Standl. y *A. mangium* Willd., calculados por procedimientos destructivos (DT)⁸ y no destructivos (NDT)⁹, fue posible determinar los factores de la sección transversal transformada, donde a primera vista se hace evidente en la Tabla 9.7 una alteración entre el tipo de lamela y el valor reportado, pues se esperaba que las lamelas o piezas clasificadas como extremas, presentaran siempre los valores más altos (color verde) y las lamelas o piezas centro, los valores más bajos (color rosado). En contraposición, los valores más altos y más bajos de cada experiencia se repartieron entre las lamelas o piezas extremo e intermedias, mientras que los valores medios se concentraron en las lamelas del centro, esto último, representa el caso más llamativo, y es donde precisamente se concentra el análisis de los resultados. En ninguno de los casos, las lamelas siguen el orden lógico esperado.

La Tabla 9.7, da a conocer los resultados y las implicaciones sobre el momento de inercia. Todos los cálculos fueron realizados a partir de las ecuaciones de la Tabla 9.5. Los valores de afectación son muy cercanos a la unidad en todos los casos. Lo anterior es un paliativo frente a la falta de coherencia en el orden del material y su impacto en el cálculo de los módulos de elasticidad local ($E_{m,l}$), aparente ($E_{m,app}$) y módulo de cortante (G), donde la normativa recomienda su aplicación (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004). Además, el bajo peso de este factor ($< 0,972$), podría incidir en el dominio del módulo de elasticidad más alto presente en el conjunto laminado, haciendo indiferente su ubicación para la conformación de lamelas propuesta.

⁸ Datos obtenidos del Capítulo 4 de fabricación de la MLE

⁹ Datos obtenidos de las pruebas por vibración transversal del Capítulo 7

Tabla 9.7 – Factores de la sección transversal transformada para el Momento de Inercia (I) en las vigas de MLE, según el Módulo de Elasticidad (MPa) reportado por diferentes metodologías destructivas (DT)¹ y no destructivas (NDT)², la posición de las lamelas, dos sistemas de clasificación y dos especies.

Tipo de Lamelas	Sistema Clasificación					
	NSR-10			Clasificación Propuesta		
	C. panamense NDT	C. panamense DT	A. mangium DT	C. panamense NDT	C. panamense DT	A. mangium DT
Extremo	10530	7101	10260	11927	8214	8832
Intermedio	9175	8117	8484	11885	6812	9309
Centro	9971	7639	9620	12038	7603	9213
Factor de Modificación de la Sección	0,982	0,996	0,972	0,999	0,975	0,999
Módulo de Elasticidad de la Sección	10338,7	8082,4	9969,7	12031,2	8005,5	9299,2
Color del recuadro:	Valor más alto	Valor más bajo	Valor Intermedio			

Ahora bien, al calcular el factor de modificación de la sección trasversal, vía razón de resistencia (RR_i), con lamelas ordenadas correctamente en el laminado, se obtienen los resultados de la Tabla 9.8. Allí se visualiza el valor de cada factor a aplicar al conjunto debido exclusivamente a la nudosidad. Dicho factor se da a conocer por especie, por tipo de clasificación y, en el caso de la clasificación propuesta, se colocó cero (0) en la última fila, asumiendo la situación más crítica, donde las lamelas tipo centro poseen total nudosidad en el ancho (b) de las piezas (flecha roja).

En la clasificación por NSR-10 se asumió que el grado de lamelas intermedias y centrales poseían el mismo valor de nudosidad, que el grado más alto de lamelas de la clasificación propuesta (flechas negras). En el segundo caso de la clasificación propuesta para cada especie, el valor de nudosidad de las lamelas tipo centro bajó de 0,286 y 0,334 a cero, para Sajo y Acacia, respectivamente. Obteniendo una variación marginal en la razón de resistencia de la sección, al aplicar esta mudanza, según se verifica en la última fila.

Los valores de la Tabla 9.8 fueron usados para la modificación del momento de inercia y módulo de resistencia de cada una de las vigas, con el fin de determinar todos los Módulos de Elasticidad y Cortante, excepto el Módulo de Elasticidad Global, en la prueba de flexión estática a escala real.

Tabla 9.8 – Factores de la sección transversal transformada para la Razón de Resistencia aplicable al tipo de MLE (*RRi*). Teniendo en cuenta que el mejor grado se localiza en extremos, el menor en el centro de la viga y el grado medio en la posición intermedia. (Información basada en los resultados del capítulo 3).

Tipo de Lamelas	Especie					
	<i>Campnosperma panamensis</i>			<i>Acacia mangium</i>		
	NSR-10	Clasificación Propuesta	Clasificación Propuesta	NSR-10	Clasificación Propuesta	Clasificación Propuesta
Extremo	1	0,956	0,956	1	0,882	0,882
Intermedio	0,956	0,849	0,849	0,882	0,716	0,716
Centro	0,956	0,286	0	0,882	0,334	0
Factor de Modificación de la Sección	0,985	0,929	0,912	0,948	0,880	0,848
Razón de Resistencia de la Sección	0,985	0,888	0,872	0,948	0,777	0,748
Color del recuadro:	Valor más alto	Valor más bajo	Valor Intermedio			

9.11.2. Resultados del esfuerzo en flexión estática de la MLE para dos especies y dos tipos de clasificación

El desempeño del ensayo para la madera de *C. panamense* Standl. para seis vigas, puede considerarse normal por las cargas máximas alcanzadas, las deformaciones máximas generadas en las vigas y los modos de falla. No se puede decir lo mismo en las vigas laminadas de *A. mangium* Willd. donde se presentaron desprendimientos por las líneas de cola durante el ensayo, cuyas causas son imputables a las condiciones durante el proceso de fabricación, junto con otros detalles muy específicos, que serán abordados a profundidad en los subcapítulos siguientes. Fue por ello, que, durante el ensayo, el autor tomó la decisión de solo someter a cargas dos de las siete posibles vigas posibles de Acacia, con el fin que el material restante pudiera ser objeto de transformación y obtener los cuerpos de prueba que irían a caracterizar mecánicamente la MLE de esta especie.

En la Tabla 9.9 se dan a conocer los resultados de las principales variables del ensayo de flexión estática en MLE a escala real para Sajo. En todos los casos, tanto los módulos de elasticidad como en los esfuerzos obtuvieron valores más altos en las vigas construidas con el sistema de clasificación propuesta *versus* las construidas con los términos de referencia de la

NSR-10. El módulo de elasticidad estuvo arriba en un 2,8%, mientras que los dos esfuerzos, máximo y en el límite proporcional, estuvieron arriba un 4,9%. Al aplicar el estadístico de *t-student* asumiendo varianzas iguales y una significancia mínima del 95%, no se encontraron diferencias significativas para los dos tipos de clasificación en las vigas sometidas a escala real.

En el caso de Sajo, el promedio de los esfuerzos máximos de rotura y en límite, estuvieron acordes a los valores característicos de la madera en probetas pequeñas libres de defectos. Los valores de elasticidad en la MLE estuvieron un 30% por encima de los reportes en probetas.

En el Anexo D, se pueden visualizar los diagramas Carga versus deformación para cada una de las vigas de MLE a escala real, sometidas a la prueba de flexión estática en cuatro puntos, con cuatro trabas laterales, hasta el punto de rotura. La Tabla 9.10 presenta los valores de dos vigas de Acacia, sometidas a la prueba de flexión estática. Los esfuerzos calculados son concordantes con los valores medios obtenidos en probetas libres de defectos de la misma procedencia. Mas en el caso del módulo de elasticidad, las vigas a escala real presentaron valores muy por debajo (10,22 GPa) frente a los reportados para probetas de la misma procedencia (15,96 GPa) (Tabla 5.5)

La anterior situación en *Acacia mangium* Willd., animó al autor a realizar un teste no programado al inicio de la investigación, usando madera de pequeñas dimensiones de la especie, dos adhesivos (MUF, EPI) y dos niveles de esparcimiento (250 y 350 g.m⁻²). Uno de los adhesivos (EPI) en esparcimiento de 350 g.m⁻², correspondió al usado en las vigas de Acacia de gran formato. Los adhesivos fueron aplicados en condiciones de ambiente y procesamiento controladas, a fin de validar las causas atribuibles al desprendimiento de la línea de cola y otorgar algunas recomendaciones referentes a cómo afinar el procedimiento en la etapa de transformación. Los resultados de dicha prueba mecánica se dan a conocer en la Tabla 9.11. Por ser material de pequeñas dimensiones, el autor siguió la norma ASTM D 143 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2010), en el procesamiento de los datos y evaluación de la información.

De este ensayo ejecutado con 123 probetas se puede decir, que el adhesivo se comportó adecuadamente con la madera en todos los casos, en la medida que ningún cuerpo de prueba falló por la línea de cola.

Tabla 9.9 – Resultados de la Prueba de Flexión Estática en madera de *Campnosperma panamense* Standl. para seis vigas de 750 x 50 x 5 cm³. Los valores se expresan en MPa.

Clasificación Propuesta – CP	Vigas									Total			
	Variable	A	B	C	Media CP (Mpa)	Clasificación por NSR-10	D	E	G	Media NSR-10 (MPa)	Promedio General (MPa)	Desviación Estándar (MPa)	Percentil 5
	$E_{m,l}$	2.594	1.750	2.100	2.148		1.901	2.324	1.451	1.892	2.020	410	1.525
	$E_{m,g}$	10.121	8.826	9.882	9.610		9.144	9.867	9.005	9.339	9.474	545	8.871
	$E_{m,app}$	864,5	583,2	699,9	715,9		633,5	774,7	483,5	630,6	673,2	136,6	508,4
	G	62,2	42,0	50,4	51,5		45,6	55,8	34,8	45,4	48,5	9,8	36,6
	$f_{m\acute{a}x.}$	29,7	26,7	32,2	29,5		28,4	28,7	27,4	28,2	28,9	1,9	26,9
	f_m	17,8	16,0	19,3	17,7		17,1	17,2	16,5	16,9	17,3	1,2	16,1

Tabla 9.10 – Resultados de la Prueba de Flexión Estática en madera de *Acacia mangium* Willd. para dos vigas de 750 x 50 x 5 cm³. Los valores se expresan en MPa.

	Vigas		Total
	S	V	Valor Viga V
Clasificación previa por NSR-10	$E_{m,l}$	996,1	2.232,8
	$E_{m,g}$	7.241,3	10.021,8
	$E_{m,app}$	332,1	744,27
	G	23,9	53,59
	$f_{m\acute{a}x.}$	22,46	19,52
	f_m	13,47	11,71

Aunque el objetivo no era reportar propiedades del material, se encontró que los esfuerzos en general presentaron valores inferiores a los reportados en madera maciza y las vigas laminadas de gran formato. Los módulos de elasticidad calculados estuvieron debajo de los reportados en madera maciza y levemente por encima de la MLE. los resultados obtenidos en esta prueba revelan la factibilidad de encolar con EPI la madera de Acacia de la procedencia Noroccidente de Colombia. Se debe actuar con cautela y verificar la información pues las publicaciones son contradictorias referente al uso de Isocianatos en MLE (DUNKY; PIZZI, 1984; IWAKIRI et al., 2014, 2015a, 2015b). Para las próximas experiencias se deberán afinar las técnicas usadas para fabricar los laminados en función de las condiciones intrínsecas del proceso y en especial de las condiciones ambientales, con el ánimo de obtener resultados concluyentes.

Tabla 9.11 – Resultados asociados a las pruebas de flexión estática en tres puntos con probetas de 2,5 x 2,5 x 41 cm³ en MLE de *Acacia mangium* Willd. encolada con EPI y MUF en cantidades de 250 y 350 g. m⁻². Valores promedio (A) y Desviaciones estándar (B).

A								
Tratamiento	Dsa (Kg*m ³)	MoE (GPa)	RLP (MPa)	MoR (MPa)	Longitud No Adherida por cara (mm)	CH (%)	Corte Seca al Aire (MPa)	Corte en Verde (MPa)
EPI250	579	11,1	52,8	80,9	6,2/380	13,21%	7,3	3,1
EPI350	562	11,0	50,6	85,6	0,8/380	14,07%	7,9	3,8
MUF250	648	12,0	58,1	80,4	11,3/380	12,74%	6,1	5,0
MUF350	691	12,2	64,0	95,5	6,7/380	13,82%	7,9	7,5
Total general	619	11,6	56,3	85,8	6,0/380	13,50%	7,4	4,8

B								
Tratamiento	Dsa (Kg*m ³)	MoE (GPa)	RLP (MPa)	MoR (MPa)	Longitud No Adherida por cara (mm)	CH (%)	Corte Seca al Aire (MPa)	Corte en Verde (MPa)
EPI250	167	1,6	15,5	17,3	6,7/380	1,66%	4,1	2,1
EPI350	130	2,1	11,7	18,2	1,9/380	0,56%	3,8	1,9
MUF250	164	1,7	14,7	25,2	5,0/380	0,69%	4,3	2,7
MUF350	130	1,8	12,4	18,9	4,0/380	1,15%	4,7	3,6
Total general	156	1,9	14,4	20,6	5,9/380	1,21%	4,3	3,1

9.11.3. Resultados del esfuerzo en tensión paralela de la MLE para especie, normativa y posición de las probetas

Como se visualiza en la Tabla 9.12, los valores del módulo de elasticidad ($E_{t_{paralela}}$) y esfuerzo en tensión paralela ($f_{t_{paralela}}$) tienden a disminuir en el sentido exterior- intermedio - centro para la mayoría de los casos, situación que es más evidente en *C. panamense* Standl. que en *A. mangium* Willd. Igualmente, la clasificación basada en la NSR-10 mostró los valores más altos en la mayoría de las situaciones. La especie *A. mangium* exhibió mayores valores en todas las variables expuestas.

Al comparar estadísticamente los resultados no se comprobó sinergia por las interacciones de los factores especie, normativa y/o posición ($q \geq 0.05$). El factor posición no

marcó diferencias significativas al evaluar los contrastes univariados y multivariados en la totalidad de variables ($q \geq 0.05$). El tipo de normativa marcó diferencias significativas en la densidad seca a la aire y módulo de elasticidad ($q < 0.05$), pero no en el caso del esfuerzo a tensión paralela ($q > 0.05$). Las dos especies se diferenciaron estadísticamente en todas las variables analizadas ($q < 0.05$). Ver Tabla 9.13.

Llama la atención el hecho por el cual siendo la densidad un elemento importante en la generación de resistencia, tuvo repercusión directa y proporcional en el módulo de elasticidad, mas no en las variables de resistencia.

Tabla 9.12 – Valores de densidad seca al aire, módulo de elasticidad y esfuerzo de tensión paralela al grano para las maderas *C. panamense* y *A. mangium* extraídas de la MLE.

Variable	Especie	Norma	Posición	N	Promedio Posición	Error típico	Intervalo de confianza al 95%.		Promedio Norma	Promedio Especie
							Límite inferior	Límite superior		
Densidad Seca al Aire (Kg.m-3)	Campnosperma panamense	NSR-10	Ex	6	422,2	20,7	380,9	463,6	432,9	425,9
			In	6	437,1	20,7	395,7	478,4		
			Ce	6	439,4	20,7	398,0	480,7		
		Clasificación Propuesta	Ex	6	428,0	20,7	386,6	469,3	418,9	
			In	6	427,6	20,7	386,2	468,9		
			Ce	6	401,0	20,7	359,7	442,4		
	Acacia mangium	NSR-10	Ex	6	651,0	20,7	609,6	692,3	655,4	633,2
			In	6	666,5	20,7	625,1	707,8		
			Ce	6	648,7	20,7	607,3	690,0		
		Clasificación Propuesta	Ex	6	626,0	20,7	584,6	667,3	611,0	
			In	6	584,6	20,7	543,3	626,0		
			Ce	6	622,5	20,7	581,1	663,8		
Et_paralela (MPa)	Campnosperma panamense	NSR-10	Ex	6	11831	926	9978,3	13683,3	11592,3	10725,5
			In	6	12512	926	10659,2	14364,2		
			Ce	6	10434	926	8581,9	12286,9		
		Clasificación Propuesta	Ex	6	11056	926	9203,6	12908,6	9858,7	
			In	6	10173	926	8321,0	12026,0		
			Ce	6	8347	926	6494,1	10199,1		
	Acacia mangium	NSR-10	Ex	6	15817	926	13964,4	17669,4	15303,6	14547,7
			In	6	15637	926	13784,9	17489,9		
			Ce	6	14457	926	12604,0	16309,0		
		Clasificación Propuesta	Ex	6	13622	926	11769,3	15474,3	13791,8	
			In	6	13260	926	11407,1	15112,2		
			Ce	6	14494	926	12641,4	16346,5		
ft_paralela (MPa)	Campnosperma panamense	NSR-10	Ex	6	18,7	2,5	13,7	23,7	16,5	16,6
			In	6	15,8	2,5	10,8	20,8		
			Ce	6	14,9	2,5	9,9	19,9		
		Clasificación Propuesta	Ex	6	18,8	2,5	13,8	23,8	16,7	
			In	6	16,4	2,5	11,4	21,5		
			Ce	6	15,0	2,5	10,0	20,0		
	Acacia mangium	NSR-10	Ex	6	22,6	2,5	17,6	27,6	21,8	20,0
			In	6	22,0	2,5	17,0	27,0		
			Ce	6	20,8	2,5	15,8	25,8		
		Clasificación Propuesta	Ex	6	18,3	2,5	13,3	23,3	18,2	
			In	6	18,6	2,5	13,6	23,6		
			Ce	6	17,7	2,5	12,7	22,8		

Tabla 9.13 – ANOVA del modelo con los efectos univariados y multivariados usando los factores especies, normativa y posición en las variables densidad seca al aire, módulo de elasticidad y esfuerzo en la prueba de tensión paralela para la MLE.

Fuente	Variable dependiente	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo corregido	DSA	8,0,E+05	11	7,31,E+04	28,52	0,000
	Et_paralela	3,6,E+10	11	3,26,E+09	6,33	0,000
	Ft_paralela	4,3,E+04	11	3,90,E+03	1,03	0,429
Intersección	DSA	2,0,E+07	1	2,02,E+07	7872,23	0,000
	Et_paralela	1,1,E+12	1	1,15,E+12	2234,14	0,000
	Ft_paralela	2,4,E+06	1	2,41,E+06	639,88	0,000
Especie	DSA	7,7,E+05	1	7,74,E+05	301,70	0,000
	Et_paralela	2,6,E+10	1	2,63,E+10	51,10	0,000
	Ft_paralela	2,1,E+04	1	2,07,E+04	5,49	0,022
Norma	DSA	1,5,E+04	1	1,53,E+04	5,98	0,017
	Et_paralela	4,7,E+09	1	4,74,E+09	9,21	0,004
	Ft_paralela	4,9,E+03	1	4,87,E+03	1,29	0,260
Posición	DSA	2,0,E+02	2	9,81,E+01	0,04	0,962
	Et_paralela	1,8,E+09	2	9,12,E+08	1,77	0,179
	Ft_paralela	7,6,E+03	2	3,78,E+03	1,00	0,373
Especie * Norma	DSA	4,1,E+03	1	4,13,E+03	1,61	0,209
	Et_paralela	2,2,E+07	1	2,21,E+07	0,04	0,836
	Ft_paralela	6,7,E+03	1	6,74,E+03	1,79	0,186
Especie * Posición	DSA	1,8,E+03	2	8,98,E+02	0,35	0,706
	Et_paralela	1,4,E+09	2	7,22,E+08	1,40	0,254
	Ft_paralela	2,7,E+03	2	1,35,E+03	0,36	0,700
Norma * Posición	DSA	4,0,E+03	2	1,99,E+03	0,78	0,465
	Et_paralela	5,5,E+08	2	2,75,E+08	0,53	0,589
	Ft_paralela	1,9,E+02	2	9,56,E+01	0,03	0,975
Especie * Norma * Posición	DSA	5,4,E+03	2	2,68,E+03	1,04	0,358
	Et_paralela	9,6,E+08	2	4,79,E+08	0,93	0,400
	Ft_paralela	1,2,E+02	2	5,90,E+01	0,02	0,984
Error	DSA	1,5,E+05	60	2,56,E+03		
	Et_paralela	3,1,E+10	60	5,15,E+08		
	Ft_paralela	2,3,E+05	60	3,77,E+03		
Total	DSA	2,1,E+07	72			
	Et_paralela	1,2,E+12	72			
	Ft_paralela	2,7,E+06	72			
Total corregida	DSA	9,6,E+05	71			
	Et_paralela	6,7,E+10	71			
	Ft_paralela	2,7,E+05	71			

9.11.4. Resultados del esfuerzo en compresión paralela de la MLE para especie, normativa y posición de las probetas

Los valores reportados en la Tabla 9.14 de compresión paralela para las maderas laminadas, estimados a partir del módulo de elasticidad y esfuerzo en compresión, muestran valores más altos en favor de la Acacia y la NSR-10 en la mayoría de los casos; solo el módulo de elasticidad para la clasificación propuesta resultó ser más alto que para la NSR-10 en la madera de *C. panamense* Standl. Las tendencias en función de la posición de las lamelas fueron más difíciles de determinar por los contrastes generados tanto para el mismo factor como para los factores combinados, la Tabla 9.15 de análisis de varianza otorga mayor claridad en este aspecto. En la Tabla 9.14 se pueden visualizar los resultados numéricos de la prueba.

Los rangos de respuesta para las diferentes pruebas marcan valores relativamente normales en lo referente a las variables módulo de elasticidad y esfuerzo en compresión paralela.

El análisis de varianza indica que la interacción especies, normas y posiciones incide en la diferenciación estadística del módulo de elasticidad y no tiene efecto diferenciador para el esfuerzo compresión paralela. Los mayores valores del módulo de elasticidad se alcanzaron en la *A. mangium* Willd., con la NSR-10 en las lamelas extremas (Ex) e intermedias (In).

Para el esfuerzo en compresión paralela la diferencia entre los tratamientos viene dada por la combinación de los factores especie – norma y especie – posición, donde los valores de la Acacia fueron más altos, al igual que aquellos asociados a la clasificación de la NSR-10, en las lamelas externas (Ex).

Tabla 9.14 – Valores detallados para el módulo de elasticidad y el esfuerzo en compresión paralela de la madera de *C. panamense* y *A. mangium*.

Variable	Especie	Norma	Posición	N	Promedio Posición	Error típico	Intervalo de confianza al 95%.		Promedio Norma	Promedio Especie
							Límite inferior	Límite superior		
Ec_paralela (MPa)	Campnosperma panamense	NSR-10	Ex	6	10141	1015	8110	12171	10459	10719
			In	6	10940	1015	8910	12971		
			Ce	6	10296	1015	8266	12327		
		Clasificación Propuesta	Ex	6	11760	1015	9729	13790	10978	
			In	6	11115	1015	9084	13145		
			Ce	6	10061	1015	8030	12091		
	Acacia mangium	NSR-10	Ex	4	16074	1243	13587	18561	14626	13957
			In	4	17837	1243	15350	20324		
			Ce	4	9966	1243	7479	12453		
		Clasificación Propuesta	Ex	8	13946	879	12187	15704	13623	
			In	8	13636	879	11878	15395		
			Ce	8	13287	879	11528	15045		
fc_paralela (MPa)	Campnosperma panamense	NSR-10	Ex	6	30,0	3,3	23,3	36,6	30,6	28,7
			In	6	29,9	3,3	23,2	36,6		
			Ce	6	31,9	3,3	25,2	38,5		
		Clasificación Propuesta	Ex	6	28,8	3,3	22,1	35,5	26,9	
			In	6	24,4	3,3	17,7	31,1		
			Ce	6	27,3	3,3	20,6	34,0		
	Acacia mangium	NSR-10	Ex	4	60,7	4,1	52,5	68,9	54,4	46,7
			In	4	60,3	4,1	52,1	68,5		
			Ce	4	42,3	4,1	34,1	50,5		
		Clasificació n Propuesta	Ex	8	47,1	2,9	41,3	52,9	42,9	
			In	8	40,8	2,9	35,0	46,6		
			Ce	8	40,7	2,9	34,9	46,5		

Tabla 9.15 – ANOVA del modelo con los efectos univariados y multivariados usando los factores especies, normativa y posición en las variables dependientes módulo de elasticidad y esfuerzo en compresión paralela para la MLE.

Fuente	Variable dependiente	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo corregido	Ec_paralela	3,5,E+08	11	3,E+07	5,12	0,000
	Fc_paralela	8,2,E+03	11	7,E+02	11,12	0,000
Intersección	Ec_paralela	1,0,E+10	1	1,E+10	1691,07	0,000
	Fc_paralela	1,0,E+05	1	1,E+05	1512,70	0,000
Especie	Ec_paralela	2,0,E+08	1	2,E+08	31,78	0,000
	Fc_paralela	6,7,E+03	1	7,E+03	100,37	0,000
Norma	Ec_paralela	9,9,E+05	1	1,E+06	0,16	0,691
	Fc_paralela	9,9,E+02	1	1,E+03	14,79	0,000
Posición	Ec_paralela	8,0,E+07	2	4,E+07	6,47	0,003
	Fc_paralela	4,2,E+02	2	2,E+02	3,15	0,050
Especie * Norma	Ec_paralela	9,8,E+06	1	1,E+07	1,59	0,213
	Fc_paralela	2,6,E+02	1	3,E+02	3,89	0,053
Especie * Posición	Ec_paralela	3,4,E+07	2	2,E+07	2,72	0,074
	Fc_paralela	5,5,E+02	2	3,E+02	4,08	0,022
Norma * Posición	Ec_paralela	3,6,E+07	2	2,E+07	2,89	0,064
	Fc_paralela	2,5,E+02	2	1,E+02	1,87	0,163
Especie * Norma * Posición	Ec_paralela	5,5,E+07	2	3,E+07	4,44	0,016
	Fc_paralela	2,5,E+02	2	1,E+02	1,84	0,167
Error	Ec_paralela	3,7,E+08	60	6,E+06		
	Fc_paralela	4,0,E+03	60	7,E+01		
Total	Ec_paralela	1,2,E+10	72			
	Fc_paralela	1,1,E+05	72			
Total corregida	Ec_paralela	7,2,E+08	71			
	Fc_paralela	1,2,E+04	71			

9.11.5. Resultados del esfuerzo en compresión perpendicular de la MLE para especie y normativa de las probetas

Dados los valores obtenidos en 24 probetas obtenidas de 12 vigas construidas durante la presente investigación, tanto los módulos de elasticidad, como los valores de resistencia en compresión presentaron valores más altos para la *A. mangium* si se le compara con la madera de *C. panamense*, siendo más evidente la diferencia en la resistencia a compresión perpendicular, pues aquí sobrepasó el doble de su valor Ver Tabla 9.16.

Tabla 9.16 – Valores detallados para el módulo de elasticidad y el esfuerzo en compresión perpendicular de la madera de *C. panamense* y *A. mangium*.

Variable	Especie	Norma	N	Promedio Norma	Error típico	Intervalo de confianza al 95%.		Promedio Especie
						Límite inferior	Límite superior	
Ec_perpendicular (MPa)	<i>Camposperma panamense</i>	NSR-10	6	610,5	163,3	269,8	951,2	535,1
		Clasificación Propuesta	6	459,8	163,3	119,1	800,5	
	<i>Acacia mangium</i>	NSR-10	4	544,6	200,1	127,3	961,9	702,1
		Clasificación Propuesta	8	780,9	141,5	485,8	1076,0	
fc_perpendicular (MPa)	<i>Camposperma panamense</i>	NSR-10	6	3,20	0,35	2,48	3,92	3,22
		Clasificación Propuesta	6	3,23	0,35	2,51	3,96	
	<i>Acacia mangium</i>	NSR-10	4	7,52	0,42	6,63	8,40	6,85
		Clasificación Propuesta	8	6,52	0,30	5,90	7,15	

Al analizar las circunstancias de variación, solo el esfuerzo en compresión perpendicular arrojó diferencias significativas debido a la variación entre especies ($q < 0,05$). Ni los tipos de norma, ni la interacción norma y especie lograron manifestar diferencias entre las dos variables estudiadas. Dados los resultados mostrados en la Tabla 9.17, se considera que el módulo de elasticidad no presentó diferencias en este caso ($q > 0,05$).

Tabla 9.17 – ANOVA del modelo con los efectos univariados y multivariados usando los factores especies, normativa y posición en las variables dependientes módulo de elasticidad y esfuerzo en compresión perpendicular para la MLE.

Fuente	Variable dependiente	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo corregido	Ec_perpendicular	3,8,E+07	3	1,E+07	0,800	0,508
	Fc_perpendicular	8,2,E+03	3	3,E+03	37,929	0,000
Intersección	Ec_perpendicular	8,1,E+08	1	8,E+08	50,616	0,000
	Fc_perpendicular	5,9,E+04	1	6,E+04	820,429	0,000
Especie	Ec_perpendicular	9,2,E+06	1	9,E+06	0,574	0,457
	Fc_perpendicular	8,2,E+03	1	8,E+03	113,298	0,000
Norma	Ec_perpendicular	1,0,E+06	1	1,E+06	0,065	0,802
	Fc_perpendicular	1,3,E+02	1	1,E+02	1,790	0,196
Especie * Norma	Ec_perpendicular	2,1,E+07	1	2,E+07	1,321	0,264
	Fc_perpendicular	1,5,E+02	1	1,E+02	2,062	0,166
Error	Ec_perpendicular	3,2,E+08	20	2,E+07		
	Fc_perpendicular	1,4,E+03	20	7,E+01		
Total	Ec_perpendicular	1,3,E+09	24			
	Fc_perpendicular	7,0,E+04	24			
Total corregida	Ec_perpendicular	3,6,E+08	23			
	Fc_perpendicular	9,6,E+03	23			

9.11.6. Resultados del esfuerzo en tensión perpendicular de la mle para especie y normativa

Al igual que en la prueba de flexión estática, los problemas de encolado fueron relevantes en la madera de Acacia. El Sajo falló en todos los casos por madera, dando cuenta de la solidez de las líneas de cola y la empatía entre la madera con el adhesivo (MUF). Mas como se mencionó con anterioridad, según los resultados de la Tabla 9.11 del presente capítulo, la delaminación presentada no significa que el adhesivo EPI y la madera sean incompatibles, sino que las situaciones coyunturales asociadas al proceso definieron un traspié en su desempeño, se debe profundizar mucho más este aspecto. En la Tabla 9.18 se ponen en conocimiento los valores numéricos obtenidos de esta prueba. Dados los resultados de la prueba, el autor no implementó un análisis de varianza. As imple vista, se nota la similitud de los resultados entre la resistencia en tensión perpendicular, cuando se compararon las dos normativas de clasificación.

Tabla 9.18 – Valores detallados para el esfuerzo en tensión perpendicular de la madera de *C. panamense* y *A. mangium*.

Variable	Especie	Norma	N	Promedio Norma	Error típico	Intervalo de confianza al 95%.		Promedio Especie
						Límite inferior	Límite superior	
ft_perpendicular (MPa)	<i>Campnosperma panamense</i>	NSR-10	6	0,19	0,03	0,13	0,25	0,18
		Clasificación Propuesta	6	0,17	0,03	0,11	0,24	
	<i>Acacia mangium</i>	NSR-10	6	0,05	0,03	-0,01	0,11	0,04
		Clasificación Propuesta	6	0,04	0,03	-0,02	0,10	

9.11.7. Resultados del esfuerzo en cizallamiento de la MLE para especie y normativa

En la misma línea de los resultados del teste de tensión perpendicular se dan a conocer los valores en cortante o cizallamiento para la MLE en la Tabla 9.19 El Sajo falló en este caso por la madera, mientras que la Acacia sobre todo lo hizo por las líneas de cola. No se verificaron diferencias significativas entre las dos especies o los dos sistemas de clasificación por grados de la madera. Tampoco se comprobaron diferencias significativas en la combinación especie con normativa. Ver Tabla 9.20.

Tabla 9.19 – Valores detallados para el esfuerzo en cizallamiento paralelo de la madera de *C. panamense* y *A. mangium*.

Variable	Especie	Norma	N	Promedio Norma	Error típico	Intervalo de confianza al 95%		Promedio Especie
						Límite inferior	Límite superior	
fv_ paralelo (MPa)	<i>Camposperma panamense</i>	NSR-10	3	2,92	0,47	1,83	4,01	2,85
		Clasificación Propuesta	3	2,77	0,47	1,68	3,86	
	<i>Acacia mangium</i>	NSR-10	3	2,46	0,58	1,12	3,80	2,10
		Clasificación Propuesta	3	1,73	0,41	0,79	2,68	

Tabla 9.20 – ANOVA del modelo con los efectos univariados usando los factores especies y normativa en la variable dependiente esfuerzo en cizallamiento paralelo para la MLE.

Fuente	Variable dependiente	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo corregido	Fv_paralelo	3,013	3	1,004	1,498	0,287
Intersección	Fv_paralelo	68,939	1	68,939	102,844	0,000
Especie	Fv_paralelo	1,583	1	1,583	2,361	0,163
Norma	Fv_paralelo	0,552	1	0,552	0,823	0,391
Especie * Norma	Fv_paralelo	0,230	1	0,230	0,343	0,574
Error	Fv_paralelo	5,363	8	0,670		
Total	Fv_paralelo	78,073	12			
Total corregida	Fv_paralelo	8,376	11			

9.12. Análisis de Resultados

9.12.1. Grados de calidad propuestos

Además de reportar las propiedades mecánicas del material, uno de los retos de la presente investigación consistía en evaluar la afectación de los tres grados de lamelas usados en la conformación de los laminados. En términos generales los resultados alcanzados permiten decir que la diferencia encontrada en los módulos de elasticidad de la madera para los tres tipos de lamelas empleados (extremos, intermedia y centro), para las dos especies y los dos sistemas de clasificación, no son un elemento relevante que incida en los factores de atenuación del momento de inercia global de las vigas, más, cuando las lamelas se colocan horizontalmente de manera aleatoria. Para el autor era motivo de preocupación que los grados denominados como “inferiores”, reportaran mayores valores en el módulo de elasticidad, respecto a los grados “superiores”, debido al aprendizaje sobre la marcha en el sistema de clasificación de la madera, que se realizó exclusivamente de forma visual al principio, y posteriormente, pero de manera tímida, de modo conjunto con el módulo de elasticidad dinámico.

Los valores calculados para la reducción del momento de inercia, según el procedimiento avalado y recomendado por la normativa ASTM D 3737 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012), oscilaron entre 0,972 y 0,999, datos que, por su cercanía a la unidad, están en el rango de oscilación del material y eventualmente, podrían ser omitidos de los procedimientos de afectación para el cálculo del módulo de elasticidad local ($E_{m,l}$) y aparente ($E_{m,app}$) sugeridos por la ISO EN 408 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004).

Caso totalmente contrario aconteció con los valores de la razón de resistencia (RR). Si la madera con mayor RR se posiciona obligatoriamente en los extremos de las vigas y la madera con menor RR , se posiciona en el centro. El resultado no es trivial e inocuo. En el caso de seguir los términos de referencia estrictos de la NSR-10, en cuanto a la clasificación visual de la madera, la RR de la madera ubicada en los extremos será aproximadamente 1. Asumiendo que en la posición intermedia y central se coloca madera con RR entre 0,956 y 0,882, para Sajo y Acacia, respectivamente; los valores globales en la MLE de este estudio podrían llegar a 0,99 y 0,95 para las dos especies.

En el caso de la madera clasificada por el sistema propuesto y según las mediciones realizadas en campo de la RR , los valores de esta razón para el tamaño adoptado de vigas ($750 \times 50 \times 5\text{cm}^3$), oscilarían entre 0,93 y 0,88, siendo más altos para Sajo. Lo anterior, asumiendo que la madera de centro posee particularmente RR 's entre 0,33 y 0,29, para Acacia y Sajo, respectivamente. Pero lo más sorprendente, es que si en lugar de esta madera de centro, se colocara otra no clasificada, o con valores de RR cercanos a cero, en las dos especies, las razones de resistencia globales solo descenderían de 0,929 y 0,880 a 0,912 y 0,848, respectivamente; lo cual definitivamente, abre el camino a la utilización total de la madera maciza, como parte fundamental en la elaboración de un producto de ingeniería, por encima de reportes realizados en otras especies como el Pino radiata de Chile, cuya RR oscila entre 0,50 y 0,60 para madera estructural (INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 1991; PINEDA SCHLEEF, 2008; WAGNER et al., 2014)

Ahora bien, la pregunta a responder es si la RR_i , que depende exclusivamente de las nudosidades, tiene un impacto en la reducción de la sección transversal, ¿por qué no se ve reflejado en las mediciones realizadas del módulo de elasticidad para los tres casos de lamelas? La respuesta parece estar en las demás anomalías y su efecto sinérgico. Y aquí cabe la siguiente premisa: “No porque se trate de una anomalía, debe reducirse la resistencia del material, es más la resistencia que puede aumentarse” y tal parece ser el caso de la corteza incluida, que cuando se presenta, densifica las zonas circundantes, y este efecto tiene mayores consecuencias en pro del módulo de elasticidad, que la misma pérdida del momento de inercia de la sección. En la revisión bibliográfica reportada por varios autores (KAMAL et al., 2017), se evidencia la necesidad de utilizar métodos acústicos para hacer un barrido total de las anomalías de la madera, y es precisamente este aspecto en el que se ha venido insistiendo a lo largo del documento.

9.12.2. Delaminación en las vigas de Acacia

Al comparar las curvas de carga vs. deformación en Acacia, se observa la fractura de las lamelas y la pérdida de capacidad resistente definitiva al momento en que la tercera línea de cola cede. Ver Figura 9.18. Cada vez que la viga alcanza una deformación en el plano, aproximadamente equivalente al espesor de una lamela, la línea de cola cede y pierde su capacidad resistente de manera progresiva y creciente, continuando con la siguiente, que

también cede inevitablemente, pues debe soportar los esfuerzos cortantes acumulativos de las lamelas anteriores. En la Figura 9.18 (A), la segunda lamela acumuló el esfuerzo de la primera después que esta falló, pero llegó a un punto, donde no soportó los esfuerzos cortantes ($P=22,12$ KN). Cuando la segunda lamela falla, traslada los esfuerzos de toda la viga a la lamela siguiente, cuya resistencia es mucho menor ($P=16,95$ KN) y termina colapsando el sistema. En la viga representada en la Figura 9.18 (B), la segunda lamela no soporta el esfuerzo acumulado ($P=17,13$ KN) y en la tercera, la viga no se recupera ($P=14,92$ KN).

Figura 9.18 - Diagrama de cargas vs deformación para las Vigas de Acacia identificadas como S4 (A) y V4 (B). En la línea roja se colocó el promedio de la deformación del tercio central, en su canto inferior y con la línea negra, la deformación del canto superior en sus extremos.

En los casos mencionados, el esfuerzo cortante en la dirección del eje dominante es el que cede antes que se presente algún tipo de pandeo lateral, según puede ser comprobado en la fotografía de la Figura 9.19 (A). En la Figura 9.19 (B), puede verificarse el contraste con otra experiencia, llevada a cabo por el autor en *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden, en este caso la viga falla por cortante debido al pandeo lateral en dirección ortogonal al plano. Al respecto, la literatura menciona que profundidades en las delaminaciones superiores al 60% pueden inducir a la inestabilidad por pandeo y posterior quiebre del elemento, como se dio en esta ocasión (GASPAR; CRUZ; GOMES, 2015).

Figura 9.19 - Evidencia de falla por cortante en la dirección del eje principal de la viga S4 de Acacia del presente estudio (A), la flecha hace referencia a la dirección del esfuerzo cortante y su grosor indica la intensidad. Falla de la viga por cortante en la dirección perpendicular al plano de pandeo en otra experiencia con *E. grandis* W. Mill ex Maiden (B).

La literatura menciona la delaminación en MLE como una situación común en varias partes del mundo, más por uso, que por fabricación, y reporta alternativas de evaluación y recuperación que no fueron exploradas en el presente trabajo (GOMES FERREIRA; CRUZ; SILVA, 2017; MARHENKE et al., 2018). Tales experiencias internacionales presentan algunos quiebres en los indicadores de calidad durante el proceso de obtención que ya han sido expuestos en el capítulo de fabricación de MLE. Para este caso, el autor filtró el siguiente listado como posibles causas asignables a la delaminación de madera de Acacia, agrupadas en cuatro categorías:

Debidas a la madera: Exceso de humedad, falta de preparación de superficies, tiempo desde la preparación de superficie, dimensiones diferenciales a lo largo de la lamela, espesor de la lamela muy bajo.

Debidas al proceso: Velocidad de avance en el moldurado excesiva, herramienta desgastada, bajo número de cuchillas en el cabezal (Z), velocidad de rotación del cabezal muy alta, baja presión durante en el prensado de las vigas, baja capacidad de prensado de la fábrica.

Debidas al Adhesivo: Insuficiencia en las cantidades para cubrir toda la superficie a encolar, balance inadecuado entre la cola y el catalizador, mezcla errónea de los componentes, tiempo abierto y/o cerrado por encima del necesario, tiempo de prensado insuficiente, tiempo de fraguado después del prensado insuficiente.

Otras causas: Temperatura y humedad del ambiente, excesiva aireación en el local, la falta de preparación del personal de apoyo, el cansancio del personal, la falta de iluminación, la baja capacidad en el compresor de la fábrica, la falta de coordinación de las actividades a nivel de la organización, el ausentismo e intermitencia del personal operativo y el desconocimiento del adhesivo por parte del personal.

Decantando las causas más probables, se concluyó que el tiempo transcurrido de una semana, entre la preparación de las superficies hasta el encolado fue excesivo, más, con las altas temperaturas alcanzadas durante esa semana. Igualmente, las cantidades muy justas de adhesivo obligaron al personal a repasar la brocha varias veces sobre la misma superficie, generando una película más delgada y por ende un secado más rápido. Un tiempo abierto y cerrado por encima del estipulado dado el alto número de lamelas a encolar (27) y la falta de coordinación del personal, generaron una pérdida generalizada en la propiedad del adhesivo. Igualmente, la baja capacidad del equipo neumático de compresión incitó descargas continuas y por ende paradas en el procedimiento que alargaron excesivamente el tiempo cerrado del laminado, todos estos elementos atentan contra la buena calidad del laminado (DUNKY; PIZZI, 1984; PIZZI, 1994).

Sin lugar a dudas, estos hechos se vieron potenciados por las condiciones climáticas del día seleccionado para el prensado, pues teniendo la sabana de Bogotá un promedio de temperatura de 17°C, ese día en particular, se alcanzaron temperaturas del orden de 25,1 °C, siendo la más altas registrada para la región en los últimos 60 años (SEMANA, 2017). Esto de una parte, aceleró el secado de la cola y por otra, ralentizó el cierre de los poros de la madera inmediatamente después del maquinado, acciones que conjuntamente, precipitaron una pérdida en la capacidad del laminado, que terminó fallando por el punto más crítico, la línea

de cola. Tales temperaturas venían aumentando estrepitosamente, desde varios días atrás, por lo que la afectación en la madera fue mayor (Anexo E).

El autor quiere recalcar, que, durante los ensayos, el desprendimiento de piezas por las uniones *finger joint* no se presentó y si fue así no representó un problema evidente. En el caso de la Acacia, las uniones finger y su prensado se realizaron siete meses atrás.

9.12.3. Reporte propiedades mecánicas de las maderas

A continuación, en la Tabla 9.21, se hace el reporte final de las propiedades de cada material tanto para cuerpos de prueba como para la MLE de gran formato. Para el caso de la madera de Sajo y Acacia, se reportan los valores de las pruebas a partir de la totalidad de cuerpos retirados de las vigas laminadas sometidas a fractura en la prueba de flexión. En esta última prueba, se reporta el valor de la viga que alcanzó los valores más altos cuando fue llevada a rotura, en el caso de Acacia, mientras que en Sajo, se reporta el promedio para las seis vigas fracturadas. En los demás casos diferentes a la flexión estática, el valor promedio reportado tiene en cuenta la mezcla de los dos sistemas de clasificación y los tres tipos de lamelas. Para la exclusión por el percentil cinco, o quinto percentil, se reportó el valor más desfavorable entre los factores norma de clasificación y posición de la lamela, cuando el arreglo factorial lo permitía, todos los casos excepto tensión – compresión perpendicular y cizallamiento (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004).

Al comparar la información referente a las dos normativas de determinación de esfuerzos y elasticidades, que ya trae implícita una variación de tamaños, se evidencia una disminución en la mayoría de los valores de *C. panamense* Standl. exceptuando el módulo de elasticidad en flexión, que mostró un aumento interesante y más en el valor característico que casi se duplicó. La misma tendencia se manifestó en *A. mangium* Willd. con las salvedades del caso. Todo lo anterior, en la medida que los valores de densidad se mantuvieron prácticamente intactos en sendos casos.

Al cotejar los valores obtenidos en la Tabla 9.21 con los reportes de MLE, según la Tabla 9.1, la Tabla 9.2 y la Tabla 9.3, este estudio reportó menores valores para la mayoría de las características en todos los casos.

Tabla 9.21 – Reporte de los valores de resistencia y rigidez para la madera de *Campnosperma panamense* Standl. y *Acacia mangium* Willd. obtenidas en cuerpos de prueba y MLE, basándose en las normativas ASTM D 143 e ISO EN 408 + ISO/FDIS 13910, respectivamente.

Teste	Normativa		ASTM D 143		ISO EN 408 -ISO/FDIS 13910	
	Madera Presentación		Maciza Pequeñas dimensiones		MLE Combinado	
	Propiedad / Especies	Unidades	C. <i>panamense</i>	A. <i>mangium</i>	C. <i>panamense</i> 13 Lamelas	A. <i>mangium</i> 27 lamelas
Densidad seca al aire	Densidad media	Kg.m-3	426	694	426	633,2
	Densidad característica	Kg.m-3	348	590	360	543,3
Flexión Estática	Resistencia Máxima	MPa	54,7	123,9	28,9	19,5**
	Resistencia en el Límite	MPa	35,2	80,5	17,3	11,7**
	Resistencia Máxima característica	MPa	28,2	76	26,9	18,15**
	Resistencia en el Límite Característica	MPa	18	39,4	16,1	10,88**
	Módulo Elasticidad Medio	MPa	7330	13300	9474	10022**
	Módulo Elasticidad Característico	MPa	4380	6510	8871	9384,12**
Compresión Paralela	Esfuerzo Máximo media	MPa	28,4	62,5	28,7	46,7
	Esfuerzo en el Límite media	MPa	16,5	28,3		
	Esfuerzo Máximo característico	MPa	19,9	51,7	17,7	34,1
	Esfuerzo en el Límite Característica	MPa	11,2	12,6		
	Módulo Elasticidad Medio	MPa			10719	13957
	Módulo Elasticidad Característico	MPa			8030	7479
Compresión Perpendicular	Flexión Máxima media	MPa	5,74	12,8	3,22	6,85
	Flexión en el Límite media	MPa	3,45			
	Flexión Máxima característica	MPa	4,16	9,38	2,48	5,9
	Flexión en el Límite Característica	MPa	2,41	6,86		
	Módulo Elasticidad Medio	MPa		114	535,1	702,1
	Módulo Elasticidad Característico	MPa			119,1	127,3
Tensión Paralela	Esfuerzo Máximo media	MPa			16,6	20
	Esfuerzo Máximo característico	MPa			9,9	12,7
	Módulo Elasticidad Medio	MPa			10725	14548

Teste	Normativa		ASTM D 143		ISO EN 408 -ISO/FDIS 13910	
	Madera Presentación		Maciza Pequeñas dimensiones		MLE Combinado	
	Propiedad / Especies	Unidades	C. <i>panamense</i>	A. <i>mangium</i>	C. <i>panamense</i> 13 Lamelas	A. <i>mangium</i> 27 lamelas
Tensión Perpendicular	Módulo Elasticidad Característico	MPa			6494	11407
	Flexión Máxima media	MPa			0,18	
	Flexión Máxima característica	MPa			0,11	
Cizallamiento	Esfuerzo Máximo media	MPa	8,08	15,5	2,85	2,1
	Esfuerzo Máximo característico	MPa	4,28	10,6	1,68	0,79
	Esfuerzo Máximo media*	MPa			8,33	5,06
	Esfuerzo Máximo característico*	MPa			4,14	0,00

*Probetas extraídas de MLE ASTM D 143

** Datos calculados con una sola viga

Si de asignar una clasificación se tratará, la madera de *C. panamense* Standl. se clasificaría en el grupo **GL16c** y la *A. mangium* Willd. con los problemas de delaminación, en el grupo **GL11c**. En los dos casos, más allá de la clasificación en la que se puedan encasillar, se debe resolver el tema de la resistencia en tracción perpendicular, ya que los dos casos estuvo muy por debajo, mostrando relaciones de 0,31 con el grupo GL24c, el menor de esta clasificación. A propósito, algunas investigaciones han citado que cuando el elemento es muy esbelto tiende a suceder este fenómeno, el cual puede ser resuelto vía dimensiones (RANTA-MAUNUS, 2007)

A pesar de esta situación, no deja de sorprender como la madera de Sajo llegó a soportar cargas mayores a 50 veces su propio peso antes de fallar, lo cual genera nuevas expectativas en su utilización a nivel estructural. Será necesario trabajar a futuro en parámetros específicos como la resistencia en tensión perpendicular, donde se concentra su desventaja mecánica. Igualmente, se deberán adelantar acciones a escala real para obtener laminados de buena calidad con Acacia, los ambientes climatizados parecen representar una alternativa, que debe evaluarse financieramente, en conjunto con métodos sofisticados en la preparación y aplicación de adhesivos.

En el mundo entero se han adelantado experiencias de laminación con maderas de baja densidad como el Sajo y la misma *Acacia mangium* con el propósito de obtener productos

que satisfagan la industria de la construcción civil. Dejando de lado el tema de la delaminación, los resultados aquí encontrados son más que alentadores y reafirman el potencial de las dos especies en este segmento de mercado. Especies como el Paricá (*Schizolobium amazonicum* Herb.) y Balsa (*Ochroma spp*), han tenido reportes de dichas propiedades con estándares más bajos en relación a los aquí encontrados, visando usos estructurales tanto estáticos como dinámicos (CALIL NETO, 2011; GUTEMBERG et al., 2015; JOVER; SHAFIQ; VAIDYA, 2014; MOYA; MUNOZ, 2010; POLANCO, 2013; SEGUNDINHO et al., 2013, 2015; TALHITA OLIVEIRA, 2017).

9.12.4. Análisis de fallas

Las fallas originadas en el momento de la rotura, que fue estrepitosa en todas las vigas de Sajo, difieren según el principio que la ocasionó. El autor identificó tres causales de falla que se individualizan en la Figura 9.20:

- i) Por deformación vertical sin pandeo lateral, caso de las vigas de Sajo A y B.
- ii) Por pandeo lateral en combinación con deformación vertical, caso de las vigas C, D, E y G de Sajo.
- iii) Por delaminación, caso de las vigas S y V de Acacia.

En el caso i) se generó una rajadura en la zona central del peralte que recorrió la viga de extremo a extremo y simultáneamente hubo un fallo en el canto traccionado de la viga. Los cambios de dirección en las rajaduras, cuando los hubo, ocurrieron en las nudosidades importantes de la parte central. La madera involucrada en estas vigas se clasificó según la metodología propuesta de clasificación.

La situación ii) se genera un esfuerzo localizado en el punto de contacto entre el actuador y la madera, en favor del lado más cargado. Después que la madera pierde la posibilidad de desplazarse lateralmente, en ese punto se produce una rajadura que busca rápidamente la parte central traccionada de la viga y trata de generar una rajadura espejo en el lado menos cargado, pasando por anomalías como nudos si se trata de madera con la clasificación propuesta o, si en la zona de mayor carga localizada, existen uniones *finger joint* muy cercanas en lamelas sucesivas, obligatoriamente las selecciona, lo cual corresponde al caso de la madera clasificada por la NSR-10.

La delaminación de las vigas de Acacia, que corresponde al caso iii), ya fue suficientemente ilustrado.

Figura 9.20 – Fallas ocurridas para cada una de las vías de este estudio, Vigas A, B, C, D, E, y G pertenecientes a la especie *Campnosperma panamense* Standl. Vigas S y V fabricadas con la especie *Acacia mangium* Willd. Viga A: Falla por dos cargas verticales (A), Viga B: Falla por dos cargas verticales (B), Viga C: Falla por Pandeo Lateral en dos cargas verticales (C), Viga D: Falla por Pandeo Lateral en dos cargas verticales (D), Viga E: Falla por Pandeo Lateral en dos cargas verticales (E), Viga F: Falla por Pandeo Lateral en dos cargas verticales (F), Viga G: Falla por Pandeo Lateral en dos cargas verticales (G), Viga H: Falla por Pandeo Lateral en dos cargas verticales, primero posición derecha (H), Viga S: Falla por Delaminación (I) y Viga V: Falla por Delaminación (J)

9.13. Conclusiones y Recomendaciones

La metodología de cálculo de la *RR* es de gran ayuda en la corrección de valores para algunas propiedades como los momentos de inercia, módulos de resistencia y elasticidad, por ello debe adoptarse con urgencia en el país como técnica que contribuya en la declaración de grados para materias primas usadas en la fabricación de MLE. Sin duda, esta herramienta contribuirá al reporte más acertado de las propiedades mecánicas particularizadas por grados y a la utilización integral de las materias primas, mejorando el nivel de servicio en el proceso de la fabricación y comercialización.

Con los resultados en Sajo y las pruebas de confirmación en la madera de Acacia, se puede concluir que los adhesivos MUF y EPI pueden ser considerados para la elaboración de MLE con las dos especies. Deberán adoptarse los controles de calidad ya declarados y el correcto registro y seguimiento de los indicadores a lo largo del proceso de producción, con el ánimo de asegurar su funcionalidad y estabilidad. Estableciendo muchas limitaciones en los parámetros de uso en la combinación Acacia + EPI.

Según la propuesta europea EN 1194 y los valores obtenidos de las diferentes pruebas mecánicas, la madera de *Campnosperma panamense* Standl. podría catalogarse como una GL16c, si se abriera la posibilidad.

Teniendo en cuenta los resultados de las pruebas en compresión y tensión paralela, y la compresión perpendicular, además de los datos reportados para la viga V4 en *Acacia*

mangium Willd., esta MLE podría clasificarse como GL11c, aunque corrigiendo los problemas evidentes, esta madera podría fácilmente ser reportada como GL 24c (ARBELÁEZ; GÓMEZ, 2011).

Las evaluaciones de las líneas de cola en MLE deben hacerse en la fábrica, antes de salir al uso final, al respecto (ONG, 2015), expone algunos procedimientos por métodos no destructivos, desde muy manuales hasta intensivos en tecnología, que pueden ser insertados en la línea de producción, con fines de detección de delaminaciones macro y micro en tiempo real.

Se reportaron los valores de resistencia de la MLE con las dos especies, encontrando diferencias significativas ($\alpha < 0,05$) a través del estadístico de Tukey en los valores de $E_{t,0}$; $f_{t,0,k}$; $E_{c,0}$; $f_{c,0,k}$; $f_{c,90,k}$; $f_{t,90,k}$. Entre normativas hubo diferencias para $E_{t,0}$; $f_{c,0,k}$; $f_{t,90,k}$. Entre grados de lamelas se expresaron diferencias para $E_{c,0}$; $f_{c,0,k}$. Dados estos resultados, no se puede hablar de un dominio contundente de los factores o su interacción.

Referencias

ADVANCED SENSOR TECHNOLOGY INC., F. **Celda de carga tracción compresión / de tipo oblea / de acero inoxidable / de aluminio anodizado**. Disponible en: <http://www.directindustry.es/prod/futek-advanced-sensor-technology-inc/product-14287-573261.html#product-item_573272>. Acceso en: 7 out. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D143 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber**American Society for Testing and Materials, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3737 Standard Practice for Establishing Allowable Properties for Structural Glued Laminated Timber (Glulam)**American Society for Testing and MaterialsUSA, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, A. **ASTM D198. Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes**USA, 2009.

AMERICAN WOOD COUNCIL, A. **National Design Specification (NDS) Supplement: Design Values for Wood Construction**Leesburg, VA, USA, 2017.

ARBELÁEZ, E. M.; GÓMEZ, M. A. **Caracterización de las propiedades mecánicas de vigas en madera laminada con Acacia (*Acacia mangium* Willd)**. Envigado, Antioquia, Colombia: Escuela de Ingeniería de Antioquia (EIA), 2011.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA. **NSR-10, Título G Norma**

Sismoresistente ColombianaColombia, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, A. **NBR7190/2010: Projeto de Estruturas de Madeira**Brasil, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, A. Madeiras – Critérios de classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira de florestas plantadas. 2017a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, A. **PN 02 : 126 . 10-001-5 Madeira laminada colada estrutural : métodos de ensaio**Brasil, 2017b.

BOTELLO, J. P. **Resistencia de Materiales**. [s.l: s.n.].

BREYER, D. E. ; FRIDLEY, K. J. ; POLLOCK, D. G. COBEEN, K. **Design of wood structures ASD**. Fifth Edit ed. New York, NY: McGraw Hill, 2003.

CALIL NETO, C. **Madeira Laminada Colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2011.

CUBBAGE, F. et al. Global timber investments, wood costs, regulation, and risk. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 12, p. 1667–1678, dez. 2010.

DICKSON, R. L. et al. Segregation of Eucalyptus dunnii logs using acoustics. **Forest Ecology and Management**, v. 179, n. 1–3, p. 243–251, jul. 2003.

DUNKY, M.; PIZZLI, A. Wood Adhesives. In: **Surfaces, Chemistry and Applications**. [s.l.] Elsevier B.V., 1984. p. 1039–1103.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, C. **EN 408 - Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties**, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, C. **UNE EN 391:1995. Glued Laminated Timber - Delamination test of glue lines**, 1995a.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, C. **UNE EN 392:1995. Glued Laminated Timber-Shear test of glue lines**, 1995b.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, C. **UNE EN 385: 1995. Finger Jointed Structural Timber- Performance requirements and minimum production requirments**. [s.l: s.n.].

GASPAR, F.; CRUZ, H.; GOMES, A. Modeling the influence of delamination on the mechanical performance of straight glued laminated timber beams. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 447–455, 15 nov. 2015.

GOMES FERREIRA, J.; CRUZ, H.; SILVA, R. Failure behaviour and repair of delaminated glulam beams. **Construction and Building Materials**, 2017.

GUTEMBERG, P. et al. Madeira lamelada colada (MLC) com *Acacia mangium* e adesivos estruturais. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 43, n. 107, p. 533–540, 2015.

HERAWATI, E.; MASSIJAYA, M. Y.; NUGROHO, N. Performance of Glued-Laminated Beams

Made from Small Diameter Fast-Growing Tree Species. **Journal of Biological Sciences**, v. 10, n. 1, p. 37–42, 1 jan. 2010.

IDEAM, C. **Temperatura-mas-alta-de-bogota**<https://twitter.com/ideamcolombia/status/829416926212419587>. Bogotá, D.C.: [s.n.]. Disponível em: <<https://twitter.com/ideamcolombia/status/829416926212419587>>.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, I. **NCh 2165. OF91-Tensiones admisibles para la madera laminada encolada estructural de pino radiata**. Chile., 1991.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, I. **NCh 1198 OF2006 Madera - Construcciones en Madera- Cálculo** Chile, 2006.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, I. **NCh 2148.cR2010**, 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATIONS FOR STANDARDIZATION, I. **ISO/FDIS 13910:2013. Structural timber-Characteristic values of strength graded timber-Sampling full-size testing and evaluation** Switzerland, 2013.

IWAKIRI, S. et al. Características de vigas laminadas coladas confeccionadas com madeira de teca (*Tectona grandis*). **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 2, p. 269–275, 2014.

IWAKIRI, S. et al. Resistencia das juntas coladas de madeiras de Inga alba (SW) Willd e Swartzia recurva Poepp. **Cerne**, v. 21, n. 3, p. 457–463, 2015a.

IWAKIRI, S. et al. Avaliação da resistência de juntas coladas da madeira de Cryptomeria japonica e Sequoia sempervirens com diferentes adesivos. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 43, n. 105, p. 19–26, 2015b.

JOVER, N.; SHAFIQ, B.; VAIDYA, U. Ballistic impact analysis of balsa core sandwich composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 67, p. 160–169, 1 dez. 2014.

KAMAL, K. et al. Wood defects classification using laws texture energy measures and supervised learning approach. **Advanced Engineering Informatics**, v. 34, n. February, p. 125–135, 2017.

MARHENKE, T. et al. Modeling of delamination detection utilizing air-coupled ultrasound in wood-based composites. **NDT & E International**, v. 99, p. 1–12, 1 out. 2018.

MOYA, R.; MUNOZ, F. Physical and mechanical properties of eight fast-growing plantation species in Costa Rica. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 22, n. 3, p. 317–328, 2010.

ONG, C. B. Glue-laminated timber (Glulam). In: ANSELL, M. P. (Ed.). **Wood Composites**. [s.l.] Elsevier Ltd., 2015. p. 123–140.

PEI, C. **Precision LVDT Signal Conditioning Using Direct RMS to DC Conversion – Design Note 362** Technology. CA, USA: [s.n.].

PINEDA SCHLEEF, R. E. **Evaluación teórico - experimental de la Norma Chilena NCH 1198 . of2006 y su equivalente europea , eurocódigo 5 , en madera laminada encolada con uniones endentadas**. [s.l.] Universidad Austral de Chile, 2008.

PIZZI, A. **Advanced wood adhesives technology**. [s.l.] CRC Press, 1994.

POLANCO, C. Aplicación de la tecnología de maderas en la solución de un problema evidente de la industria forestal de madera aserrada. **Colombia forestal**, v. 7, n. 148, p. 153–162, 2002.

POLANCO, C. **Caracterización mecánica de la madera laminada y posibilidades para el sector de la construcción**. [s.l.] Universidad de los Andes, 2013.

RAMAGE, M. H. et al. **The wood from the trees: The use of timber in construction** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017a.

RAMAGE, M. H. et al. The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 333–359, 1 fev. 2017b.

RANTA-MAUNUS, A. **Strength of Finnish grown timber**. Helsinki, Finland: [s.n.]. v. VTT Public

RESTREPO OROZCO, H. I. **Estimación del rendimiento forestal con información espacialmente explícita y análisis financiero de plantaciones forestales en Colombia**. [s.l.] Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 2010.

SEGUNDINHO, P. G. DE A. et al. Avaliação de vigas de madeira laminada colada de cedrinho (*Erisma uncinatum* Warm.). **CERNE**, v. 19, n. 3, p. 441–449, set. 2013.

SEGUNDINHO, P. G. DE A. et al. Glued laminated timber (GLULAM) with *Acacia mangium* and structural adhesives. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 43, n. 107, p. 533–540, 1 set. 2015.

SEMANA, R. Bogotá alcanzó la mayor temperatura en 60 años. p. 1, 2017.

SINGER, F. **Resistencia de Materiales**. 2. ed. Madrid, España: Harper & Row, Publishers, 1971.

TALHITA OLIVEIRA, R. **Vigas de Madeira Laminada Colada de Paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby) Reforçadas com Fibras Sintéticas**. [s.l.] Universidade do Estado de Santa Catarina, 2017.

VISHAY PRECISION GROUP, V. T. **Load Cells and Indicators**. Rancho Cucamonga, CA, USA: [s.n.]. Disponible en: <<https://vpgtransducers.com/es>>.

WAGNER, M. et al. **Ejemplos de cálculo estructural en madera, Informe Técnico N° 182**. 2a. ed. Santiago, Chile: [s.n.].

Anexo D

Gráficas Cargas (Kg) vs Deformación (mm) en ocho vigas de MLE objeto de estudio en el presente capítulo.

Figura 9.21 - Cargas y deformaciones Fase IV Viga A4

Figura 9.22 - Cargas y deformaciones Fase IV Viga B4

Figura 9.23 - Cargas y deformaciones Fase IV Viga C4

Figura 9.24 - Cargas y deformaciones Fase IV Viga D4

Figura 9.25 - Cargas y deformaciones Fase IV Viga E4

Figura 9.26 - Cargas y deformaciones Fase IV Viga G4

Figura 9.27 - Cargas y deformaciones Fase IV Viga S4

Figura 9.28 - Cargas y deformaciones Fase IV Viga V4

Anexo E

Figura 9.29 - Reporte temperatura diaria en la Sabana de Bogotá en la semana del 08 de febrero del año 2017, días anteriores y promedio últimos años (IDEAM, 2017)

10. ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD LATERAL EN MADERAS DE *Campnosperma panamense* Standl. Y *Acacia mangium* Willd.

Resumen

El diseño de piezas de madera desconsidera el pandeo o vuelco lateral como mecanismo de optimización de las estructuras. Es una situación que se ratifica en la normativa europea (EC5), el *National Design Specification* (NDS), la normativa brasilera (NBR) y en general las normativas suramericanas. Se aborda la situación a partir de la ejecución de 172 experimentos con vigas de MLE a escala real ($7500 \times 500 \times 50 \text{ mm}^3$), que representan 51 tratamientos, en los que se cambió el número de puntos de carga (3), el número de contraventamientos (4) y se cruzaron con dos factores asociados a la especie (2) y el grado de clasificación de la MLE en el proceso productivo (2). En términos generales, de los doce casos de carga y contraventamientos, solo el 50% está representado en el NDS, que fue el estándar seleccionado para comparación de la parte experimental, pues el EC5 es más conservador a partir de cierto punto y la NBR 7190 no es asintótica respecto al número de contraventamientos. Se encontró que la madera estructural presenta cargas críticas de pandeo arriba del estándar, en porcentajes que varían según el tratamiento en ratios desde 1,3 hasta 1,96. Los valores son más altos en los casos desconsiderados por la normativa. La madera de Sajo exhibió las ratios más altas, así como la MLE fabricada con los criterios de la NSR-10. Según el Análisis de Componentes Principales (ACP), la mayor variabilidad de los datos fue causada por los desplazamientos verticales, mientras que las especies fueron menos volátiles. Se reveló que el ensayo utilizó un sistema de contraventamiento relajado, por lo que las ratios podrían ser más altas. Se recomienda incorporar los seis casos de carga y contraventamientos novedosos en los estándares de diseño y mejorar la modelación de los tratamientos en el software ABAQUS/CAE, que ha presentado unos resultados preliminares de cargas críticas de pandeo interesantes, al tratar el material como un cuerpo ortotrópico, no así en las deformaciones presentadas en las vigas del experimento anisotrópico. Tal situación puede deberse a la acción relajada de contraventamiento en contraste con la rigidez del modelo computacional cuando genera los *constraints*.

Palabras clave: Contraventamientos; Casos de carga; Momento crítico de pandeo; Carga crítica de pandeo; Eurocódigo 5; NDS 2018; NBR 1197; NSR-10; Normas de clasificación visual

10.1. Introducción

Una preocupación reciente entre investigadores e ingenieros calculistas que ha llamado la atención frente al cálculo integral con madera es la estabilidad lateral. Al parecer las normativas resultan muy conservadoras cuando se aborda este tema, pues en los últimos

años, viene tomando fuerza la escritura de documentos técnicos y científicos al respecto. El soporte técnico en el que se basan tales escritos tiene su origen en los postulados de Stephen Timoshenko y posteriormente, sus colaboradores como James Gere (S. TIMOSHENKO; J.M. GERE, 1963; TIMOSHENKO, 1957). Más adelante, autoridades en el tema maderero como; Ylinen, Madsen, Hooley, Kirby, entre otros (KIRBY; NETHERCOT, 1979; MADSEN, 1992; MADSEN; BARRET, 1976; R. F. HOOLEY; B. MADSEN, 1964; YLINEN, 1956), hicieron posible la aplicación de los conceptos de Timoshenko en la madera y aún hoy para el caso de estudio particular, representan la base de cálculo de las normativas en Norteamérica, Europa y la mayoría de países latinoamericanos (AMERICAN WOOD COUNCIL, 2017; ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA, 2010; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996; EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006; PARMIGIANI et al., 2013). Otras pesquisas han encontrado que el fenómeno de estabilidad puede ser ajeno al supuesto teórico original de Timoshenko, y hasta resultar contradictorio cuando se compara directamente con resultados experimentales, por lo que recomiendan ajustes drásticos en los supuestos para su aplicación en madera (ABRANTES, 2012).

No solo la aplicación final de los productos debe ser objeto del cálculo por estabilidad lateral. Se ha comprobado que algunas estructuras en madera y concreto han fallado por inestabilidad lateral durante su instalación o transporte, de ahí que el fenómeno sea estudiando a profundidad (DE LA FUENTE ANTEQUERA; PIALARISSI CAVALARO; BAIRÁN GARCÍA, 2017; HANSSON; LARSEN, 2005).

Las normativas suministran a los usuarios metodologías basadas en la teoría clásica, corregidas para estabilidad lateral, aplicables a ciertas condiciones específicas, a través de diferentes factores establece valores para los parámetros necesarios, para finalmente definir el cumplimiento o no de la condición. En síntesis, la estabilidad lateral hace parte de la lista de chequeo en el proceso de análisis y diseño estructural. Es así como por ejemplo las normas basadas en el *National Design Standard for Wood Construction* (NDS) (AMERICAN WOOD COUNCIL, 2018), establecen la forma de cálculo del parámetro o factor de estabilidad de vigas (C_L), como una medida de castigo del material en las propiedades de flexión, en el caso prevenir el pandeo lateral. Por su parte el Eurocódigo 5, hace alusión al cálculo del factor crítico de pandeo (k_{crit}), como un paliativo de la propiedad del material en flexión (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2006). La norma brasilera aunque no

hace expresa la certificación a estabilidad lateral, de manera más sensata abre la posibilidad para usar alguna teoría que haya sido comprobada experimentalmente (CALIL; LAHR; DIAS, 2010), y específicamente se basa en los coeficientes β_M y γ_f , como una medida de afectación de las variables de resistencia y elasticidad en flexión según la esbeltez de la pieza de madera. El caso argentino, chileno y colombiano hacen alusión al procedimiento del NDS (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA, 2010; PARMIGIANI et al., 2013; RESTREPO OROZCO, 2010)(INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 2006).

Aterrizando un poco el tema en Colombia, el autor ha tendido contacto directo con la industria de la transformación de madera y es consciente de la necesidad de trabajar los temas técnicos de cálculo estructural sobre la base de materias primas que puedan otorgar a futuro posibilidades de suministro continuado de material. En esa línea de trabajo hay dos especies que pueden representar una participación muy grande en el mercado de la madera. La madera de *Camnosperma panamense* Standl. proveniente de bosques naturales del Pacífico colombiano y la madera plantada *Acacia mangium* Willd.

Para hacer un suministro confiable de madera el autor está convencido que la madera primero debe clasificarse en función de sus anomalías, que aparentemente repercuten en los valores de sus propiedades mecánicas, para entregar productos al mercado en diferentes grados obtenidos por clasificación visual y mecánica (LAM; OH, 2018). Segundo, se debe aprovechar la mayor cantidad de material provenientes de los árboles, y eso se logra a partir de la reconstitución de las piezas, pasando por procesos técnicos de transformación en cosecha, secado, re-manufactura y encolado para tal fin. Si se logra hacer uso de la mayor parte del árbol en una sola gama de productos, sin duda mejorarán los niveles de aprovechamiento, reduciendo los costes en toda la cadena de suministro de materiales. Una de las líneas de producto que satisfacen estos requerimientos sin duda son aquellos laminados encolados (MLE). Y tercero, si los productos elaborados pudieran aprovechar al máximo sus propiedades reportadas, al mejorar la geometría que potencie el módulo de resistencia, se estaría frente a una alternativa que verdaderamente promovería la utilización de un producto forestal en el campo de la ingeniería con excelentes perspectivas (PORTEOUS, 2015).

Ya en los capítulos anteriores, se han abordado la primera y segunda etapa de esta secuencia lógica, que procura la integración óptima de la cadena de suministro, de manera que

rinda frutos en pro de la sostenibilidad del recurso forestal, menor desperdicio y consumo responsable con el ambiente.

Atendiendo el tercer componente, en este capítulo el autor pretende comprobar la eficacia de elaborar productos muy esbeltos para ser usados como vigas estructurales en el sector de la construcción, con el indicio que madera muy esbelta, redundará en mayores momentos de inercia y por tanto responderá mejor a los momentos de resistencia exigidos por las cargas actuantes. En la dirección del plano de la madera, se reportarán los mayores valores de resistencia; no obstante, inevitablemente habrá una proclividad al pandeo lateral, el cual deberá ser resuelto vía contraventamientos, los cuales pueden y deben representar todas las garantías necesarias, incluso con holguras de seguridad en la capacidad exigida a las vigas, cumpliendo las normativas, a la vez que reducen los costes en la utilización del material. Se presume que es más económico pagar por más contraventamientos laterales con vigas principales más espaciadas, frente a la alternativa de costear muchas vigas principales no esbeltas, poco espaciadas y sin contraventamientos. Ahora bien, el hecho de usar vigas muy esbeltas puede reñir con los objetivos arquitectónicos de mayores alturas, ¡cierto!, este es un reto que, de funcionar, se asumirá después de la mano con los diseñadores.

Además, la idea de colocar contraventamientos en las vigas no es nueva, experiencias del autor en evaluación de estructuras antiguas, da cuenta de esta práctica en los años 1940's en la ciudad de Bogotá, D.C., según se puede comprobar en la Figura 10.1.

Figura 10.1 - Práctica de colocación de trabas en la zona de compresión de la madera sometida a esfuerzos de flexión estática (A). Procedimiento aplicado a vigas completamente arriostradas en el canto de compresión ($d/b \approx 3$) (B).

10.2. Abordaje del Pandeo Lateral

10.2.1. Generalidades

La comprobación de la estabilidad lateral en vigas en madera es un aspecto fundamental para su uso estructural en grandes dimensiones, así lo demuestra el desarrollo de este capítulo en las normas europeas, norteamericanas. Pero aún la mayoría de normativas en latino-américa no le han dedicado un espacio suficiente (CAMICON; MIDUVI, 2014). Lo importante es que la temática ha venido ganado terreno, dada su importancia para la generación de grandes vanos en las estructuras. Países como Colombia y Argentina se han basado en la normatividad chilena que a su vez, ha sido desarrollada para *Pinus radiata* (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA, 2010; PARMIGIANI et al., 2013), desconociendo en gran sentido, las variaciones para las especies nativas y de reforestación, típicamente usadas en construcciones.

Sin embargo, Chile que basa su normativa de cálculo y diseño estructural en la normativa norteamericana NDS (AMERICAN WOOD COUNCIL, 2018), y de apoyo como ASTM D 3737 (INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 2006), realizó el año 2007 ajustes sustanciales tendientes a dar una mayor rigurosidad en la forma de cálculo del pandeo lateral para vigas en madera laminada encolada, tomando aspectos del Eurocódigo 5 y las normas de la AITC (GALLEGUILLLOS; GIULIANO; DECHENT, 2007; WAGNER et al., 2014).

Las vigas en general soportan altas cargas cuando estas son aplicadas en su plano, sin embargo, pueden pandear lateralmente cuando dicha carga se hace muy grande. Tal carga se llama carga crítica de pandeo (P_{cr}). El concepto se basa en que las vigas son mucho más rígidas en su plano que fuera de este. En tal sentido, además de la carga aplicada, la geometría de la viga es muy relevante para el pandeo.

De acuerdo a Timochenko y Gere (1961) citado por (ARGÜELLES; ARRIAGA; MARTÍNEZ, 2000), la inestabilidad lateral o vuelco lateral se presenta cuando las cargas aplicadas en el eje Y de la viga generan desplazamientos laterales de la sección en el plano Z acompañados de giro, haciendo que la sección transversal de la viga actúe como una columna, esto se ratifica cuando el momento generado sobrepasa el valor del momento crítico calculado.

10.2.2. Teoría de pandeo lateral para vigas de Timoshenko

El libro clásico de La Teoría de la Estabilidad Elástica, aborda y desarrolla en detalle el tema de la estabilidad en vigas generalizadas (S. TIMOSHENKO; J.M. GERE, 1963). Cuando las cargas en el plano de una viga son sobrepasadas, sin estar necesariamente en la región inelástica, las vigas pueden experimentar pequeñas deformaciones laterales, cuya explicación está a cargo de varios elementos a saber: i) Las condiciones de apoyo, ii) las características intrínsecas del material, iii) la presencia de contraventamientos o trabas laterales, iv) la posición y dirección de la carga ejercida, v) el valor de dicha carga, vi) la presencia de anomalías en el material, vii) la homogeneidad de este, viii) la geometría de la viga, ix) la resistencia a la torsión, y x) la combinación adecuada de todas ellas. Esas deformaciones iniciales laterales se originan por la situación más susceptible, pudiendo desembocar en desequilibrios totales del sistema, que pueden terminar en colapso de las piezas o las mismas estructuras. Si se considera la viga en dos planos, es posible representar el pandeo, a partir de ecuaciones diferenciales de equilibrio para la viga deflectada, y no solo eso, a partir de las mismas ecuaciones, se pueden obtener los valores críticos de esas cargas, a partir de los cuales se perdería el equilibrio.

La ecuación a la que llega Timoshenko, es aplicable a condiciones muy particulares como que i) la viga está cargada en el eje neutro, ii) está simplemente apoyada, iii) no posee libertad para torsionar en su totalidad y, iv) la viga es sometida a momento constante, en otras palabras, es una condición ideal o teórica:

$$M_{cr} = \frac{\pi}{l} \sqrt{EI_y GJ} \quad \text{Ecuación 10.1}$$

Donde:

- M_{cr} : Momento crítico para el caso referido por Timoshenko
- l : Longitud no arriostrada
- E : Módulo de elasticidad longitudinal
- I_y : Momento de inercia en el eje débil
- G : Módulo de corte torsional
- J : Constante torsional de la sección

No obstante, la aplicación directa de la ecuación en materiales como madera tiene inconvenientes y genera errores, sobre todo cuando no se tienen a la mano la totalidad de propiedades de un elemento anisotrópico o por lo menos ortotrópico. Es por ello, que debe

hacerse una adaptación de los conceptos de la formulación para llevarla a un material como la madera. En ese sentido, la siguiente sección explica en que consiste la adaptación.

10.2.3. Adaptación de la fórmula original de M_{cr} de Timoshenko al caso de madera (AWC)

Aunque la adaptación presentada fue publicada hace más de 50 años, es necesario revisarla, ya que los estándares en que se basa para su utilización, exige altos factores de modificación en favor de la seguridad (R. F. HOOLEY; B. MADSEN, 1964).

$$M_{cr} = \frac{\pi C_b C_e}{C_{fx} l_u} \sqrt{\frac{E_{y,0.05} I_y G_{t,0.05} J}{\gamma}} \quad \text{Ecuación 10.2}$$

Donde:

- M_{cr} : Momento crítico para el caso referido por AWC
- C_b : Factor del momento equivalente para diferentes condiciones de cargamento y soporte
- C_e : Factor de reubicación de cargas en el canto comprimido o traccionado según sea el caso
- C_{fx} : Condiciones de apoyo en los extremos
- l_u : Longitud no arriostrada
- $E_{y,0.05}$: Módulo de elasticidad del eje débil ajustado al percentil 5
- I_y : Momento de Inercia del eje débil
- $G_{t,0.05}$: Módulo de corte torsional ajustado al percentil 5
- J : Constante torsional
- γ : Factor de ajuste por esbeltez

10.2.4. Enunciados de las diferentes normativas internacionales referentes al pandeo lateral

10.2.4.1. Eurocódigo 5 - UNE EN 408

El Eurocódigo ofrece una alternativa viable y bien desarrollada para el cálculo para el momento crítico de pandeo (AENOR, 2006; EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004). El momento crítico fue definido por Flint (1950) y Attard (1995) en la Ecuación 10.3 y aplica para vigas rectas, de sección rectangular, biapoyadas con flexión constante. Se destaca que si la carga crítica de pandeo ($\sigma_{m,crit}$) es sobrepasada entonces la viga entra a un equilibrio inestable sin deformarse, en el caso que las deformaciones se hagan presentes, la viga estaría en equilibrio indiferente.

$$M_{crit} = \left(\frac{\pi}{l}\right) \left(\sqrt{\frac{E I_z G I_t}{1 - \frac{I_z}{I_y}}} \right) = \sigma_{m,crit} \cdot W \quad \text{Ecuación 10.3}$$

Donde:

M_{crit} : Momento crítico a partir del cual se genera el pandeo lateral

l : Longitud de la viga

E : Módulo de elasticidad longitudinal

I_z : Momento de inercia de la viga para el eje z-z: $\left(\frac{hb^3}{12}\right)$

G : Módulo de elasticidad transversal

I_t : Módulo de torsión: $\left[\left(\frac{hb^3}{3}\right) \left(1 - 0.63 \frac{b}{h}\right)\right]$

I_y : Momento de inercia de la viga para el eje y-y: $\left(\frac{bh^3}{12}\right)$

$\sigma_{m,crit}$: Tensión crítica de pandeo para vigas sometidas a flexión

W : Módulo de resistencia: $\left(\frac{bh^2}{6}\right)$

h : Altura o peralte de la viga

b : Base de la viga

En el caso que la forma de apoyo cambie, l debe ser reformulado con la ecuación 10.4

$$l_{ef} = \beta_v \cdot l \quad \text{Ecuación 10.4}$$

Donde:

l_{ef} : Longitud efectiva de la viga

β_v : Coeficiente aplicado según el tipo de apoyo, según la condición de carga y el tipo de restricción de apoyos, varía de 0,8 a 1, para vigas simplemente apoyadas o de 0,5 a 0,8 para vigas en voladizo.

Si la carga se apoya en el canto comprimido la l_{ef} de la viga deberá aumentarse en $2h$, si se hace en el canto traccionado, se disminuye en $\frac{1}{2}h$.

Para una viga recta la tensión crítica de pandeo puede expresarse en función de los siguientes parámetros (ARGÜELLES; ARRIAGA; MARTÍNEZ, 2000):

$$\sigma_{m,crit} = \left(\frac{\pi b^2 E}{h l}\right) \left(\sqrt{\frac{G}{E}}\right) \left(\sqrt{\frac{1 - 0.63 \frac{b}{h}}{1 - \frac{b^2}{h^2}}}\right) = C \frac{b^2 E}{h l} \quad \text{Ecuación 10.5}$$

La anterior aseveración puede permitir la simplificación en el cálculo de la tensión crítica de pandeo. Si, por ejemplo, se usa una relación $E/G = 16$, haría que $C \approx 0,75$, para variadas relaciones b/h , como se evidencia en la Ecuación 10.6.

$$\sigma_{m,crit} = 0,75 \frac{b^2 E_k}{h l_{ef}} \quad \text{Ecuación 10.6}$$

A pesar del menor peso específico de la relación b/h respecto a E/G en el cálculo de C de la ecuación anterior, resulta importante comprobar las secciones b y h a partir de la esbeltez relativa en flexión $\lambda_{rel,m}$, definida en la ecuación 10.7.

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad \text{Ecuación 10.7}$$

Donde:

$\lambda_{rel,m}$: Esbeltez relativa en flexión

$f_{m,k}$: Resistencia característica en flexión

El valor de $\lambda_{rel,m}$ es fundamental para el cálculo de la tensión solicitada en flexión $\sigma_{m,d}$, a partir de la resistencia calculada en flexión $f_{m,d}$, modificada por el factor de pandeo crítico k_{crit} , donde se debe dar estricto cumplimiento a la ecuación 10.8.

$$\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} \leq 1 \quad \text{Ecuación 10.8}$$

Donde el valor de k_{crit} se calcula según el caso al que corresponda de la Tabla 10.1.

Tabla 10.1 – Determinación de k_{crit} según el valor de la esbeltez relativa en flexión $\lambda_{rel,m}$

k_{crit}	$\lambda_{rel,m}$
1	$< 0,75$
$1,56 - 0,75 \lambda_{rel,m}$	$0,75 \leq \lambda_{rel,m} < 1,4$
$1/\lambda_{rel,m}^2$	$1,4 \leq \lambda_{rel,m}$

Los valores de modificación para las tensiones de diseño se explican a continuación según la Ecuación 10.9.

$$f_{m,d} = k_{mod} \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} \quad \text{Ecuación 10.9}$$

Donde

$f_{m,d}$: Corresponde a la propiedad de diseño

$f_{m,k}$: Valor característico de la propiedad, generalmente corresponde al 5° percentil de la distribución estadística de los resultados de los ensayos

γ_M : Coeficiente parcial de seguridad para el material con los siguientes valores:

Estados límites últimos

Combinaciones fundamentales: 1,3

Combinaciones accidentales: 1,0

Estados límites de servicio: 1,0

k_{mod} : Factor de modificación que tiene en cuenta la duración de la carga y el contenido de humedad en los valores resistentes. La Tabla 10.2 otorga los valores para diferentes condiciones de servicio.

Tabla 10.2 – Valores de k_{mod} para madera laminada

Clase de duración de la carga	Clase de servicio		
	1	2	3
Permanente	0,60	0,60	0,50
Larga duración	0,70	0,70	0,55
Media duración	0,80	0,80	0,65
Corta duración	0,90	0,90	0,70
Instantánea	1,10	1,10	0,90

*Para combinaciones de cargas con diferentes tipos de duración, se debe elegir el k_{mod} más alto.

De esta forma, el Eurocódigo 5 presenta clara y simplificada el diseño por pandeo lateral. No obstante la expresión E/G , merece especial atención, pues debería ser considerada una relación constante para cada especie particular, variando en el rango 16 a 25 según la recomendación de la Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC, 1984) y no una generalidad para todas la especies, más cuando la ecuación 10.3 del Eurocódigo 5 es muy sensible a cambios en esta relación de módulos de elasticidad longitudinal y módulo de cortante, incluso por encima de la relación h/b calculada.¹⁰

10.2.4.2. Normativa norteamericana adaptada al caso chileno

La estabilidad lateral para vigas es mencionada en la norma chilena como uno más de los factores de modificación de resistencia en MLE. El factor es simbolizado con la expresión $k_{\lambda v}$, y conocido como factor de modificación por volcamiento, el cual debe aplicarse ante la posibilidad de inestabilidad lateral en vigas, siempre que la relación $h/b > 2$, en los demás casos el factor $k_{\lambda v} = 1$.

Como en la versión del caso original NDS 2018, (AMERICAN WOOD COUNCIL, 2018), la NCh 1198 presenta 12 diferentes condiciones de apoyo lateral con igual número de tipos de carga a lo largo del vano de la viga. También acude al concepto de longitud efectiva de volcamiento (l_v), que es análogo a la determinación de la longitud de pandeo en columnas (INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 2006).

¹⁰ Ejercicios teóricos del autor.

El valor de l_v depende de cada caso de carga propuesto en la Figura del Anexo G, donde se presenta como l_u y en donde l_a hace referencia a la distancia entre puntos de apoyo lateral en el canto flexo-comprimido. Las formas de cálculo de l_v son exhibidas en las Ecuaciones del mismo Anexo G. En el caso que la viga sea parte de un diafragma rígido la longitud efectiva de volcamiento es cero (PINEDA SCHLEEF, 2008).

Con los datos geométricos de las vigas referentes a sección transversal, base y altura, junto con la longitud efectiva de volcamiento, se puede calcular un coeficiente de esbeltez de volcamiento de la viga laminada encolada λ_v , usando la Ecuación 10.10. Esto aplica solo si su valor no sobrepasa el tope máximo de 50. Se destaca que esta normativa afecta el momento de inercia de la MLE por el Ecuación 10.10.

$$\lambda_v = \sqrt{\left(\frac{l_v h}{b^2}\right)} \quad \text{Ecuación 10.10}$$

Donde:

- λ_v : Función de esbeltez de volcamiento
- l_v : Longitud efectiva de volcamiento de la viga, mm
- h : Altura o peralte de la viga, mm
- b : Base de la viga, mm

El NDS y por ende la normativa chilena establece a $k_{\lambda v}$ como el factor de modificación por volcamiento calculado a partir de la Ecuación 10.11.

$$k_{\lambda v} = \frac{1 + \left(\frac{F_{fE,ml}}{F_{f,dis}^*}\right)}{1,9} - \sqrt{\left[\frac{1 + \left(\frac{F_{fE,ml}}{F_{f,dis}^*}\right)}{1,9}\right]^2 - \frac{\left(\frac{F_{fE,ml}}{F_{f,dis}^*}\right)}{0,95}} \quad \text{Ecuación 10.11}$$

Donde:

- $F_{f,dis}^*$: Tensión de diseño en flexión para *P. radiata* laminado horizontalmente, ya ponderada por los factores de modificación aplicables, excepto $k_{\lambda v}$ y k_v , MPa.
- $F_{fE,ml}$: $\frac{0,61 E_{dis}}{\lambda_v^2}$, calculada para MLE, también se reporta como: $\frac{1,2 E_{min}}{\lambda_v^2}$, MPa (ZAMBRANO TRIVIÑO, 2012)
- E_{dis} : Módulo de elasticidad de diseño para *P. radiata* laminado horizontalmente, ponderado por 0,95, MPa
- E_{min} : Módulo de elasticidad mínimo para *P. radiata* laminado horizontalmente
- λ_v^2 : Función de esbeltez de volcamiento al cuadrado

Con la expresión $k_{\lambda v}$ ya conocida, es posible calcular la tensión de diseño en flexión considerando la estabilidad lateral $F_{fv,dis}$, para madera laminada horizontalmente ponderada por el factor de volcamiento $k_{\lambda v}$, según la Ecuación 10.12.

$$F_{fv,dis} = F_{f,dis} \cdot k_{\lambda v} \quad \text{Ecuación 10.12}$$

El valor de $F_{f,dis}$ se puede calcular para la zona flexo-traccionada ($F_{ft,dis}$) o flexo-comprimida ($F_{fv,dis}$) según sea el caso, afectando los valores básicos por los siguientes coeficientes:

$$F_{ft,dis} = F_f \cdot K_H \cdot K_D \cdot K_C \cdot K_v, \text{ MPa} \quad \text{Ecuación 10.13}$$

$$F_{fv,dis} = F_f \cdot K_H \cdot K_D \cdot K_C \cdot k_{\lambda v}, \text{ MPa} \quad \text{Ecuación 10.14}$$

En el procedimiento práctico se debe elegir el menor valor de las dos expresiones anteriores como la situación limitante.

Donde:

$F_{ft,dis}$: Tensión de diseño en flexión en el borde traccionado, MPa

$F_{fv,dis}$: Tensión de diseño en flexión en el borde a compresión, considerando la inestabilidad lateral o por volcamiento MPa

F_f : Tensión admisible en flexión reportada en la Tabla 9.21, la cual se afecta por la razón de resistencia $RR_{f,i}$, descrita en marco teórico en la sección de calidad de la madera y nudos, MPa

K_H : Factor de modificación por contenido de humedad

K_D : Factor de modificación por duración de la carga

K_C : Factor de modificación por trabajo conjunto (No es objeto de la presente investigación)

K_v : Factor de modificación por volumen, afecta la zona flexo-traccionada de la VLC

$k_{\lambda v}$: Factor de modificación por volcamiento o pandeo lateral, afecta la zona flexo-comprimida de la VLC

Al final la tensión crítica de pandeo será evaluada por la formulación presentada en la Ecuación 10.15:

$$\frac{\sigma_{m,d}}{F_{f,dis} \cdot k_{\lambda v}} \leq 1 \quad \text{Ecuación 10.15}$$

Es de aclarar que la normativa chilena acompaña la anterior ecuación con los valores críticos a cortante y las deformaciones críticas calculadas para sobrecargas y sobrecargas más cargas muertas. En síntesis, el factor de pandeo lateral está al nivel del factor de volumen.

10.2.4.3. Normativa brasilera (NBR 7190)

La norma brasilera para estructuras de madera (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996), manifiesta que en las vigas sometidas a flexión, deben respetar las condiciones de seguridad referidas a:

$$\sigma_{c1,d} \leq f_{cd} \quad \text{Ecuación 10.16}$$

$$\sigma_{t2,d} \leq f_{td} \quad \text{Ecuación 10.17}$$

Donde:

$\sigma_{c1,d}$, $\sigma_{t2,d}$: Tensiones actuantes calculadas para la zona comprimida y traccionada de la sección transversal considerada, respectivamente.

f_{cd} , f_{td} : Resistencias a compresión y tracción de la madera.

Los valores de las tensiones actuantes son calculados de la siguiente manera:

$$\sigma_{c1,d} = \frac{M_d}{W_c} \quad \text{Ecuación 10.18}$$

$$\sigma_{t2,d} = \frac{M_d}{W_t} \quad \text{Ecuación 10.19}$$

Donde:

M_d : Momento flector requerido por las cargas actuantes

W_c , W_t : Módulo de resistencia de la sección transversal parcial de la viga sometida a compresión o tracción, respectivamente.

Los valores de las propiedades de resistencia y rigidez de la madera se calculan con Ecuación 10.18 y merecen especial atención los valores de módulo de elasticidad ($E_{co,ef}$) y resistencia en compresión paralela ($f_{c0,d}$).

$$f_{m,d} = k_{mod} \frac{f_{m,k}}{\gamma_w} \quad \text{Ecuación 10.18}$$

Donde:

$f_{m,d}$: Valor de cálculo de la resistencia

$f_{m,k}$: Valor característico de la propiedad, generalmente corresponde al 5° percentil de la distribución estadística de los resultados de los ensayos

γ_w : Coeficiente parcial de seguridad para el material, $\gamma_w = 1,4$ para compresión paralela, $\gamma_w = 1,8$ para tracción paralela y cizallamiento paralelo.

k_{mod} : Factor de modificación que tiene en cuenta la duración de la carga (k_{mod1}), el contenido de humedad en los valores resistentes (k_{mod2}) y la calidad visual de la madera (k_{mod3}).

$k_{mod3} = 0,8$, para madera de segunda categoría, y $k_{mod2} = 1$ para madera de primera categoría.

Para el caso específico de la estabilidad lateral la norma dedica un espacio para indicar el distanciamiento mínimo entre contraventamientos y aclara que esta teoría debe comprobarse experimentalmente, a menos que los elementos no tengan la posibilidad de rotar o estén trabados con piezas a una distancia tal que satisfagan el distanciamiento mínimo dado por la Ecuación 10.19.

$$\frac{L_1}{b} \leq \frac{E_{co,ef}}{\beta_M f_{c0,d}} \quad \text{Ecuación 10.19}$$

Donde:

L_1 : Separación entre los elementos de trabamiento

b : Base de la viga sometida a pandeo lateral

$E_{co,ef}$: Módulo de elasticidad en compresión paralela

$f_{c0,d}$: Resistencia en compresión paralela

β_M : Se calcula con la Ecuación 10.20

$$\beta_M = \frac{1}{0,26 \cdot \pi} \cdot \frac{\beta_E}{\gamma_f} \cdot \frac{\left(\frac{h}{b}\right)^{\frac{3}{2}}}{\left(\frac{h}{b} - 0,63\right)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{Ecuación 10.20}$$

Donde:

$$\beta_E = 4, \quad \gamma_f = 1,4$$

h : Corresponde a la altura de la viga

Cuando la relación es:

$$\frac{L_1}{b} > \frac{E_{co,ef}}{\beta_M f_{c0,d}} \quad \text{Ecuación 10.21}$$

Se debe cumplir:

$$\sigma_{c1,d} \leq \frac{E_{co,ef}}{\beta_M \left(\frac{L_1}{b}\right)} \quad \text{Ecuación 10.22}$$

Lo que es equivalente a:

$$\frac{\sigma_{c1,d}}{f_{c0,d}} \leq 1 \quad \text{Ecuación 10.23}$$

Donde:

$\sigma_{c1,d}$: Tensión actuante en el canto comprimido de la viga

10.2.5. Caso específico de Metsä

El autor ha traído a colación el caso de la empresa finlandesa Metsä, dado que en el año 2016 tuvo contacto personal con el director de I&D, Jouni Hakkarainen y su colaborador en Francia Cedric Lecomte, quienes manifestaron una cruzada empresarial para cambiar el EC5 antes del 2025, pues de acuerdo a resultados de laboratorio a escala real y liderados por ellos sobre madera microlaminada de tipo LVL, la normativa castiga con valores muy altos los valores de resistencia de estos materiales. Tal situación se ve reflejada en las cargas críticas por pandeo determinadas experimentalmente, las cuales pueden ser hasta cuatro veces y media mayores, si se les compara con las cargas críticas de pandeo calculadas por la normativa europea vigente (HAKKARAINEN, 2016). Detalles de la comunicación establecida pueden ser consultados en el Anexo H.

10.3. Determinación de la Información Previa y Definiciones Importantes para el Capítulo

10.3.1. Especies

Las maderas usadas en la presente investigación provienen de las especies *Campnosperma panamense* Standl. (Sajo) y *Acacia mangium* Willd. (Acacia), provenientes del bosque natural del Pacífico colombiano y plantaciones en el Noroccidente del país, respectivamente. La madera fue procesada técnicamente, conforme se ha venido explicando a lo largo del documento (Capítulo 4).

10.3.2. Normas de clasificación del material y grados visuales

Para el proceso constructivo de la MLE se usaron dos grados de madera. Estos grados fueron filtrados después de un estudio riguroso sobre las anomalías presentes en cada una de las especies y la clasificación por volumen, de tal suerte, que se pudiera hacer el mayor uso de las piezas de madera que provienen del bosque, sin comprometer la calidad del laminado estructural. Un mayor detalle de los procesos de cuantificación y clasificación y sus desperdicios puede encontrarse en el Capítulo 3 referente a las anomalías de la madera.

Las dos normativas usadas para la clasificación de la madera fueron la NSR-10 (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA, 2010) y una clasificación propuesta por el autor. Los términos de referencia de la normativa y la clasificación propuesta (CP) son mostradas en el capítulo de anomalías de la madera. Adicionalmente, el autor intercaló diferentes grados de material por tipo de clasificación al interior de las vigas, pretendiendo el grado visual más alto en las lamelas de los extremos, el grado visual más bajo en las lamelas del centro de las vigas y el grado medio en las lamelas posicionadas en el intermedio. Adicionalmente, el proceso constructivo, determinó que los *blocks* de las lamelas extremas fueron de 810 mm, las lamelas intermedias entre 300 - 810 mm y las lamelas del centro en el intervalo 180 - 500 mm, en la mayoría de los casos.

Lo enunciado en el párrafo anterior, particularmente modificó los momentos de inercia de la forma en que se muestra en el capítulo de reporte de las propiedades mecánicas de la madera laminada encolada; pues los módulos de elasticidad en piezas retiradas por cada

grado y cada sistema de clasificación no siempre siguieron el ordenamiento de la clasificación visual. Esto último, se puede comprobar en el capítulo reporte en la obtención de MLE para Colombia, específicamente en la Tabla 9.5.

10.3.3. Cálculo del número de contraventamentos para cada normativa estudiada

Además de implementar modelos en el programa Excel para verificar el cumplimiento de los criterios de cada norma de cálculo estructural, donde la decisión es cumple o no cumple a partir de la aplicación de las inecuaciones finales (Ecuaciones 10.6, 10.13 y 10.21), y con el fin de hacer comparable la forma en que cada normativa aborda el tema de pandeo lateral, el autor diseñó un ejemplo con las cargas referentes a la Fase I de este trabajo, ejecutando las ecuaciones de los tres estándares y su forma de cálculo independiente; solo que al final, se llevó el diseño al límite de la aceptación, forzando los modelos al extremo por causa del pandeo lateral. Para ello, se verificaron las igualdades de las Ecuaciones 10.24, 10.25 y 10.26, no las inecuaciones, haciendo uso de la programación no lineal, con el objetivo de maximizar la carga puntual actuante, que por definición correspondería a la carga de pandeo crítico. Se repitió el procedimiento para diferente número de contraventamentos obteniendo la curva típica de contraventeo límite.

$$F, \text{ que satisfaga la relación de la UNE 408: } \frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} \leq 1 = 0,99 \quad \text{Ecuación 10.24}$$

$$F, \text{ que satisfaga la relación de la NBR 7190: } \frac{\sigma_{c1,d}}{f_{co,d}} \leq 1 = 0,99 \quad \text{Ecuación 10.25}$$

$$F, \text{ que satisfaga la relación de la NCh 1198 (NDS 2018): } \frac{\sigma_{m,d}}{F_{f,dis} \cdot k_{\lambda v}} \leq 1 = 0,99 \quad \text{Ecuación 10.26}$$

10.3.4. Función de convolución

Cuando la salida de datos proveniente de instrumentos de medición usados en fases experimentales o casos de a vía real es registrada, los datos pueden presentar un alto grado de dispersión, no por causa de la variable, sino por el elemento o instrumento usado para su medición. Con el fin de depurar la salida de estas señales, se pueden aplicar varias metodologías, entre ellas la función de convolución. El filtro de convolución realiza una

remoción de la alta frecuencia de los datos en una ventana predefinida, con el fin de mejorar su visualización y procesamiento (THE MATHWORKS, 2015). A modo de ejemplo, a continuación, se dan a conocer dos gráficas de la misma variable registrada en la fase de experimentación, la gráfica con alta dispersión, obedece al dato prístino y la línea que pasa por su centroide corresponde a la misma información filtrada por la función de convolución (Ver Figura 10.2).

Figura 10.2 - Ejemplo de la aplicación de la función de convolución en el software Matlab 2015b¹¹. A la izquierda para una celda de carga de 5 t (A), a la derecha para un lector láser (B).

10.4. Diseño Experimento

El experimento diferenció dos factores para los tratamientos a saber: i) Las Fases o número de cargas aplicadas durante la ejecución del ensayo y ii) Los Tratamientos o número de trabas, también llamadas arriostramientos o contraventamientos laterales.

En el primer caso (i), el experimento contó con cuatro fases, la cuales se referencian con números romanos (I, II, III, IV) o números arábigos más letras (1- Carga, 2- Cargas, 4- Cargas, 2-Cargas hasta la rotura). Cada una de ellas se caracterizó por el número de cargas de aplicación simultánea a las vigas de MLE. Así, en la Fase I, se usó un actuador, la Fase II, dos actuadores, la Fase III, dos actuadores con cuatro puntos de aplicación de carga, y la Fase IV, usó dos actuadores con sendos puntos de aplicación de carga, pero con la novedad que las vigas fueron llevadas al punto de rotura. En las Fases I, II y III, la madera fue sometida a cargas

¹¹ Licenciado por la Universidad de los Andes

dentro del límite elástico durante al menos 300 s. En el segundo caso (ii), el número de trabas hacia referencia a las restricciones laterales usadas para cada ensayo. Se usaron números arábigos para su denominación (1,2,3, 4) o números arábigos y letras (0- Trabas, 1- Traba, 2- Trabas, 4- Trabas), también.

La combinación de cuatro casos de carga y cuatro tipos de contraventamiento dió origen a 13 Tratamientos según se especifica en la

Tabla 10.3. El tratamiento 13, que fue donde la madera se llevó a punto de rotura, se implementó para otorgar las propiedades en la prueba de flexión estática del Capítulo anterior. A pesar de representar el mismo montaje, el tratamiento trece se diferencia del tratamiento ocho, en el hecho que este último, solo reportó información concerniente a cargas y deformaciones hasta el pandeo lateral, objeto de estudio de la presente sección.

Tabla 10.3 – Denominación de los tratamientos en función de los factores empleados.

Factores de la Investigación	Fase I	Fase II	Fase III	Fase IV
0 Trabas	Tratamiento 1	Tratamiento 5	Tratamiento 9	
1 Trabas	Tratamiento 2	Tratamiento 6	Tratamiento 10	
2 Trabas	Tratamiento 3	Tratamiento 7	Tratamiento 11	
4 Trabas	Tratamiento 4	Tratamiento 8	Tratamiento 12	Tratamiento 13

La Figura 10.3, da a conocer una representación esquemática de la Fase III con cuatro trabas, detallando las dimensiones de una de estas últimas, las cuales iban a lado y lado de la viga, en diferentes posiciones a lo largo del vano, cuando el tratamiento así lo indicaba. En el Anexo F se dan a conocer los planos suministrados por la empresa fabricante de sistema de soporte y de arriostramiento de las vigas en MLE.

Figura 10.3 - Esquema del diseño del Tratamiento 12, dos actuadores y cuatro cargas con cuatro pares de trabas o contraventamientos (Izquierda). Detalle de una traba o contraventamiento lateral (Derecha). Todo el Sistema fue construido especialmente para la presente investigación por la empresa Mecanizados López y montado en el CIMOC de la Universidad de los Andes en la ciudad de Bogotá, D.C.

En total fueron testeadas 14 vigas de MLE. La mitad en Acacia y la otra mitad en Sajo. Las vigas de MLE se clasificaron según se da a conocer en la Tabla 10.4.

Tabla 10.4 – Número de vigas usadas en el desarrollo del presente capítulo que estudia el pandeo lateral, segmentadas por espeje y Sistema de clasificación.

	<i>Acacia mangium</i> Willd.	<i>Camposperma panamense</i> Standl.
Clasificación por NSR-1	3	3
Clasificación Propuesta (CP)	4	4

En la medida de los posible, las 14 vigas se sometieron a los tratamientos uno a doce. En el caso del Tratamiento 13, solo fueron llevadas a rotura seis vigas de Sajo y dos de Acacia. En esta última madera, no se llevaron más vigas, debido a la presencia de fallas sucesivas en las líneas de cola, que no permitían llegar al punto de rotura, sin antes estropear las líneas de adhesivo.

10.4.1. Cantidad de tratamientos y número de ensayos

El número de tratamientos fue calculado de la siguiente manera:

$\{[Fases (3) \times Contraventamentos (4) \times Especies (2) \times Clasificaciones (2)] + [Fase IV (1) \times Contraventamentos 4(1) \times [Especie 1 (1) \times Clasificación 1 (1) + Especie 2 (1) \times Clasificaciones 2 (2)]]\} = \{[48] + [1 \times [3]]\} = 51 \text{ Tratamientos}$

Como el número de vigas por grado varió entre tres y cuatro (ver Tabla 10.4), el número total de ensayos fue de 172.

La relación entre número de ensayos y tratamientos fue de 3,37, lo cual quiere decir que cada tratamiento tiene en promedio tres grados de libertad o unidades experimentales, necesarios para dotar al modelo estadístico de representatividad.

La información estadística fue obtenida a partir de procesamientos en los programas MATLAB 2015b, SPSS 15.0 para Windows y Excel. Se revisó estadística descriptiva, análisis de agrupación de variables por componentes principales (ACP) y Análisis estadístico multivariado (MANOVA).

10.4.2. Montaje para cada fase

Cada combinación Fase y Contraventamento ameritó la ubicación de instrumentación específica, posicionada estratégicamente, con el fin de obtener las cargas actuantes, y las deformaciones generadas como respuesta a esas cargas, en varias localizaciones simultáneas de las vigas y durante la vigencia del ensayo, o sea un mínimo de 300 s. Esto con el objetivo de hacer cada tratamiento comparable al interior con su repetición y al exterior con los demás tratamientos.

La adquisición de los datos de carga no provino de los actuadores sino de celdas de carga de 5 t del siguiente tipo: i) Futek 5 t LSB400 (ADVANCED SENSOR TECHNOLOGY INC., 2018), ii) TEDEA 620 5 t (VISHAY PRECISION GROUP, 2012); iii) Celdas tipo donut de 5 t. Para el caso de los desplazamientos verticales y laterales se dispuso de LVDT's (*Linear variable differential transformer*) de tipo inductivo con precisión 0,02% (PEI, 2005) y posibilidad de registro hasta 2000 datos.s⁻¹, aunque en este caso siempre se registraron solo 20 datos.s⁻¹. Los instrumentos usados para este caso fueron: i) Waycon Lrw-M-300-S y Lrw-M-150-S, ii)

Waycon Lzw1-A-50, iii) Novotechnik TR-50 y TR-100. También se usaron tres láseres para medir el desplazamiento en el canto inferior de la viga y en los ejes neutros en la dirección de los dos actuadores. Los instrumentos por tipo pueden ser vistos en la Figura 10.4. El sistema de adquisición de datos consistió en un Chasis de la serie C NI cDAQ-9178 y un Módulo de entradas analógicas del tipo C NI 9205.

Figura 10.4 - Detalle de la instrumentación usada en la realización de los diferentes ensayos. De izquierda a derecha Futek 5 t, Celda tipo Donut 5 t, LVDT's 0 - 50 y 0 - 100 mm, Láser 150 mm.

La Figura 10.5, la Figura 10.6, la Figura 10.7 y la Figura 10.8, detallan el listado de instrumentos usados en las pruebas junto con su ubicación. La idea de esta instrumentación fue obtener suficiente información para realizar comparaciones futuras con modelos basados en la teoría de elementos finitos.

10.4.3. Procesamiento de la información

La totalidad de la información fue capturada por cada ensayo, es decir que se armaron 172 paquetes de información. Cada paquete contenía información de cada celda de carga de 5 t, de cada tipo de LVDT y de cada tipo de láser. Como medida de control de datos se generó una columna inicial de control de tiempos en la que se contaba el tiempo cada 0,05 s, en ese momento se registraba lectura de cada instrumento, la lectura se tomó de forma constante hasta alcanzar 300 s. Es decir que, si un ensayo tenía 20 instrumentos de medición, fueron tomados un poco más de catorce millones de datos:

$$300 \text{ s} \times \frac{1 \text{ dato}}{0,05 \text{ s}} \times 13 \frac{\text{instrumentos}}{\text{paquete}} \times 164 \text{ paquetes} + \\ 700 \text{ s} \times \frac{1 \text{ dato}}{0,05 \text{ s}} \times 12 \frac{\text{instrumentos}}{\text{paquete}} \times 8 \text{ paquetes} = 14'136.000 \text{ datos}$$

Con tal volumen de información, solo en las pruebas de estabilidad lateral, se hacía imposible un manejo manual en tiempos razonables, así que se armó una rutina en el programa MatLab R2015b de la Universidad de los Andes, que entre otras cosas realizó el siguiente procesamiento por paquete: i) Conversión de los archivos tipo .txt a .xls ; ii) operaciones básicas de columnas para ordenar la información por instrumento, iii) aplicación de la función de convolución en los datos obtenidos con fuentes de alta dispersión, como los actuadores de las Fases II, III y IV, y algunas LVDT's o Láseres que se salían de control durante el procedimiento, y finalmente, iv) la generación de gráficos para cada sensor y algunas combinaciones de ellos, que pudieran indicar tendencias o dispersiones en cada tratamiento.

Entre lo más interesante que se calculó en el software fue v) la doble derivada de los desplazamientos de cada caso con relación al tiempo así fue posible, vi) calcular los picos de aceleraciones, que marcaron las tendencias de excitación para vii) definir las cargas críticas de pandeo, P_{cr} , de cada tratamiento, como se muestra a continuación:

$$v: \text{Velocidad de la variable en el intervalo } 0,05 \text{ s} = \frac{dx}{dt'} \\ a: \text{Aceleración de la variable en el intervalo } 0,05 \text{ s} = \frac{dv}{dt}$$

t : Variable tiempo

x : Variable desplazamiento de cada LVDT o Láser empleado,

Una muestra del conjunto de gráficas que se consiguieron por paquete es dada a conocer la Figura 10.9. La función de convolución fue implementada en la mayoría de las gráficas con valores en la ventana de trabajo que variaron de forma discreta entre 50 y 300, con pasos de 50 datos en la función.

Figura 10.5 – Montaje real de una viga de MLE para la Fase I. Los números indican el tipo y la ubicación de cada uno de los instrumentos usados.

Figura 10.6 – Montaje real de una viga de MLE para la Fase II. Los números indican el tipo y la ubicación de cada uno de los instrumentos usados.

Figura 10.7 – Montaje real de una viga de MLE para la Fase III. Los números indican el tipo y la ubicación de cada uno de los instrumentos usados.

Figura 10.8 – Montaje real de una viga de MLE para la Fase IV. Los números indican el tipo y la ubicación de cada uno de los instrumentos usados.

Figura 10.9 – Representación del conjunto de gráficas obtenido con el programa MatLab para un solo paquete de datos de los 172 posibles.

10.4.4. Procesamiento de los datos referentes a las aceleraciones para identificar la carga crítica de pandeo (P_{cr}) del experimento

En la metodología aplicada para la selección de los puntos críticos se aplicaron los siguientes criterios:

i) Cuando se evidenciaba un pico en las aceleraciones laterales de la viga durante la aplicación de carga constante. En este caso se tomaba como carga crítica aquella justo antes del inicio de las aceleraciones más destacadas y que estuviera en la secuencia del estado de reposo. Esta podía ser considerada como el último estado de reposo relativo.

ii) Cuando no se evidenciaba un pico representativo en las aceleraciones laterales de la viga. Para este caso se tomaba como carga crítica, la carga máxima alcanzada durante el ensayo.

La Figura 10.10 da a conocer tres tipos de situaciones donde se hace evidente la aparición de aceleraciones en la LVDT más excitada durante el ensayo (caso a y caso b), y donde definitivamente la señal era muy débil o estaba opacada por la estabilidad del ensayo,

dada una simetría de las cargas verticales, ausencia de cargas laterales y/o la acción de los contraventamientos (caso c).

Figura 10.10 – Manifestación de algunos tipos contrastantes de aceleración en los ensayos.

Por número de trabas laterales o contraventamientos, también hubo una manifestación típica de la aceleración según la ubicación de la señal. A continuación, se mencionan los casos más típicos:

i) Contraventamiento 0: Se siguió la LVDT denominada Center Lateral Top (CLT), que era la encargada de medir el pandeo lateral en el centro superior de la viga. Se tomaron los valores previos a la máxima aceleración evidenciada. El valor de la ventana para la convolución fue 300 en todos los casos.

ii) Contraventamiento 1- Se siguieron dos LVDT's. Las denominadas como Left Lateral (LL) y Right Lateral (RL). Se tomaron los valores previos a los picos alcanzados en las LVDT's y se seleccionó aquel que llegó al menor valor. En el ejemplo siguiente se seleccionó

la LVDT RL, ubicada al lado izquierdo. El valor de la ventana de convolución fue 50 en todos los casos.

iii) Contraventamiento 2- Se tomaron los valores de contraventamiento en el centro, aunque algunas veces las LVDT's ubicadas en los extremos dieron la pauta para la carga crítica en pandeo.

iv) Contraventamiento 4- Junto con el tratamiento anterior, fue el más difícil de medir. Normalmente aconteció después que era evidente el trabajo de cada traba lateral. Por ello, la selección del cuarto pico fue fundamental.

Figura 10.11 – Algunas formas de aceleración en LVDT's para 0, 1, 2 y 4 contraventamientos, identificados con las letras a, b, c, y d, respectivamente.

Después de la definición de todos los puntos exactos que identificaban la carga crítica de pandeo con precisión 20^{-1} s, para cada Fase (I, II, III) y para cada nivel de Contraventamiento (0, 1, 2 y 4), se seleccionó la fila con los datos convolucionados de tiempo, carga(s) y desplazamientos, medidos con los sensores tipo Láser o tipo LVDT. Posteriormente, se hizo

una verificación visual de la información de todos los sensores y uno a uno para cada caso, tomado decisiones de fondo en las dudas generadas, que podían ser:

i) Reemplazo de datos por pérdida de señal, en este caso se tomaba el sensor que medía la misma variable, pero en el sector opuesto de la viga. Fue lo más común.

ii) Falso cero de la señal, para lo cual se realizó la corrección manualmente, descontando el valor de partida a todos los datos de la misma variable.

iii) Dato faltante o errado en señales únicas, en este caso, el más complejo, se optó por reemplazar con el valor promedio de la variable de la misma especie, misma fase y mismo tratamiento. Fue lo menos frecuente.

Sumando todos los casos de esta naturaleza, en la Fase I se reemplazaron 13 datos, es decir, el 1.64 % del total de la población. En la Fase II, los datos reemplazados o recalculados, fueron 76, es decir el 9,3% del total. En la Fase III, la cifra ascendió a 84, es decir el 8,3% con relación al total. Y en la Fase IV, el valor fue de 10, o sea 8,9% del número de datos totales en esta fase.

10.4.5. Modelamiento de la inestabilidad lateral en vigas a escala real de Acacia y Sajo usando el programa ABAQUS/CAE ¹²

10.4.5.1. Modelo computacional

Se dio inicio a la simulación de las vigas de madera usando para ello el Software ABAQUS/CAE. Este paso avanzó gracias a la colaboración al interior del grupo de investigación CIMOC, de la Universidad de los Andes. En principio, el modelo hace uso de la teoría de elementos finitos, la cual correctamente incorporada, permite un mayor realismo en el comportamiento mecánico de los materiales, pudiendo simular infinitas condiciones, a partir de información obtenida de relativas pocas experiencias de laboratorio o campo.

¹² Licenciado por la Universidad de los Andes, Bogotá, D.C., Colombia

10.4.5.2. Construcción del modelo

Para representar de manera exacta los diferentes tratamientos de este capítulo, se realizaron modelos computacionales con el software ABAQUS/CAE. La plataforma desarrollada por *Dessault Systemes* posee cinco motores de cálculo para realizar las simulaciones 3D de elementos finitos y obtener una mayor precisión de los resultados. Las consideraciones realizadas en la modelación se muestran a continuación (DESSAULT SYSTEMES, 2018).

Figura 10.12 – Modelación realizada en ABAQUS/CAE

10.4.5.3. Propiedades del material

Dado que la madera es un material anisotrópico, se debe considerar este tipo de comportamiento para poder obtener un resultado similar a la realidad (Ver Figura 10.13).

Figura 10.13 – Modelación realizada en ABAQUS/CAE para la madera

Para la modelación se consideró un comportamiento ortotrópico, esta simplificación se hizo asumiendo que el comportamiento anisotrópico y ortotrópico son aproximados para el software, reduciendo el costo computacional que tendría el modelo. Cabe resaltar que el modelo isotrópico, probado con anterioridad, daba una solución aproximada debido a la geometría esbelta de los elementos, pero se optó por el ortotrópico debido a la importancia de los desplazamientos laterales en los efectos de pandeo lateral. ABAQUS/CAE tiene diferentes opciones para modelar el material, para este caso específico se usó la herramienta “*Engineering constants*”, esta opción requiere insertar tres módulos de elasticidad (longitudinal, tangencial y radial) y sus respectivas relaciones de *Poisson* y módulos de corte, según las condiciones del material en la matriz mostrada en la Ecuación 10.27.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{Bmatrix} \quad \text{Ecuación 10.27}$$

Donde:

E : Módulo de Young; G : Modulo de corte; ν : Relación de Poisson; ε : Deformación unitaria; γ : Deformación angular; σ : Esfuerzo en flexión; τ : Esfuerzo en cortante; 1: Dirección longitudinal; 2: Dirección radial; 3: Dirección tangencial.

10.4.5.4. Condiciones de apoyo y cargas

El modelo experimental consideró restricciones verticales y laterales en los extremos de la viga. Para los arriostramientos laterales solo restricciones en ese sentido. En ABAQUS/CAE se repitieron las mismas restricciones, para los extremos se ubicaron los apoyos en el centroide de la viga (Figura 10.14A) y para los arriostramientos laterales, se ubicaron las restricciones en el sentido transversal a la altura del eje neutro (Figura 10.14B).

Figura 10.14 – Condiciones de apoyo en los extremos de la viga (a) e intermedios para el contraventeo (b) en ABAQUS/CAE.

Las cargas se ubicaron en todos los casos con un par de puntuales, tal cual se indica en la Figura 10.15, representando los actuadores utilizados en el laboratorio de la Universidad de los Andes. Las dos cargas puntuales tenían como fin la ausencia deformaciones locales muy grandes en el modelo y la reducción de la variación de los resultados.

Figura 10.15 – Colocación de las Cargas en el Modelo

10.4.5.5. Constraints

Con el fin de que las deformaciones a compresión y a tensión de la viga de madera simulada no fueran iguales, se utilizó la función “Constraint” en la sección transversal de la viga. ABAQUS/CAE trae una serie de *constraints* que se pueden usar en diferentes escenarios. Para representar el caso de la madera, se utilizó el *constrain equation*, con el fin de generar una compatibilidad en las deformaciones de la sección transversal y siguiera una ecuación específica. Ver Figura 10.16.

Figura 10.16 – Colocación de las Cargas en la Modelación

La Ecuación 10.28, fue la utilizada para simular la compatibilidad de deformaciones de la sección transversal de la madera. Esta ecuación se obtuvo de la investigación en pandeo lateral en vigas de madera, realizada por Xiao en su tesis de maestría y su respectivo soporte en la publicación científica (XIAO; DOUDAK; MOHAREB, 2017)

$$A_1u_1 + A_2u_2 + \dots + A_nu_k = 0 \quad \text{Ecuación 10.28}$$

Donde:

A_n : Coeficiente que define el movimiento relativo del nodo analizado

u_k : Variable que representa el nodo analizado.

10.4.5.6. Mesh

Para el análisis de pandeo lateral torsional en las vigas laminadas encoladas, el tipo de elemento y el enmallado utilizado en los análisis de elementos finitos, representó un papel muy importante, dado que para que los resultados sean confiables, se requiere una mayor precisión en la integración de los resultados a la salida de la simulación. Al probar con diferentes modelos, se encontró que un mayor número de nodos en las condiciones de frontera daba lugar a una solución más adecuada. El elemento C3D20R Brick disponible en la librería de ABAQUS/CAE se utilizó para modelar los efectos del pandeo lateral torsional de las vigas (Figura 10.17 A). El elemento C3D20R posee 20 nodos (Figura 10.17 B), cada uno con tres grados de libertad traslacionales, lo que es muy parecido al carácter anisotrópico del material. Este tipo de elemento garantizó mayor precisión de los resultados debido a que la solución numérica obtenida es mucho mejor, al ser muy similar a la encontrada en el tratamiento uno de la fase experimental, consistente a una carga y cero contraventamientos, el cual se consideró como el ensayo de patronamiento para los resultados del software.

C. Resultado final de la función Mesh empleada en la MLE.

Figura 10.17 – Colocación Tipo de elemento usado en la función Mesh

Por otro lado, y para garantizar un nivel de enmallado adecuado (mejores resultados al menor coste computacional), se realizó un análisis de sensibilidad, cuyos resultados son mostrados en la Tabla 10.5. Como resultado se obtuvo que un enmallado uniforme de cuatro centímetros proporcionaba resultados y tiempos adecuados, según las necesidades y recursos disponibles en la investigación.

Tabla 10.5 – Análisis de sensibilidad del enmallado.

Tamaño del enmallado	Resultado ABAQUS/CAE (N)	Tiempo de computo (minutos)	Resultado experimental (N)
10 cm	5557	0.8	4471
8 cm	5424	1.5	
6 cm	5162	2.2	
4 cm	4830	3.1	
2 cm	4352	11.6	

10.4.5.7. Tipos de análisis

Se utilizó un análisis de pandeo elástico *Buck analysis* en ABAQUS/CAE, para determinar la resistencia máxima de pandeo en el modelo numérico. Los efectos de pandeo en los elementos se generaron por las cargas axiales, estas cargas de pandeo generaron no-linealidad geométrica, haciendo que la matriz de rigidez inicial de la estructura se redujera, lo cual es conocido como los efectos P-Delta (L.E.; FIERRO P.E., 2005).

La matriz de rigidez inicial del elemento se escribió según la Ecuación 10.29.

$$[K_{LL}] = [K_{mat}] + [K_{geo}] \quad \text{Ecuación 10.29}$$

Donde la matriz de rigidez del material ($[K_{mat}]$) es la matriz elástica del elemento en su estado inicial, esta matriz de rigidez se puede obtener utilizando el método de doble integración de un elemento tipo viga, donde se puede hacer una simplificación mostrada en la Figura 10.18.

Figura 10.18 – Simplificación de una viga simplemente apoyada para determinar su matriz de rigidez

$$K_{mat} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6EI}{L^3} & \frac{-6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{-6EI}{L^2} & \frac{6EI}{L} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 10.30}$$

En el caso de la matriz de rigidez geométrica ($[K_{geo}]$), esta depende de los efectos P-Delta del elemento, que, a su vez, depende de la carga axial del elemento, según se expresa en la Ecuación 10.31.

$$[K_{geo}] = [K_{P\Delta}] + [T]^T [K_{P\delta}] [T] \quad \text{Ecuación 10.31}$$

Donde:

$[K_{P\Delta}]$: Matriz de efectos P-Delta globales

$[K_{P\delta}]$: Matriz de rigidez de efectos P-Delta locales.

Mencionado esto, el análisis de pandeo elástico realiza un procedimiento de perturbación lineal (*Linear perturbation procedure*) para estimar la carga crítica de pandeo, donde el factor de incremento de la carga vertical aplicada se obtiene de resolver las Ecuaciones 10.32 y 10.33

$$[K_{LL}]\{\phi\} = 0 \quad \text{Ecuación 10.32}$$

$$\det([K_{mat}] + \alpha[K_{geo}])\{\phi\} = 0 \quad \text{Ecuación 10.33}$$

Donde:

α : Valor de amplificación de la carga aplicada

$\{\phi\}$: Forma de los modos de pandeo.

Por otro lado, se utilizó un análisis estático lineal para replicar el ensayo experimental y obtener las deformaciones laterales de los elementos de madera. Este análisis se realiza mediante un procedimiento estático general, donde la solución numérica realizada constará de una solución lineal, acorde a la Ecuación 10.34.

$$\frac{[P]}{[K_{LL}]} = [\Delta] \quad \text{Ecuación 10.34}$$

10.4.5.8. Pasos de análisis (*Steps*)

Para disminuir la distorsión del modelo y los efectos locales importantes que puedan generar “ruido” en los resultados, se hicieron pasos de análisis para cargar el modelo de manera adecuada. El primer paso utilizado es el que tiene ABAQUS/CAE por defecto, en este paso se ubican los apoyos y se establece la geometría que se le realizarán los análisis posteriores. El segundo paso se creó para implementar la gravedad y que el modelo entrara en la condición pre-ensayo, que es cuando solo cuenta con peso propio. Por último, se aplicó la carga experimental, siguiendo el mismo patrón de carga utilizado en el ensayo experimental, esto con el fin de que no se aplicara una carga muy acelerada, lo cual pudiera generar efectos dinámicos importantes que alteraran la respuesta real de la estructura.

Para el caso de análisis de los modos de pandeo, el *Step* de análisis se definió para calcular los seis primeros modos de pandeo de la viga análisis, además de utilizar 300 iteraciones como punto límite máximo para encontrar la carga crítica de pandeo, esto con el fin de que el programa encontrara el valor más cercano a la verdadera carga esperada.

10.5. Resultados

10.5.1. Carga crítica de pandeo por normativa

Tomando los métodos de diseño del NDS 2018, el Eurocódigo y la Norma Brasileira, el autor corrió manualmente un modelo con MLE de Sajo con el único fin de verificar tendencias en el resultado de las cargas críticas de pandeo. Las condiciones correspondieron a las de los Tratamientos 1, 2, 3 y 4, según las convenciones de la Tabla 10.4. O sea, una viga simplemente apoyada, sin restricciones laterales para control del pandeo. Los resultados son mostrados en la Figura 10.. En los tres casos, la condición crítica seleccionada para el diseño fue el pandeo lateral optimizado por programación no lineal en Excel con la función “buscar objetivo”. El NDS 2018 y el EC5 mostraron un comportamiento muy similar, para los 15 tipos de contraventamientos seleccionados. La P_{cr} aumenta con el número de contraventamientos hasta cuando se colocan tres a cuatro, a partir de allí, la respuesta es asintótica para el NDS 2018 y el EC5. Para la NBR 7190, la respuesta es bien conservadora hasta nueve

contraventamientos, a partir de este punto, supera las demás normativas sin cambiar la pendiente en la curva.

Figura 10.19 – Carga Crítica de Pandeo según tres normativas que lo contemplan en su diseño, para una viga de MLE de Sajo de dimensiones 7500 x 500 x 50 mm³.

10.5.2. Cargas y momentos críticos de pandeo para los 172 experimentos ejecutados y respuesta en los principales sensores de desplazamiento

Después de correr en MATLAB, la totalidad de paquetes de información (172), se procedió a la depuración de cada archivo obtenido por cada paquete. Esto arrojó las cargas críticas de pandeo para cada situación y la posición de cada lector de desplazamiento según la fase de estudio y el número de contraventamientos. Dado el gran volumen de información, solo se presentan los valores promedio para cada tratamiento, donde se evidencian los sensores de desplazamiento que mayor información suministraron en la determinación de las

cargas críticas de pandeo, esto es i) Desplazamiento canto inferior central, ii) Desplazamiento centro lateral superior, iii) Desplazamiento canto inferior tercio izquierdo, iv) Desplazamiento canto inferior tercio derecho, v) Desplazamiento lateral tercio izquierdo y vi) Desplazamiento lateral tercio derecho. La información se separó en cuatro grupos, resultado de la combinación de dos especies y dos sistemas de clasificación como es mostrado en la Tabla 10.6.

Es importante mencionar que, durante la ejecución del ensayo, los tratamientos que involucraron la MLE de Acacia se llevaron a deformación de 20 mm, y los de Sajo a 30 mm, en los dos casos, controlados por los desplazaminetos de los actuadores, no por fuerza.

Por lo mencionado, la madera de Sajo exhibió los valores más altos de carga crítica, al igual que de desplazamientos. De otra parte, es evidente la presencia de menores valores de carga y desplazamiento en la madera clasificada por el sistema de clasificación propuesto (CP), si le es comparada con la normativa vigente del NSR-10. Para una mejor discriminación en las respuestas de los tramientos, de todos los factores y para todas las variables, a continuación, en el siguiente acápite, se procede a presentar el modelo estadístico general implementado.

Tabla 10.6 – Resumen de las Variables obtenidas para cada tratamiento en la combinación Especie (Acacia - Sajo) x Tipo de clasificación (NSR-10 – Propuesta (CP)).

Acacia x Clasificación NSR-10								
Etiquetas de fila	Carga Crítica (Kg)	Desplazamiento Canto Inferior Central Viga (mm)	Desplazamiento Centro Lateral Superior (mm)	Desplazamiento Canto Inferior Tercio Izquierdo (mm)	Desplazamiento Canto Inferior Tercio Derecho (mm)	Desplazamiento Lateral Tercio Izquierdo (mm)	Desplazamiento Lateral Tercio Derecho (mm)	
1 Carga	1178	18,95	3,67	12,22	11,46	0,26	0,16	
0 Trabas	684	10,68	1,35	8,11	7,35	0,08	0,06	
1 Traba	1121	21,73	6,82	15,82	14,33	0,58	0,34	
2 Trabas	1369	23,33	3,29	9,01	8,84	0,30	0,18	
4 Trabas	1536	20,08	3,20	15,93	15,33	0,07	0,07	
2 Cargas	996	13,42	5,67	8,76	9,11	4,57	3,59	
0 Trabas	860	11,32	11,99	8,01	8,72	10,18	9,33	
1 Traba	974	13,49	2,88	9,51	10,14	1,77	1,47	
2 Trabas	999	14,37	3,69	5,98	5,75	3,14	1,36	
4 Trabas	1153	14,50	4,13	11,52	11,84	3,19	2,21	
2 Cargas-Rotura	1821	22,52	0,57	17,59	19,37	0,09	0,27	
4 Trabas	1821	22,52	0,57	17,59	19,37	0,09	0,27	
4 cargas	1097	12,12	9,75	9,64	10,04	8,72	8,64	
0 Trabas	521	6,86	19,75	5,27	5,66	16,22	16,81	
1 Traba	1134	13,05	10,61	10,63	11,12	10,14	10,86	
2 Trabas	1191	10,45	5,96	8,79	8,87	6,09	4,74	
4 Trabas	1544	18,14	2,67	13,87	14,53	2,41	2,16	
Total general	1110	15,04	6,21	10,40	10,45	4,40	4,03	

Acacia x Clasificación-CP

Etiquetas de fila	Carga Crítica (Kg)	Desplazamiento Canto Inferior Central Viga (mm)	Desplazamiento Centro Lateral Superior (mm)	Desplazamiento Canto Inferior Tercio Izquierdo (mm)	Desplazamiento Canto Inferior Tercio Derecho (mm)	Desplazamiento Lateral Tercio Izquierdo (mm)	Desplazamiento Lateral Tercio Derecho (mm)
1 Carga	762	14,52	3,47	8,70	9,13	0,23	0,21
0 Trabas	661	13,51	3,12	8,66	9,34	0,25	0,21
1 Traba	773	12,69	6,95	8,51	9,10	0,46	0,43
2 Trabas	864	17,35	3,05	6,58	7,22	0,17	0,18
4 Trabas	747	14,52	0,74	11,05	10,87	0,03	0,01
2 Cargas	1012	14,79	11,31	9,59	10,10	10,47	9,43
0 Trabas	844	13,70	31,85	9,48	10,15	28,47	26,19
1 Traba	1091	15,83	7,39	11,18	11,83	7,94	6,81
2 Trabas	1033	14,27	3,93	5,77	5,74	3,85	3,51
4 Trabas	1078	15,37	2,08	11,94	12,66	1,61	1,20
2 Cargas-Rotura	1934	24,66	0,04	19,44	21,02	0,24	0,68
4 Trabas	1934	24,66	0,04	19,44	21,02	0,24	0,68
4 cargas	1159	14,42	8,03	11,70	11,90	7,02	7,31
0 Trabas	592	9,87	11,73	7,04	7,29	9,28	10,54
1 Traba	1211	16,92	11,33	13,06	13,45	11,15	10,15
2 Trabas	1208	14,30	6,49	11,57	11,60	6,00	4,98
4 Trabas	1626	16,60	2,59	15,14	15,25	1,64	3,57
Total general	996	14,78	7,11	10,24	10,64	5,37	5,20

Sajo x Clasificación NSR-10

Etiquetas de fila	Carga Crítica (Kg)	Desplazamiento Canto Inferior Central Viga (mm)	Desplazamiento Centro Lateral Superior (mm)	Desplazamiento Canto Inferior Tercio Izquierdo (mm)	Desplazamiento Canto Inferior Tercio Derecho (mm)	Desplazamiento Lateral Tercio Izquierdo (mm)	Desplazamiento Lateral Tercio Derecho (mm)
1 Carga	1224	20,39	6,40	12,90	13,53	0,29	0,27
0 Trabas	430	6,54	1,57	3,56	4,70	0,03	0,04
1 Traba	1147	19,64	11,02	14,63	14,10	0,74	0,61
2 Trabas	1336	22,57	9,98	8,14	9,83	0,27	0,37
4 Trabas	1982	32,83	3,02	25,27	25,49	0,12	0,07
2 Cargas	1157	19,38	7,08	12,71	12,60	6,12	5,88
0 Trabas	708	12,61	11,88	8,88	8,94	10,27	10,79
1 Traba	1161	19,66	7,92	14,09	14,40	7,98	9,34
2 Trabas	1353	22,84	4,93	10,17	9,69	3,38	1,78
4 Trabas	1408	22,43	3,61	17,72	17,36	2,85	1,60
2 Cargas-Rotura	2088	25,76	0,37	20,59	20,03	0,12	0,03
4 Trabas	2088	25,76	0,37	20,59	20,03	0,12	0,03
4 cargas	1409	20,78	4,89	16,22	15,82	4,04	6,34
0 Trabas	667	11,02	9,52	8,32	8,19	7,74	8,91
1 Traba	1490	23,00	4,61	18,11	17,53	3,75	10,69
2 Trabas	1564	23,37	1,18	18,27	17,85	2,73	4,03
4 Trabas	1917	25,71	4,25	20,16	19,73	1,96	1,72
Total general	1327	20,61	5,68	14,45	14,45	3,23	3,84

Sajo x Clasificación-CP

Etiquetas de fila	Carga Crítica (Kg)	Desplazamiento Canto Inferior Central Viga (mm)	Desplazamiento Centro Lateral Superior (mm)	Desplazamiento Canto Inferior Tercio Izquierdo (mm)	Desplazamiento Canto Inferior Tercio Derecho (mm)	Desplazamiento Lateral Tercio Izquierdo (mm)	Desplazamiento Lateral Tercio Derecho (mm)
1 Carga	1213	21,67	9,14	14,21	14,44	0,42	0,43
0 Trabas	460	8,26	1,26	4,80	4,88	0,06	0,06
1 Traba	1349	23,30	16,08	16,07	16,79	1,04	1,00
2 Trabas	1133	23,78	14,03	11,84	12,03	0,40	0,53
4 Trabas	1910	31,33	5,19	24,15	24,07	0,18	0,14
2 Cargas	1076	17,48	4,19	11,14	11,45	3,94	3,87
0 Trabas	507	7,35	10,34	5,18	5,36	9,30	9,49
1 Traba	1064	17,77	2,18	12,80	12,99	3,16	3,22
2 Trabas	1343	22,70	1,91	9,21	9,70	0,88	0,79
4 Trabas	1389	22,10	2,32	17,39	17,78	2,42	1,97
2 Cargas-Rotura	1912	22,30	0,21	16,43	16,98	0,15	0,53
4 Trabas	1912	22,30	0,21	16,43	16,98	0,15	0,53
4 cargas	1297	17,84	6,52	13,70	13,65	5,84	4,94
0 Trabas	434	8,18	8,24	5,61	5,62	6,39	5,47
1 Traba	1271	19,77	8,98	15,09	14,93	9,31	7,83
2 Trabas	1522	19,48	4,93	15,52	15,57	5,18	4,10
4 Trabas	1961	23,91	3,93	18,60	18,50	2,47	2,34
Total general	1237	19,19	6,24	13,22	13,41	3,21	2,93

10.5.3. Resultados del diseño estadístico experimental (MANOVA y análisis de componentes principales)

De toda la información extraída del Análisis de Componentes Principales (ACP), puede decirse que la mayor fuente de variación del experimento estuvo a cargo de los Contraventamentos y Desplazamientos Verticales, con una explicación del 51,3% de la variabilidad. Le sigue el conjunto de variables asociadas a los Desplazamientos Laterales con 17,3%. En tercer lugar, están las Cargas Críticas de Pandeo y en último lugar, las Normativas usadas en conjunto con las Especies empleadas para definir los Grados de Clasificación, con una explicación del 9,3% y 7,9%, respectivamente.

La variable de mayor incidencia del experimento fue el desplazamiento medido en el canto central inferior de las vigas y la de menor incidencia, las especies. La Tabla 10.7 – 7, muestra los autovalores resultado del ACP y la Tabla 10.8 8, la varianza total explicada.

Tabla 10.7 – Autovalores obtenidos por cada variable o Fuente de Variación para los Componentes Principales más representativos.

Matriz de componentes				
Variable o Fuente de Variación	Componentes Extraídos			
	1	2	3	4
CenterBottomLaser	0,911	0,306	-0,141	0,049
RightLaser	0,907	0,109	-0,292	-0,040
LeftLaser	0,896	0,113	-0,324	-0,062
SumaCargas	0,884	0,264	0,207	-0,067
LeftBottom	0,876	0,397	0,091	0,017
RightBottom	0,865	0,406	0,108	0,014
1=0 Trabas; 2=1 Traba; 3=2 Trabas; 4=4 Trabas	0,756	-0,127	0,239	-0,137
RightLateral	-0,599	0,761	-0,035	-0,025
CenterLateralTop	-0,620	0,752	-0,063	-0,037
LeftLateral	-0,625	0,741	-0,044	-0,013
1=1 Cargas LE; 2=1 Carga LE; 3=4 Cargas LE; 4=2 CargasRotura	0,266	0,172	0,820	0,026
1=NSR-10 ; 2=CP	-0,066	0,002	0,223	0,859
1= Acacia ; 2= Sajo	0,367	0,070	-0,391	0,507

Método de extracción: Análisis de Componentes principales.

Tabla 10.8 – Varianza total explicada para el arreglo por Componentes Principales.

Varianza total explicada			
Componente	Autovalores iniciales		
	Total	% de la varianza	% acumulado
1	6,67	51,30	51,30
2	2,25	17,34	68,64
3	1,21	9,33	77,97
4	1,03	7,92	85,88
5	0,91	6,99	92,88
6	0,38	2,92	95,80
7	0,22	1,69	97,49
8	0,12	0,89	98,38
9	0,09	0,70	99,08
10	0,06	0,44	99,52
11	0,04	0,27	99,79
12	0,02	0,15	99,94
13	0,01	0,06	100,00

Método de extracción: Análisis de Componentes principales.

10.5.4. Análisis de varianza multivariado (MANOVA)

Del Análisis Multivariado se puede inferir que la combinación de los factores Casos de Carga y Contraventamentos, generaron diferencias significativas en las variables Cargas de Pandeo y Desplazamientos verticales en la parte inferior de las vigas a uno y dos tercios.

La combinación de factores Especies con Contraventamentos generaron diferencias significativas en las variables: Cargas de Pandeo, Desplazamientos laterales, Desplazamientos en el canto inferior y eje neutro a uno y dos tercios, mas no en el Desplazamiento lateral central.

La combinación de factores Especies con Normativa de Clasificación generó diferencias significativas en todos desplazamientos importantes del cálculo del Módulo de Elasticidad como son el Desplazamiento del canto inferior central y los ubicados en el eje neutro a uno y dos tercios (Láseres).

Individualmente, el factor Contraventamentos generó diferencias en todas las variables, excepto en la variable de Carga Crítica de Pandeo cuando de usan uno y dos Contraventamentos.

El factor Casos de Carga generó diferencias significativas en la Carga de Pandeo y los Desplazamientos del canto inferior de la viga, a uno y dos tercios.

El factor Especies, generó diferencias significativas en todas las variables.

La Tabla 10.9, resume las interacciones entre factores para las nueve variables seleccionadas.

Tabla 10.9 – Relacionamiento entre las nueve variables empleadas en el modelo estadístico según diferentes factores y combinaciones de ellos. Los recuadros escritos sombreados indican diferencias significativas, los no sombreados ausencia de diferencias y los vacíos, redundancias ($q < 0.05$)

Factores Simples y Combinados	Especie	Norma Clasificación Madera	Casos de Carga	Contraventamientos	Especies x Norma	Especies x Casos de Carga	Norma x Casos de Carga	Especies x Contraventamiento
Especie	Diferencia en todas las Variables	Diferencia en los tres Deformaciones del canto inferiores a L/3; L/2 y 2L/3	Las variables No presentaron diferencias significativas	Diferencia en todas las variables menos en Desplazamiento Lateral L/2			Las variables No presentaron diferencias significativas	
Norma Clasificación Madera	Diferencia en los tres Deformaciones del canto inferiores a L/3; L/2 y 2L/3	Diferencia solo en Deformación Eje Neutro a L/3	Las variables No presentaron diferencias significativas	Las variables No presentaron diferencias significativas		Las variables No presentaron diferencias significativas		
Casos de Carga	Las variables No presentaron diferencias significativas	Las variables No presentaron diferencias significativas	Diferencia en Carga Crítica, Deformación canto inferior a L/3 y 2L/3	Diferencia en Carga Crítica, Deformación canto inferior a L/3 y 2L/3	Las variables No presentaron diferencias significativas			Las variables No presentaron diferencias significativas
Contraventamientos	Diferencia en todas las variables menos en Desplazamiento Lateral L/2	Las variables No presentaron diferencias significativas	Diferencia en Carga Crítica, Deformación canto inferior a L/3 y 2L/3	Diferencia en todas las Variables. Importante: Una y Dos trabas no presentaron diferencias para Cargas críticas	Las variables No presentaron diferencias significativas	Las variables No presentaron diferencias significativas		
Especies x Norma			Las variables No presentaron diferencias significativas	Las variables No presentaron diferencias significativas	Diferencia en los tres Deformaciones del canto inferiores a L/3; L/2 y 2L/3			
Especies x Casos de Carga		Las variables No presentaron diferencias significativas		Las variables No presentaron diferencias significativas		Las variables No presentaron diferencias significativas		
Norma x Casos de Carga	Las variables No presentaron diferencias significativas						Las variables No presentaron diferencias significativas	Las variables No presentaron diferencias significativas
Especies x Contraventamiento				Las variables No presentaron diferencias significativas			Las variables No presentaron diferencias significativas	Diferencia en todas las variables menos en Desplazamiento Lateral L/2

10.5.5. Momentos críticos obtenidos en la experimentación *versus* Momentos críticos calculados por la teoría de Timoshenko ajustada por el AWC

Antes de empezar, se aclara que en esta sección todos los momentos se expresan en KN.m, a menos que se estipule lo contrario para algún caso en particular.

De los 13 tratamientos propuestos por el autor en la Tabla 10.3 y llevados a la experimentación, solo seis de ellos están bien definidos en el NDS 2018 (Fase I con trabas 0 y 1; Fase II con trabas 0 y 2; Fase III con trabas 0 y 4); los demás casos (siete en total), son mencionados como situaciones genéricas que aplican parámetros derivados de los primeros seis casos con mucha precaución en pro de la seguridad (AMERICAN WOOD COUNCIL, 2018). Teniendo esto claro, se cotejaron todos los momentos críticos (M_{cr}) de las vigas de MLE para las dos especies y los dos sistemas de clasificación, calculados por medio de los valores de carga obtenidos del experimento, haciendo uso de la mecánica clásica para su cálculo, y los M_{cr} calculados con el procedimiento recomendado por el NDS. Estos resultados son

presentados ordenadamente en la Figura 10.20, Figura 10.21, Figura 10.22, Figura 10.23 y Figura 10.24.

Figura 10.20 – Momentos críticos para dos especies y dos normativas. Todos los casos. Ratio promedio:1,45

En la mayoría de M_{cr} , los valores experimentales están por encima de los calculados por la normativa NDS y la ratio llega a 1,45 veces, en promedio. Solo en el Tratamiento 12, el valor del NDS está por encima del valor experimental. Ese tratamiento hace referencia a la aplicación de carga en cuatro puntos equidistantes y cuatro contraventamientos.

Al desagregar la información por especie y norma de clasificación, se visualiza la tendencia ya mencionada. La combinación Acacia+NSR-10 arrojó una ratio promedio de 1,38, y en el caso de Acacia+CP, 1,18.

Para el Sajo la tendencia fue similar, aunque con ratios más altos, si son comparados con los de Acacia, 1,68 y 1,59, para la clasificación por NSR-10 y CP, respectivamente.

Figura 10.21 – Especie *Acacia mangium* Willd. con clasificación NSR-10. Ratio promedio: 1,38

En la combinación Acacia+CP, se da la mayor frecuencia de situaciones donde los M_{cr} son menores en el ensayo experimental, con cinco situaciones de 13 posibles. Ver Figura 10..

Figura 10.22 – Especie *Acacia mangium* Willd. con Clasificación Propuesta- CP. Ratio promedio: 1,18

Además de presentar ratios más altas, la madera laminada de Sajo, exhibió los M_{cr} más altos de todo el experimento, esto coincidió en el tratamiento cuatro de las dos clasificaciones. Allí, una de las dos ratios particulares casi llegó a 2,5 (37,16/14,88), en el tratamiento de una carga con cuatro contraventamientos.

Figura 10.23 – Especie *Campnosperma panamense* Standl. con clasificación NSR-10. Ratio promedio: 1,68

En general, los momentos críticos de todo el trabajo experimental, aumentan con el número de cargas aplicadas; así mismo, sucede con el número de trabas o contraventamientos. Esta situación no es contundente en los valores del NDS, dado que esta normativa no trata todos los casos que evluó la presente investigación.

Figura 10.24 – Especie *Campnosperma panamense* Standl. con Clasificación Propuesta- CP. Ratio promedio: 1,59

Es evidente que los casos no mencionados por el NDS de manera específica, se ven castigados en favor de la seguridad, ya que su cálculo se hace con parámetros generales de referencia (DOUGLAS, 2003).

A pesar de que los casos mencionados por el estándar de diseño son más cercanos a los valores experimentales que los casos no tratados de manera directa, el resultado experimental siempre estuvo por encima. Al respecto, los valores experimentales promedio de *Acacia* presentaron una ratio de 1,12 y 1,41 frente a casos tratados y no tratados por el NDS, respectivamente. Para el *Sajo* dichos valores alcanzaron una ratio de 1,30 y 1,92, respectivamente.

Ahora bien, si lo que se compara son las normativas de clasificación, para todos los casos, estas presentaron ratios entre 1,53 y 1,39 más altos; lo cual en primera instancia valida las especies usadas y los sistemas de clasificación propuestos. Esto también puede ser interpretado como que el promedio de los M_{cr} de las piezas clasificadas por la NSR-10, es un 53% mayor que el de las mismas piezas, respecto a cuando su M_{cr} se calcula por el NDS. En este sentido, el promedio de los M_{cr} de las piezas clasificadas por la CP, es un 39% mayor que el de las mismas piezas, cuando su M_{cr} es calculado según la recomendación del NDS.

10.5.6. Modelación computacional del experimento en ABAQUS/CAE

Buscando consistencia y repetición al menor costo y con la mayor precisión, se replicó el montaje experimental, verificando los valores obtenidos en la modelación computacional realizada en ABAQUS/CAE con los valores comprobados experimentalmente. Tal verificación tuvo tres frentes de trabajo: i) Inputs para la adecuada definición del material en el programa, aquí se tuvo la mayor dificultad, ii) hipótesis de contraventamiento, apoyos y localización de cargas, para favorecer el pandeo lateral de manera simultánea con las deformaciones en el plano y, iii) comparación de los resultados o verificación de la salida del modelo.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de cada ensayo del experimento en el CIMOC y los obtenidos con ABAQUS/CAE, en lo referente a los desplazamientos de dos LVDT's principales, los cuales marcaron la información principal del ensayo. El término FEA hace referencia a *Finite Element Analysis*, por su sigla en inglés, el desplazamiento centro lateral superior hace referencia al pandeo lateral. Ver Tabla 10.10 y Tabla 10.11.

Tabla 10.10 – Desplazamientos obtenidos de manera experimental y en el modelo de ABAQUS/CAE para *Acacia mangium* Willd., número de cargas y número de contraventamientos.

Aplicación Una Carga en L/2	Desplazamiento canto inferior central (mm)	FEA (mm)	Desplazamiento centro lateral superior (mm)	FEA (mm)
Sin arriostramiento lateral	12.296	12.800	2.362	2.450
Arriostrado a L/2	16.567	17.690	6.894	0.000
Arriostrado a L/3	19.914	20.460	3.153	2.090
Arriostrado a L/4	16.905	20.450	1.796	1.120
Aplicación Dos Cargas en L/3 y 2L/3	Desplazamiento canto inferior central (mm)	FEA (mm)	Desplazamiento centro lateral superior (mm)	FEA (mm)
Sin arriostramiento lateral	12.507	13.860	21.921	2.680
Arriostrado a L/2	14.661	16.820	5.134	0.000
Arriostrado a L/3	14.320	16.560	3.813	0.050
Arriostrado a L/4	14.936	16.560	3.109	0.000
Aplicación Cuatro Cargas en L/5, 2L/5, 3L/5 y 4L/5	Desplazamiento canto inferior central (mm)	FEA (mm)	Desplazamiento centro lateral superior (mm)	FEA (mm)
Sin arriostramiento lateral	8.577	11.400	15.166	2.070
Arriostrado a L/2	15.264	17.040	11.018	0.000
Arriostrado a L/3	12.650	17.350	6.263	0.070
Arriostrado a L/4	17.258	21.560	2.622	0.005

Tabla 10.11 – Desplazamientos obtenidos de manera experimental y en el modelo de ABAQUS/CAE para *Campnosperma panamense* StandI., número de cargas y número de contraventamientos.

Aplicación Una Carga en L/2	Desplazamiento canto inferior central (mm)	FEA (mm)	Desplazamiento centro lateral superior (mm)	FEA (mm)
Sin arriostramiento lateral	7.523	9.940	1.392	1.190
Arriostrado a L/2	21.735	26.250	13.911	0.000
Arriostrado a L/3	23.258	25.380	12.299	2.600
Arriostrado a L/4	31.971	39.600	4.262	8.710
Aplicación Dos Cargas en L/3 y 2L/3	Desplazamiento canto inferior central (mm)	FEA (mm)	Desplazamiento centro lateral superior (mm)	FEA (mm)
Sin arriostramiento lateral	9.599	11.130	11.002	2.460
Arriostrado a L/2	18.581	19.830	4.640	0.000
Arriostrado a L/3	22.756	23.930	3.204	0.110
Arriostrado a L/4	22.242	24.780	2.872	0.000
Aplicación Cuatro Cargas en L/5, 2L/5, 3L/5 y 4L/5	Desplazamiento canto inferior central (mm)	FEA (mm)	Desplazamiento centro lateral superior (mm)	FEA (mm)
Sin arriostramiento lateral	9.400	12.180	8.790	2.240
Arriostrado a L/2	21.150	21.710	7.108	0.000
Arriostrado a L/3	21.147	24.270	3.324	0.117
Arriostrado a L/4	24.685	30.330	4.065	0.007

10.5.7. Modos de pandeo

Para obtener los valores críticos de pandeo, se utilizó la opción de análisis *Buckle* de ABAQUS/CAE, esta opción otorgó los valores propios de cada modo de pandeo a partir de la carga aplicada, y por su simplicidad, se utilizó el método de la carga unitaria para que el valor propio α , fuera equivalente a a la carga crítica de pandeo elástico (P_{cr}). En la Tabla 10.12 se citan los valores obtenidos experimentalmente y asumidos como críticos para el pandeo lateral, basándose en las normativas de diseño, y al frente se coloca el valor obtenido por los modos de pandeo en ABAQUS/CAE, haciendo uso de la función mencionada, que a su vez contempla la metodología de cálculo por análisis de elementos finitos (FEA).

Tabla 10.12 – Cargas críticas de pandeo obtenidas de manera experimental y en el modelo de ABAQUS/CAE para *Camptosperma panamense* Standl. y *Acacia mangium* Willd, número de cargas (columnas) y número de contraventamientos (filas).

Ubicación Restricciones Laterales	Carga L/2		Cargas L/3 y 2L/3		Cargas L/5, 2L/5, 3L/5 y 4L/5	
	FEA	Experimental	FEA	Experimental	FEA	Experimental
<i>Camptosperma panamense</i> Standl.						
N/A	483	447.1	566	593.4	624	533.6
L/2	2176	1262.4	2194	1105.7	2416	1364.9
L/3	2878	1220.1	3996	1346.9	4192	1540.1
L/4	4800	1940.4	6454	1397	7412	1942
<i>Acacia mangium</i> Willd.						
N/A	699	671.1	818	852.3	900	561.5
L/2	3087	922.6	3114	1032.3	3428	1178.1
L/3	4071	1080.6	5654	1015.7	5932	1200.4
L/4	6787	1085.1	9112	1115.5	10464	1590.9

Las Tablas 10.13 y 10.14, dan a conocer el primer modo de pandeo presentado, por especie y para cada combinación de carga y contraventamiento. El autovalor calculado por el software, asociado a la carga unitaria inicial, representa el valor de P_{cr} de pandeo.

Tabla 10.13 – Resultados de la Prueba de Flexión Estática en madera de *Acacia mangium* Willd. para vigas de 750 x 50 x 5 cm³.

Tipos de Cargas / Número de Trabas Laterales Glulam Combinado Acacia

	699 Kg	818 Kg	900 Kg
	3087 Kg	3114 Kg	3428 Kg
	4071 Kg	5654 Kg	5932 Kg
	6787 Kg	9112 Kg	10464 Kg

Tabla 10.14 – Resultados de la Prueba de Flexión Estática en madera de *Campnosperma panamense* Standl. para vigas de $750 \times 50 \times 5 \text{ cm}^3$.

Tipos de Cargas / Número de Trabas Laterales Glulam Combinado Sajo			

10.6. Análisis de resultados

A lo largo del texto se ha demostrado que la teoría pura de Timoshenko, exagera los momentos críticos de pandeo en materiales como la madera, este resultado está en concordancia con el obtenido por Abrantes en su tesis doctoral (ABRANTES, 2012). El desacierto radica en que la teoría original precisa unas condiciones muy singulares, como apoyo simple y momentos constantes. Por ello, la aplicación de la teoría precisa algunas modificaciones asociadas a: i) Las condiciones de apoyo, ii) La distribución de momentos a lo largo del vano, iii) La posición de la carga actuante en función del grado de esbeltez de la viga, y iv) El número, posición y rigidez de los contraventamientos. La AWC ha avanzado en los ítems ii) y iii) (DOUGLAS, 2003), y con el avance de técnicas de simulación en software como ABAQUS/CAE, investigaciones recientes han abordado el tema i) (XIAO; DOUDAK; MOHAREB, 2017; ZHOU; XIAO, 2010). El punto iv) trata de abordarse con mayor número de ejemplos en la presente investigación.

¿Qué pasaría con la respuesta en el M_{cr} , de los casos claramente discriminados del NDS y citados en el Anexo G, si se trabajaran con los parámetros y formulaciones genéricas de los casos no citados? Pues la respuesta clara y concisa a esta pregunta es: “Los valores de M_{cr} , inevitablemente decrecerían, aumentando las ratios respecto a los datos experimentales y pasarían de 1,45 a 1,69 para las dos especies y las dos normativas de clasificación. Ver Figura 10. y Figura 10.. Lo cual quiere decir, que, aún hoy, el NDS es conservador con los casos declarados y demasiado conservador con los casos no declarados en la normativa (Figura 10.), y que inmediatamente puede haber una ganancia del 24% ($1,69-1,45=0,24$) si se equipararan las dos situaciones. Otras mejoras han sido reportadas en la literatura con el fin de alinear los códigos de construcción con la mejor representación de las estructuras que se tiene hoy en día con las herramientas computacionales y desarrollos matemáticos a partir de elementos finitos, por ejemplo (BEDON; FRAGIACOMO, 2016).

Figura 10.25 – Cálculo de diferentes situaciones citadas en el NDS 2018, con formulaciones genéricas y comparación con los datos experimentales. Ratio promedio: 1,69

Figura 10.26 – Cálculo de diferentes situaciones citadas en el NDS 2018, con formulaciones específicas y comparación con los datos experimentales. Ratio promedio: 1,45

Figura 10.27 – Cálculo de diferentes situaciones no citadas en el NDS 2018, con formulaciones genéricas y comparación con los datos experimentales. Ratio promedio: 1,67

10.6.1. Análisis de las cargas críticas de pandeo para una viga de la especie *Campnosperma panamense* Standl. y el sistema de clasificación por CP

Ya en el ítem anterior se demostró que la normativa tiene un efecto conservador con los casos tratados y no tratados, Figura 10.25 y Figura 10.27, respectivamente. Y que así sea que la norma incluya esos casos, estarían por debajo de los resultados experimentales expuestos en este capítulo (Figura 10.26), con una ratio del orden de 1,45.

La Figura 10.28, enseña las curvas de rotura de la Viga de *C. panamense* Standl. en la Fase IV. Los recuadros internos dan a conocer las cargas críticas de pandeo en la Fase II y la Fase IV, ellas demuestran que los valores críticos en la Fase II son menores que en la Fase IV, dada básicamente, por una relajación en el Sistema de arriostamiento de las vigas de madera durante el ensayo. Incluso, en esta gráfica es posible detectar que para a LVDT analizada, denominada como *Center Lateral Top* o desplazamiento lateral medido en la cara de la viga, muy cerca del canto comprimido, e identificada con el color azul, hay un pandeo a los 26 KN, el cual no se tuvo en cuenta en esta Fase, porque el pandeo a los 20,7 KN fue más representativo. En este mismo ejemplo, el modelo de ABAQUS/CAE asumió el punto en 39,81 KN como de pandeo crítico. Aspecto que deberá ser abordado y profundizado más adelante

en otro trabajo de investigación. En este mismo caso, el momento calculado por estándar NDS, llegó a 12,87 KN.m

A

B

Figura 10.28 –Viga de *Campnosperma panamense* Standl. sometida a rotura en la FASE IV e indicaciones de las Cargas Críticas de Pandeo (P_{cr}) en diferentes momentos, como una medida que demuestra Relajación de los Contraventamientos durante la Experimentación en las Fases I, II y III. Desplazamiento vertical -1 a 50 mm (A). Desplazamiento vertical -1 a 5 mm (B).

10.6.2. Análisis de las cargas críticas del experimento con contraventamientos relajados

Los tratamientos 8 y 13 obedecen a la misma situación de cargamento y arriostramiento. En el primer caso, la madera se trabajó dentro del límite elástico, y en el segundo, se llevó a punto de rotura. Con el fin de verificar la relajación del sistema de arriostramiento o contraventamiento, utilizado en la experimentación, el autor comparó a profundidad esos dos tratamientos que tuvieron en común ocho vigas de MLE, seis de Sajo y dos de Acacia. Como ya se conoce el efecto del proceso de delaminación sobre las líneas de encolado en la madera de Acacia, solo se presentará la comparación con las vigas de Sajo, la cual es detallada en la Figura 10.29.

En general, la ratio promedio entre el M_{cr} de las dos situaciones es 1,43 a favor del tratamiento que se llevó a rotura (el valor para madera clasificada por la NSR-10 llegó a 1,48 y por la CP llegó a 1,38). Este sería el factor con el cual se debería afectar el tratamiento ocho en el caso de aumentarle la rigidez del sistema de arriostramiento.

Figura 10.29 – Valores de Momento Crítico de Pandeo en dos tratamientos con igual configuración en madera de *Campnosperma panamense* Standl. clasificado previamente según la NSR-10 (a) y el Sistema de Clasificación Propuesta – CP (b). Color azul: M_{cr} por NDS, Color naranja: M_{cr} experimento

Pero no solo cabe aumentar la rigidez a ese Sistema, sino a todo el procedimiento experimental dependiendo del número de cargas aplicadas y los contraventos presentes al momento de la prueba. La distribución de tal afectación según la experiencia del autor quedaría como se presenta en la Tabla 10.15.

Tabla 10.15 – Factores para conversión por sistema de arriostramiento relajado a rígido según los cálculos del autor.

Trabas/Cargas	Una Carga (Fase I)	Dos Cargas (Fase II)	Cuatro Cargas (Fase III)
0- Trabas	1,00	1,00	1,00
1- Traba	1,15	1,10	1,05
2- Trabas	1,30	1,21	1,15
4- Trabas	1,60	1,43*	1,30

*Punto de partida a lo demás casos.

El autor no va a hacer uso de estos factores en el presente trabajo, pero si vale la pena tener en cuenta esta información para el caso de las versiones de resultados donde el M_{cr} calculado por el estándar se acerca o sobrepasa el M_{cr} , experimental. Con la aplicación de tales factores la ratio aumentaría al doble o más del doble.

10.7. Conclusiones

¿Por qué es importante estudiar el comportamiento en Flambagem-Estabilidad lateral-Buckling-Lateral stability de la MLE de Acacia y Sajo?

Porque las normativas nacionales referentes a la aceptación de madera para uso estructural son muy exigentes, impidiendo la entrada de piezas con diferentes características al mercado de la construcción. Se desconoce el efecto de las anomalías en la resistencia como nudos, grano inclinado, grietas, rajaduras, perforaciones, médula, fallas de compresión perpendicular. A propósito, la pregunta es: ¿Reportar valores para cálculo estructural o desechar el material con anomalías?

Porque las normativas base han sido realizadas para maderas de USA, Canadá, Europa y en el mejor de los casos se han adaptado como en Chile y Brasil desconociendo el efecto de la estabilidad lateral en las maderas producidas en el escenario nacional como la Acacia y el Sajo. Un ejemplo es la utilización recurrente de la relación $E/G=16$, para el pandeo, cuando en este caso particular de las maderas mencionadas, una relación $18 < E/G < 20$, tuvo un mejor desempeño.

Porque se parte de la hipótesis que coeficientes de esbeltez mayores, mejorarán ostensiblemente el momento de inercia.

Porque al mejorar el momento de inercia, se mejora la resistencia de la pieza individual, siendo necesario solo mejorar la cantidad y calidad de los soportes laterales, para cumplir los parámetros de estabilidad lateral de las normas ya establecidas (USA, EUROPA, Chile, Brasil).

Porque colocando los apoyos laterales, con la rigidez adecuada, además de mantener la estabilidad de la pieza, se conserva una mejor resistencia y se pueden reducir los costos globales del componente madera en el proyecto. A propósito, es importante recalcar que las cargas laterales que se generan con el pandeo están en el orden del 5-10% de las verticales, por lo tanto, el costo para gestionarlas se hace factible.

Porque si los precios de la MLE con estas dos especies son menores, comparados con los esquemas tradicionales de construcción, se habrá identificado una ventana para permear el mercado nacional.

Porque necesitamos armar un código de construcción en madera para Colombia (NSR-19, ya en marcha), partiendo de especies que crecen en el país con oferta de mercado viable, que satisfagan los parámetros de transformación, los volúmenes demandados, la expectativa de costos y los tiempos de entrega. Que además cubra la madera de Chile e importada. El autor hace parte de este comité, NSR-19, que ha iniciado trabajo este año y espera extender los resultados aquí alcanzados a la nueva normativa nacional de construcción con madera.

10.8. Recomendaciones

Se comprobó que la utilización de madera de Sajo y Acacia puede ser atractiva en el mundo de los laminados estructurales. Se deben iniciar construcciones de porte menor con estas dos especies en el escenario nacional, aprovechando la oferta alta desde el Pacífico y la Orinoquía colombiana.

La incorporación de anomalías de la madera de estas dos especies al conjunto laminado es efectiva, en la medida que reduce los costes de fabricación, mejora el aprovechamiento del material, presiona en menor medida la demanda de madera desde el bosque plantado o natural, reduce los costos de gestión de residuos sólidos, al igual que la generación de otras líneas de trabajo y aprovechamiento que poco tenían que ver con la

madera estructural, o que antes era eliminada del proceso de madera laminada. Todo esto definitivamente aumentará el nivel de servicio.

Se abre la posibilidad de hacer laminados esbeltos con estas especies, aprovechando de una mejor manera los momentos de inercia del material. Para ello, se deberán iniciar estudios referentes a las uniones y resolver temas asociados a la delaminación de Acacia a escala real, la baja resistencia en tensión perpendicular del Sajo, al igual que la resistencia al arranque del tornillo, y el posible uso de materiales de refuerzo.

Es urgente determinar las propiedades de la madera como material ortotrópico y anisotrópico, tal que se mejore la predicción en su comportamiento cuando se haga uso de paquetes computacionales basados en la aplicación de la teoría de elementos finitos.

Se propone el uso de los factores de rigidez expuestos en la parte final del documento con el fin de definir nuevos ratios con la metodología del NDS y proponer cambios pausados en la normatividad colombiana a favor de la resistencia del material, previamente clasificado y certificado por autoridad competente.

Referencias

ABRANTES, C. A. **Determinação da carga crítica de instabilidade lateral no regime linear elástico , em vigas de madeira laminada colada (MLC)** Piracicaba Celso Antonio Abrantes Piracicaba. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2012.

ADVANCED SENSOR TECHNOLOGY INC., F. **CELDA DE CARGA TRACCIÓN COMPRESIÓN / DE TIPO OBLEA / DE ACERO INOXIDABLE / DE ALUMINIO ANODIZADO**. Disponível em: <http://www.directindustry.es/prod/futek-advanced-sensor-technology-inc/product-14287-573261.html#product-item_573272>. Acesso em: 7 out. 2018.

AENOR. Eurocódigo 5 Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. p. 136, 2006.

AITC. **ANSI/NFoPA NDS-1991, National Design Specification for Wood Construction, AFPA, 1250USA**, 1991.

AMERICAN WOOD COUNCIL. **National Design Specification (NDS) for Wood Construction 2018 Edition**Leesburg, VA, USA, 2018.

AMERICAN WOOD COUNCIL, A. **National Design Specification (NDS) Supplement: Design Values for Wood Construction**Leesburg, VA, USA, 2017.

ARGÜELLES, R.; ARRIAGA, F.; MARTÍNEZ, J. J. **Estructuras de Madera Diseño y Cálculo**. 2a. ed. Madrid, España: AiTiM, 2000.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA. **NSR-10, Título G Norma Sismoresistente Colombiana**Colombia, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, A. **NBR7190/2010: Projeto de Estruturas de Madeira**Brasil, 1996.

BEDON, C.; FRAGIACOMO, M. Derivation of buckling design curves via FE modelling for in-plane compressed timber log-walls in accordance with the Eurocode 5. **European Journal of Wood and Wood Products**, 2016.

CALIL, C. J.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de Elementos Estruturais em Madeiras**. Sao Carlos, SP, Brasil: [s.n.].

CAMICON; MIDUVI. **Norma Ecuatoriana de la Construcción - NEC-SE-MD - Estructuras de Madera**Ecuador, 2014.

DE LA FUENTE ANTEQUERA, A.; PIALARISSI CAVALARO, S. H.; BAIRÁN GARCÍA, J. M. Análisis de un caso de inestabilidad lateral de un viga de hormigón pretensado de gran luz en fase de izado. **Hormigón y Acero**, 2017.

DESSAULT SYSTEMES. <https://www.3ds.com/>. Disponível em: <<https://www.3ds.com/products-services/simulia/services/training-courses/course-descriptions/introduction-to-abacuscae/>>. Acesso em: 16 out. 2018.

DOUGLAS, B. K. **Designing for Lateral-Torsional Stability in Wood Members**. Washington DC: [s.n.].

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, C. **EN 408 - Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties**, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, C. **Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General Common rules and rules for buildings** BelgicCEN, , 2006.

GALLEGUILLOS, J.; GIULIANO, G. M.; DECHENT, P. Efectos en el diseño de vigas rectas y curvas de madera laminada encolada de pino radiata de los cambios incluídos en la norma NCh 1198.of2006. **Revista Madeira Arquitetura & Engenharia**, v. 8, n. 21, 2007.

HAKKARAINEN, J. **Development of engineered wood products - The industry perspective**. WCTE 2016 - World Conference on Timber Engineering. **Anais...**2016

HANSSON, M.; LARSEN, H. J. Recent failures in glulam structures and their causes. **Engineering Failure Analysis**, v. 12, n. 5 SPEC. ISS., p. 808–818, 2005.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, I. **NCh 1198 OF2006 Madera - Construcciones en Madera- Cálculo**Chile, 2006.

JUNAC, J. DEL A. DE C. **Manual de clasificación visual para madera estructural**. Lima, Perú: [s.n.].

KIRBY, P. A.; NETHERCOT, D. A. **Design for Structural Stability**. Suffolk, UK: Gramada Publishing, 1979.

L.E., G. R.; FIERRO P.E., E. A. **Notas de Dinamica Estructural**. Santiago de los Caballeros República Dominicana: Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra, 2005.

LAM, F.; OH, J. K. Performance of Canadian glulam columns with new laminae E requirements. **Engineering Structures**, v. 172, n. June, p. 85–93, 2018.

MADSEN, B. **Structural Behaviour of Timber**. First Edio ed. Altona, Manitoba, Canada: Timber Engineering LTD. North Vancouver; British Columbia, Canada, 1992.

MADSEN, B.; BARRET, J. D. **Time-Strength relationships for lumber**. Vancouver, Canada: [s.n.].

PARMIGIANI, M. S. et al. **CIRSOC 601. Reglamento argentino de estructuras de madera**Argentina, 2013.

PEI, C. **Precision LVDT Signal Conditioning Using Direct RMS to DC Conversion – Design Note 362**Technology. CA, USA: [s.n.].

PINEDA SCHLEEF, R. E. **EVALUACIÓN TEÓRICO - EXPERIMENTAL DE LA NORMA CHILENA NCH 1198 . OF2006 Y SU EQUIVALENTE EUROPEA , EUROCÓDIGO 5 , EN MADERA LAMINADA ENCOLADA CON UNIONES ENDENTADAS**. [s.l.] Universidad Austral de Chile, 2008.

PORTEOUS, J. Composite section I-beams. **Wood Composites**, p. 169–193, 2015.

R. F. HOOLEY; B. MADSEN. Lateral Stability of Glued Laminated Beams. **Journal of the**

Structural Division, v. 90, n. 3, p. 201–218, 1964.

RESTREPO OROZCO, H. I. **Estimación del rendimiento forestal con información espacialmente explícita y análisis financiero de plantaciones forestales en Colombia**. [s.l.] Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 2010.

S. TIMOSHENKO; J.M. GERE. **Theory of elastic stability**. 2nd Edition ed. New York, NY: Mc Graw-Hill Book Co. Inc. , 1963.

THE MATHWORKS, I. **MATLAB and Statistics Toolbox Release 2015b**Natick, Massachusetts, United States, 2015.

TIMOSHENKO, S. **Resistencia de Materiales. Primera Parte: Teoría Elemental y problemas**. 2a. ed. Madrid, España: [s.n.].

VISHAY PRECISION GROUP, V. T. **Load Cells and Indicators**. Rancho Cucamonga, CA, USA: [s.n.]. Disponible en: <<https://vpgtransducers.com/es>>.

WAGNER, M. et al. **EJEMPLOS DE CÁLCULO ESTRUCTURAL EN MADERA, Informe Técnico N° 182**. 2a. ed. Santiago, Chile: [s.n.].

XIAO, Q.; DOUDAK, G.; MOHAREB, M. Numerical and experimental investigation of lateral torsional buckling of wood beams. **Engineering Structures**, 2017.

YLINEN, A. A method of determining the buckling stress and the required cross-sectional area for centrally loaded straight columns in elastic and inelastic range. 1956.

ZAMBRANO TRIVIÑO, C. A. **Diseño de piezas de madera de pino radiata a través del método LRFD y su aplicación a una estructura de madera**. [s.l.] Universidad Austral de Chile, 2012.

ZHOU, Q.; XIAO, Y. **Flexural Behavior of FRP Reinforced Glulam Beams**. CICE 2010 - The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. **Anais...**Beijing, China: 2010

Anexo F

Diagramas esquemáticos de los diferentes montajes contemplados antes de la prueba
(Fuente: Mecanizados López, Bogotá, D.C., Colombia)

Figura 10.30 – Un actuador y un contraventamiento: Tratamiento 2

Figura 10.31 – Dos actuadores, dos puntos de aplicación de carga y dos contraventamientos: Tratamiento 7 (En este caso finalmente se usaron dos actuadores cada uno con su propia celda de carga, lo mostrado en el esquema obedece a la idea original)

Figura 10.32 – Dos actuadores, cuatro puntos de aplicación de carga y cuatro contraventamientos: Tratamiento 12

Anexo G

Casos establecidos en el NDS 2018 y apropiados por la normativa chilena y colombiana para el cálculo de la longitud efectiva de pandeo en función del tipo y ubicación de cargas con diferentes tipos de traba o contraventamiento.

Figura 10.33 – Casos de cargas distribuidas y puntuales y formas de contraventamiento que determinan el valor de l_v (l_u).

Tabla 10.16 – Valores de longitud efectiva l_e para los casos de contraventamiento presentados en la Figura 10.33 –, correspondientes a las longitudes l_v (l_u).

Cantilíver (1)		Cuando $l_v/d < 7$	Cuando $l_v/d > 7$
A	Carga uniforme repartida	$l_e = 1.33 l_v$	$l_e = 0.90 l_v + 3d$
B	Carga concentrada en extremo libre	$l_e = 1.87 l_v$	$l_e = 1.44 l_v + 3d$
Viga de una sola luz (1,2)		Cuando $l_v/d < 7$	Cuando $l_v/d > 7$
C	Carga uniformemente repartida	$l_e = 2.06 l_v$	$l_e = 1.63 l_v + 3d$
D	Carga concentrada en el Centro sin soportes intermedios	$l_e = 1.80 l_v$	$l_e = 1.37 l_v + 3d$
E	Carga concentrada en el Centro con soportes laterales en $l/2$		$l_e = 1.11 l_v$
F	Dois carga concentrada en los tercios y soportes laterales en $l/3$		$l_e = 1.68 l_v$
G	Tres cargas concentradas iguales y soportes laterales en $l/4$		$l_e = 1.54 l_v$
H	Cuatro cargas concentradas y soportes laterales en $l/5$		$l_e = 1.68 l_v$
I	Cinco cargas concentradas iguales y soportes laterales en $l/6$		$l_e = 1.73 l_v$
J	Cinco cargas concentradas iguales y soportes laterales en $l/7$		$l_e = 1.78 l_v$
K	Siete o más cargas concentradas, regularmente distribuidas con soportes laterales en los puntos de aplicación		$l_e = 1.84 l_v$
L	Momentos iguales en los extremos con soportes laterales extremos		$l_e = 1.84 l_v$

Notas:

- 1) Para una sola luz o miembros en cantilíver con condiciones de carga no especificadas en esta tabla
 $l_e = 2.06 l_v$ Cuando $l_v/d < 7$
 $l_e = 1.63 l_v + 3d$ Cuando $7 < l_v/d < 14.3$
 $l_e = 1.84 l_v$ Cuando $l_v/d > 14.3$
- 2) En aplicaciones de múltiples luces, se deben usar valores tabulados o realizar un análisis de ingeniería.

Fuente: AITC, NCh1198, NSR-10 (AITC, 1991; ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA, 2010; INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 2006)

Anexo H

Intercambio de e-mail 's con personal de la empresa Metsä de Finlandia.

LATERAL TORSIONAL BUCKLING

Lecomte Cedric <cedriclecomte@metsagroup.com>

Apr 18,
2017, 2:31
AM

to me

M. Polanco-Tapia,

You recently contacted M. Jouni Hakkarainen, Director R&D of Metsäwood, about Lateral Torsional Buckling. As member of his team in charge of this topic, he transferred your email to me.

At the time being, the full work is a private research and I can't give you a full copy of it. Anyway, if you have precise questions on mechanical or safety issues, I'll try to bring some answer.

Best regards,

CEDRIC LECOMTE

Engineering and R&D Manager

METSÄ WOOD – Building & Industry France

11 Avenue Dubonnet, 92407 Courbevoie

Tel: +33 (0)1 41 32 36 38

Mobile: +33 (0)6 78 26 69 12

cedriclecomte@metsagroup.com

metsawood.com/fr

Metsä Wood vous propose de devenir incollable sur le bois.

>> Cliquez sur l'image ci-dessous et entrez dans la **Timber Academy !**

...

Apr 18,
2017, 7:04
PM

cpolanco@usp.br

to Lecomte

Mr Lecomte, Cedric

Good day,

Thank you for the response to my request. I regret that the company can not share this important particular study of lateral stability.

If possible I would like to know your appreciation on these five topics:

1. Why was the study carried out "Lateral torsional buckling of bended Kerto LVL elements" and what were the more important conclusions

2. What is your opinion regarding the current design of wooden beams, with special mention in lateral stability in slenderness members ($h/b \geq 10$)?
 3. ¿Do you think that the European standard can be improved for the design of beams when talking about lateral stability, in order to make the elements in wood products more competitive?
 4. With regard to question two, What specific aspects should be improved?
 5. Can you provide an example of a beam calculation with the traditional Eurocode methodology and some proposed methodology by you (Metsä) regarding to lateral stability?
- ¿What are the ratios for flexural rigidities, lateral buckling limit state moments, torsional rigidities and strength limit state moments?

Thank you very much for the attention to this email and its answers.

Sincerely,

César Polanco Tapia

Professor Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, D.C., Colombia

PhD (c) Universidade de Sao Paulo, Brazil

Whatsapp: +5519982285459

De: "Lecomte Cedric" <cedriclecomte@metsagroup.com>
Para: cpolanco@usp.br
Enviadas: Terça-feira, 18 de Abril de 2017 2:31:07
Assunto: LATERAL TORSIONAL BUCKLING

Lecomte Cedric <cedriclecomte@metsagroup.com>

Apr 19,
2017, 8:09
AM

to me

Dear M. Polanco-Tapia,

Please find my answers in your mail below. Do not hesitate to contact me for any question.

Best regards,

Cedric Lecomte

De : cpolanco@usp.br [mailto:cpolanco@usp.br]

Envoyé : mercredi 19 avril 2017 02:05

À : Lecomte Cedric <cedriclecomte@metsagroup.com>

Objet : Re: LATERAL TORSIONAL BUCKLING

Mr Lecomte, Cedric

Good day,

Thank you for the response to my request. I regret that the company can not share this important particular study of lateral stability.

If possible I would like to know your appreciation on these five topics:

1. Why was the study carried out "Lateral torsional buckling of bended Kerto LVL elements" and what were the more important conclusions

The study was carried out in order to bring competitiveness to our products, especially used in 3-pin frames. The important conclusions, regarding our design code "Eurocode 5", were:

- The bending moment diagram is capital and not accounted for in a satisfying manner at the moment in the code;
- The influence of the position of the load is described in a very approximate formula that yields to oversize the members
- The interaction between bending and compression is not formulated in a coherent manner
- The positive effect of tension is not accounted for and could be an important improvement

2. What is your opinion regarding the current design of wooden beams, with special mention in lateral stability in slenderness members ($h/b \geq 10$)?

- I'd say it depends on the code you're using, but the key is in the way to account for imperfection and statistical distribution of mechanical properties.

3. Do you think that the European standard can be improved for the design of beams when talking about lateral stability, in order to make the elements in wood products more competitive?

- The gains can be categorized in 2: gains due to mechanics (shape of bending moment, interaction M-N, position of the load,...) and gains due to safety, namely the design formula. Regarding EC5, exploiting mechanics would bring huge gains (currently 30-40% and till 200% in some cases), while gain due to safety are more difficult to estimate. At the time being, the formula in EC could be a sensitively on the unsafe side in some cases.

4. With regard to question two, what specific aspects should be improved?

- I'd say the ones listed as answer to question 1

5. Can you provide an example of a beam calculation with the traditional Eurocode methodology and some proposed methodology by you (Metsä) regarding to lateral stability ?

¿What are the ratios for flexural rigidities, lateral buckling limit state moments, torsional rigidities and strength limit state moments ?

Yes, here it is : it is a Kerto-S rafter (57x650mm):

And here's the comparison between EC5 (left column) and what I found from research (confirmed by tests)

Load @ neutral axis					
With normal force effect			Buckling properties		
P_{crit}	21,37	kN	l_{fi}	5,25	m
$M_{p_{crit,N}}$	-43,74	kNm	λ_{rel}	5,58	-
$N_{p_{crit}}$	17,19	kN	k_c	0,03	-
σ_m	10,90	Mpa			
σ_c	0,46	MPa			
LTB parameters EC5			LTB parameters research (free of N)		
I	7,60	m	I	7,60	m
C_{lef}	0,80	- (table 6.1)	C_{na}	38,34	(SEM-MathCad)
l_{ef}	6,08	m	P_{crit}	27,88	kN
$M_{crit,EC5}$	21,705	kNm	$M_{p_{crit}}$	-57,21	kNm
LTB properties EC5			LTB properties - research		
$\sigma_{crit,EC5}$	5,41	Mpa	σ_{crit}	14,25	Mpa
λ	2,85	-	λ	1,76	-
k_{crit}	0,12	-	k_{crit}	0,32	-
Rates EC5			Rates research		
Bending	406%		Bending	58%	
Compression	42%		Compression	42%	Ratio
Σ	448%		Σ	100%	4,46

The gain is here 448%, which is huge.

Thank you very much for the attention to this email and its answers.

Sincerely,
César Polanco Tapia