

Caracterización de maderas usadas en Boyacá de acuerdo con el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente

Wood species used in Boyacá characterization, according the Colombian Earthquake-Resistant Construction's Regulations

Fecha de recepción: 17 de marzo de 2012
Fecha de aprobación: 5 de junio de 2012

Julián Andrés Zárate Ramírez*
Óscar Javier Gutiérrez Junco**

Resumen

Se caracterizan las seis especies de maderas comúnmente utilizadas como elementos estructurales en el departamento de Boyacá, a partir de sus propiedades mecánicas y elásticas, y usando como referencia el capítulo G del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente del 2010. Las especies estudiadas fueron: abarco, amarillo, cedro, eucalipto, guayacán y pino. Los ensayos se realizaron en el laboratorio de estructuras de la Uptc, e incluyeron: densidad aparente, contenido de humedad, resistencia a la flexión, módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y tracción. A los datos

Abstract

Here are characterized 6 wood species commonly used as structural elements in Boyacá department, according their mechanical and elastic properties by using the 2010 Colombian Regulation on Earthquake-Resistant Construction, Chapter G. The species studied were: Abarco, *Diphysarobinioides*, cedar, eucalyptus, lignum vitae and pine. The tests were conducted at the UPTC Structures Laboratory and included: bulk density, humidity content, bending strength, elastic modulus, compressive and tensile strength.

The data underwent a statistical analysis, according

* Ingeniero Civil, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Grupo de Investigación en Construcción Antisísmica GICA. Correo electrónico: andreszarater@gmail.com

** Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Especialista en Estructuras, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Magíster en Ingeniería Civil (Estructuras y Sísmica), Universidad de los Andes. Investigador Grupo de Investigación en Construcción Antisísmica GICA. Profesor, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Correo electrónico: oscarjavier.gutierrez@uptc.edu.co

obtenidos se les realizó un análisis estadístico y, según la metodología contenida en el NSR-10, una reducción que generaría valores equiparables a los del reglamento. Las maderas estudiadas mostraron un comportamiento óptimo para ser usadas como elementos estructurales.

Palabras clave: Construcciones sismorresistentes, Madera estructural, Abarco, Amarillo, Cedro, Eucalipto, Guayacán, Pino.

the method stated in NSR-10, a reduction that should produce values comparable with those stated in the Regulation. The studied woods showed a suitable behavior, to be used as structural elements, due that their properties are within the allowable ranges.

Key words: Earthquake-Resistant Constructions, Structural Wood, Abarco, *Diphysarobinioides*, Cedar, Eucalyptus, Lignum Vitae and Pine.

I. INTRODUCCIÓN

El departamento de Boyacá carece de estudios que cualifiquen las maderas de mayor uso estructural en su jurisdicción, a partir de sus propiedades físicas y mecánicas. La investigación que aquí se presenta permitió obtener parámetros útiles en el proceso de diseño sísmo resistente con elementos de madera, y tomó como puntos de referencia las Normas Técnicas Colombianas contenidas en el capítulo G del reglamento NSR-10 y el trabajo denominado «Evaluación de propiedades de resistencia de maderas más usadas en Boyacá» [1], que evalúa la madera en el departamento con base en la NSR-98.

La metodología implementada en este estudio comprendió tres etapas: La primera, en la cual se adquirieron las especies de madera objeto de estudio, y se fabricaron y acondicionaron las probetas para cada prueba. La segunda se realizó en los laboratorios de estructuras de la Uptc, donde se evaluaron las características generales de las maderas y se efectuaron los ensayos de flexión, resistencia a la compresión y a la tracción perpendicular y paralela a la dirección de las fibras. La tercera, un análisis estadístico de los datos obtenidos, y la generación de las tablas y gráficas pertinentes. Además, se ajustaron los datos a la metodología del reglamento NSR-10, y se compararon con los contenidos en ella.

Todo el proceso mencionado permitió mostrar valores que se encuentran en los rangos admitidos por el reglamento para cada tipo de especie y, además, favorecen su utilización como elementos estructurales.

II. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

Para iniciar la investigación fue necesario adquirir las especies de maderas elegidas y disponibles en los aserraderos de la región; se verificaron las condiciones en las que se encontraban, se escogieron las mejores

y se aislaron, hasta el momento del ensayo, de factores que pudieran alterar sus propiedades. Los tipos de maderas estudiadas, según la clasificación hecha por el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) en 75 especies [2], corresponden a:

Abarco (*Carinianapyrififormis* Miers): árbol que puede alcanzar una altura de 40 m y un diámetro de 2 m, y que en Colombia se encuentra en el Amazonas, la Costa Atlántica, el Pacífico, Putumayo, el Magdalena Medio y Urabá.

Amarillo (*Terminalia Amazonia*): puede alcanzar hasta 35 m de altura y 1 m de diámetro; se localiza en la Amazonia, Magdalena Medio y Chocó.

Cedro (*Cedrelingacatenaeformis*): se encuentra en la Amazonia central, Nariño y Putumayo, y puede alcanzar una elevación de hasta 40 m y un diámetro de 0,65 m.

Eucalipto (*Eucalyptus globulus*): puede alcanzar una altura de 100 m y un diámetro de 2,5 m, y se encuentra en la sabana de Bogotá y en los departamentos de Antioquia, Boyacá y Caldas.

Guayacán (*Centrolobium paraense*): se halla en los valles del río Magdalena y Urabá; alcanza una altura de hasta 30 m y un diámetro de hasta 1,2 m.

Pino (*Pinus radiata*): se encuentra plantado en Cundinamarca y Boyacá; alcanza una altura de hasta 60 m y 1 m de diámetro.

La Figura 1 muestra fotografías de las especies de maderas consideradas en el estudio.

Contando ya con la materia prima se procedió a elaborar las probetas para cada ensayo, con las dimensiones y geometría indicadas en las normas [3, 4]. La Figura 2 muestra la madera para las probetas y la elaboración de ellas.



Figura 1. Maderas evaluadas en la investigación



Figura 2. Madera para elaborar las probetas (a), elaboración de las probetas (b)

Una vez fabricadas las probetas, se realizaron los ensayos que determinarían las propiedades físicas y mecánicas de las maderas estudiadas. Las propiedades mencionadas son las siguientes:

Peso específico aparente: este ensayo se realizó, según lo indica la NTC 290, cortando pequeñas secciones cercanas a las superficies de falla de todas las probetas de madera. El peso de la muestra se obtuvo mediante lectura directa en una balanza electrónica y se expresó en gramos [5]. El volumen se evaluó a partir de sus dimensiones: ancho (a), la altura (h) y longitud (l); (1) se expresó en cm^3 .

$$V = a \times h \times l \quad (1)$$

El peso específico aparente se obtuvo mediante la ecuación 2:

$$PE_{CH=12\%} = P_{CH=12\%} / V_{CH=12\%} \quad (2)$$

Donde: $PE_{CH=12\%}$ = *Peso específico de la probeta seca al aire (g/cm^3)*
 $P_{CH=12\%}$ = *Peso de la probeta seca, al aire (g)*

$V_{CH=12\%}$ = *Volumen de la probeta seca al aire (cm^3)*

Contenido de humedad: esta propiedad relaciona la masa de agua contenida en la pieza y la masa de la misma en estado seco (anhidra), expresada en porcentaje [6]. Para obtener el contenido de humedad de cada probeta, se cortó un trozo cercano a la superficie de falla. Se pesó con balanza electrónica y se expresó su valor en gramos. Posteriormente, se secó la muestra en un horno a una temperatura de $103^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ y 24 horas después, cuando se consideró que el peso era constante, se registró nuevamente su peso [7]. Para este ensayo se tomó como referencia la NTC 206 que determina el contenido de humedad para ensayos físicos y mecánicos. El contenido de humedad puede obtenerse con la ecuación 3:

$$CH\% = ((P_h - P_o) / P_o) \times 100 \quad (3)$$

Donde: $CH\%$ = Contenido de humedad(%)
 P_h = Masa inicial (húmedo) (gr)
 P_o = Masa anhidro (seco) (gr)

La Figura 3 muestra el procedimiento realizado para obtener el contenido de humedad en las especies caracterizadas.



Figura 3. Pesaje de probeta (a), muestras en el horno eléctrico (b)

Para poder caracterizar las maderas a partir de sus propiedades mecánicas, útiles en el diseño estructural, se realizaron los ensayos que se mencionan a continuación:

Determinación de la resistencia a la flexión: el ensayo de determinación de la resistencia a la flexión se realizó en las seis especies del estudio, según lo indica la NTC 663: En una pequeña viga simplemente apoyada en dos soportes en cada uno de sus extremos, las dimensiones elegidas fueron de 760 mm de longitud con una sección transversal de espesor y ancho iguales a 50mm. La luz entre apoyos fue de 710 mm y la carga puntual se aplicó en el centro de los apoyos a una velocidad constante de 2,5 mm por minuto. El

ensayo se efectuó hasta cuando se presentó la falla del material [8].

La resistencia a la flexión se calculó mediante la expresión 4:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 3 \times P \times L / 2 \times a \times e^2 \quad (4)$$

Donde: $\sigma_{m\acute{a}x}$ = Resistencia máxima a la flexión (Mpa)

P = Carga (N)

L = Longitud entre apoyos (mm)

a = Ancho de la probeta en dirección radial (mm)

e = Altura de la probeta en la dirección tangencial (mm)

La Figura 4 muestra el ensayo de flexión estática en maderas y los tipos de falla que se presentaron.



Figura 4. Ensayo de flexión (a), fallas por astillamiento (b), falla por quebramiento (c)

Determinación de la resistencia a la compresión axial o paralela al grano: este ensayo se realizó según lo indica la NTC 784. El ensayo se hizo en probetas con un espesor (e) y un ancho (a) de 50mm y una altura de 200 mm. Las probetas se colocaron sobre una de sus caras y en sentido vertical, se aplicó carga en la cara opuesta buscando que la misma fuera realmente paralela a las fibras [9]. Los datos obtenidos se procesaron para obtener valores de resistencia a la compresión axial calculada con la expresión 5:

$$\sigma = P / A \quad (5)$$

Donde: σ = Esfuerzo (Mpa)

P = Carga (N)

A = Área de la selección transversal (mm²)

La Figura 5 muestra el ensayo de compresión paralela y las fallas presentes en dos de los tipos de maderas.

Determinación de la resistencia a la compresión perpendicular al grano: el ensayo se realizó según lo indica la NTC 785, con el accesorio metálico necesario para aplicar correctamente la carga, hasta alcanzar una deformación del 5% de la altura de la pieza. Las probetas que se utilizaron en este ensayo fueron piezas prismáticas rectas con un espesor (e) y un ancho (a) iguales, de 50mm, y una longitud de 150 mm. Se sometieron a carga por una de las caras laterales, el ensayo se realizó a una velocidad constante de 0,3 mm por minuto [10]. La figura 6 muestra el ensayo de compresión perpendicular al grano.



Figura 5. Ensayo de compresión paralela (a), Amarillo falla cuña (b), Eucalipto Falla cuña (c)

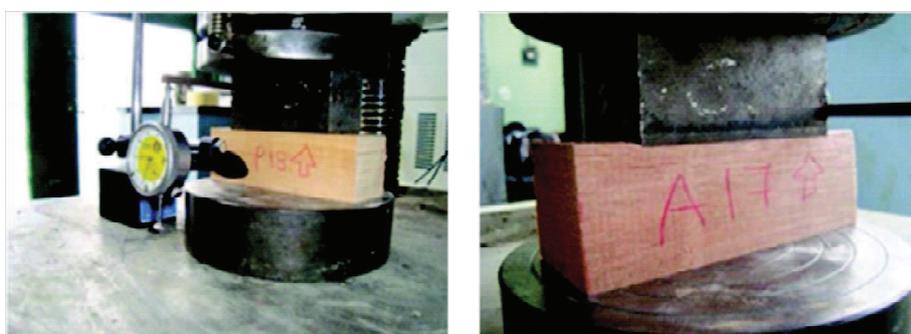


Figura 6. Ensayo de compresión perpendicular en pino (a),Fibras comprimidas en abarco (b)

Determinación de la tracción paralela al grano: el ensayo de determinación de la tracción paralela al grano se realizó con probetas acondicionadas según la NTC 944 y coincidentes con la forma de las mordazas. En el ensayo se aplicó una carga que buscaba desprender las fibras de la probeta por tensión en las mismas, la velocidad del ensayo fue de 1mm por minuto [11]. Se utilizó un extensómetro

ubicado en el centro de la probeta sobre las caras radiales y con una separación entre cuchillas de 50 mm para medir la deformación y obtener el módulo de elasticidad del material en forma directa. En este ensayo la falla producida fue súbita y frágil, debido a la naturaleza del material. La Figura 7 muestra la realización del ensayo de tracción paralela al grano y los tipos de falla presentados.



Figura 7. Ensayo de tracción (a), falla de Tracción simple (b), Falla fibra inclinada (c)

Determinación de la tracción perpendicular al grano: este ensayo mide la resistencia que opone la madera a una carga de tracción en la dirección normal a las fibras. Según la posición del plano de falla con respecto a los anillos de crecimiento, se puede distinguir la tracción perpendicular tangencial y la tracción perpendicular radial. La prueba se realizó, como lo indica la NTC 961, en los dos sentidos y

usando accesorios que coincidían con la geometría de las probetas. La probeta tenía una sección de espesor (e), ancho (a) y altura iguales a 50 mm con cortes semicirculares laterales con un radio de 13 mm, que sirvieron como estructura de soporte [12]. El ensayo se realizó a una velocidad constante de 2,5 mm por minuto. Los tipos de falla que se presentaron en el ensayo se muestran en la figura 8.

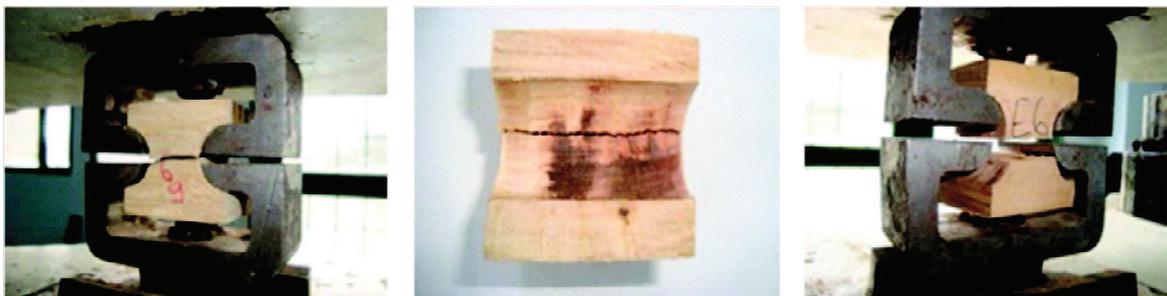


Figura 8. Falla tracción en dos tipos de maderas, guayacán (a, b) y eucalipto (c)

Los resultados obtenidos en los ensayos se muestran a continuación.

prueba. Para las seis especies de madera estudiadas se obtuvieron las siguientes propiedades físicas.

III. RESULTADOS

A. *Peso específico aparente*

Después de realizar los ensayos se tabularon los datos obtenidos, y mediante un estudio estadístico se encontraron valores promedio en los distintos tipos de

La Tabla 1 muestra los valores promedio obtenidos en la totalidad de las probetas, y sin variaciones superiores al 10%.

Tabla 1. Peso específico aparente promedio obtenido en los seis tipos de madera

Tipo de madera	Peso específico aparente (gr/cm ³)
Abarco	0,72
Amarillo	0,74
Cedro	0,44
Eucalipto	0,74
Guayacán	0,74
Pino	0,49

B. *Contenido de humedad*

Los valores obtenidos para el contenido de humedad se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Humedad promedio obtenida en los seis tipos de madera más usados en Boyacá

Tipo de madera	Contenido de humedad (%)
Abarco	13,04
Amarillo	12,39
Cedro	13,26
Eucalipto	13,82
Guayacán	12,93
Pino	13,55

Las propiedades mecánicas y elásticas de las especies en estudio se obtuvieron a partir de ensayos de carga, que arrojaron valores que no debían variar en porcentajes altos entre la misma prueba y en la misma especie. Para lograr lo anteriormente mencionado, la norma NTC 301, en su primera actualización, indica unos índices máximos de variación admitidos en los diferentes tipos de ensayos. La tabla 3 presenta los coeficientes de variación permitidos.

Cuando el contenido de humedad al cual fueron evaluadas las probetas difirió del 12% se requirió la aplicación de los factores de corrección por cada unidad porcentual mayor o menor. En la Tabla 4 se muestran los índices de factor de corrección por un 1% de variación para el contenido de humedad en los diferentes tipos de ensayo.

Tabla 3. Coeficientes de variación permitidos para cada ensayo

Ensayos	Coeficientes de variación (%)
Flexión	
Módulo de rotura	16
Módulo de elasticidad	22
Compresión paralela	
Módulo de rotura	14
Compresión perpendicular	
Esfuerzo en el límite proporcional	28

Fuente: NTC 301 (Primera actualización)

Tabla 4. Índice de factores de corrección para el contenido de humedad

Ensayo	Corrección (%)
Flexión RLP (Resistencia en el límite proporcional)	5
Flexión RUM o EUM (Esfuerzo unitario máximo)	4
Flexión MOE (Modulo de elasticidad)	2
Compresión paralela RUM	5
Compresión paralela RLP	6
Compresión perpendicular RUM	5,5
El valor dado en la corrección indica el porcentaje de variación por cada cambio del 1% en el contenido de humedad.	

Fuente: NTC 301 (Primera actualización)

Además, para ensayos de tracción el valor de corrección fue del 3% por cada grado de variación en el contenido de humedad. A partir de las correcciones e índices de variación permitidos por las NTC, se obtuvieron valores que permitieron caracterizar las maderas; estos datos se relacionan a continuación para cada ensayo.

C. Resistencia a la flexión

Este ensayo produjo las gráficas que aparecen en la figura 9, que muestran el comportamiento de cada especie frente a esta prueba de resistencia.

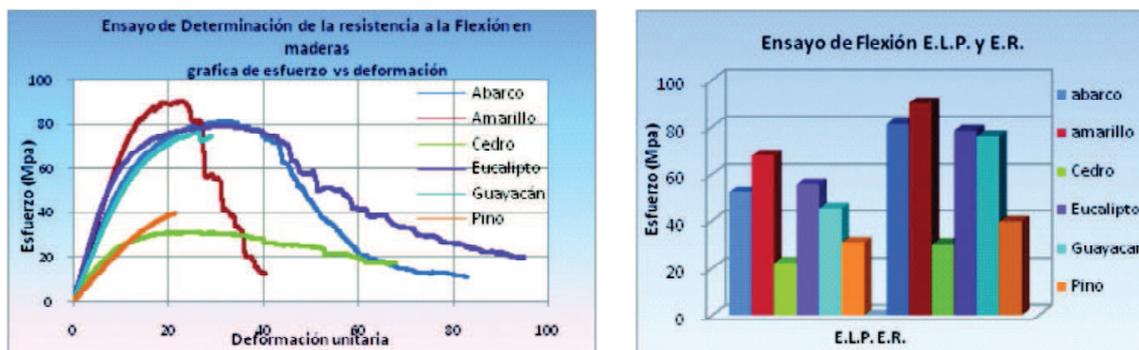


Figura 9. Ensayo flexión gráfica esfuerzo-deformación (a), esfuerzo límite proporcional (E.L.P.) y esfuerzo de rotura (E.R.) (b)

La Tabla 5 muestra los valores obtenidos en el ensayo (E.L.P.), esfuerzo de rotura (E.R.) y módulo de flexión estática para el esfuerzo límite proporcional de elasticidad (M.O.E.) obtenido en forma indirecta.

Tabla 5. Resistencia a la flexión en las maderas

Madera	Tipo resistencia (Mpa)	ESTADÍSTICA				Deflexión (mm)
		Máximo	Mínimo	Media	Desv. estándar	
Abarco	E.L.P.	54,52	49,41	52,25	2,60	10,09
	E.R.	82,07	80,32	81,17	0,87	32,04
	MO.E.	8638,71	8337,14	8478,07	151,75	
Amarillo	E.L.P.	69,01	66,45	67,87	1,30	10,41
	E.R.	91,43	87,28	90,03	2,38	22,82
	MO.E.	10945,29	10898,79	10929,21	26,36	
Cedro	E.L.P.	23,01	21,13	22,23	0,98	8,26
	E.R.	34,47	27,81	30,39	3,56	18,33
	MO.E.	4629,04	4427,76	4509,88	105,63	
Eucalipto	E.L.P.	57,08	54,52	55,66	1,31	8,65
	E.R.	81,09	75,03	78,46	3,10	27,72
	MO.E.	10897,38	10608,28	10736,41	147,32	
Guayacán	E.L.P.	48,56	43,45	45,44	2,73	9,26
	E.R.	78,27	73,71	76,31	2,34	26,71
	MO.E.	8323,51	8057,23	8215,04	139,82	
Pino	E.L.P.	31,95	29,65	30,89	1,16	14,06
	E.R.	44,82	34,65	39,68	5,08	21,44
	MO.E.	3768,05	3636,81	3691,48	68,30	

D. Resistencia a la compresión axial o paralela al grano

cargas de compresión paralelas a la dirección de su crecimiento; estas están contenidas en la Figura 10.

Este ensayo permitió obtener unas gráficas que muestran el comportamiento de la madera frente a

La Tabla 6 muestra los valores obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión paralela:

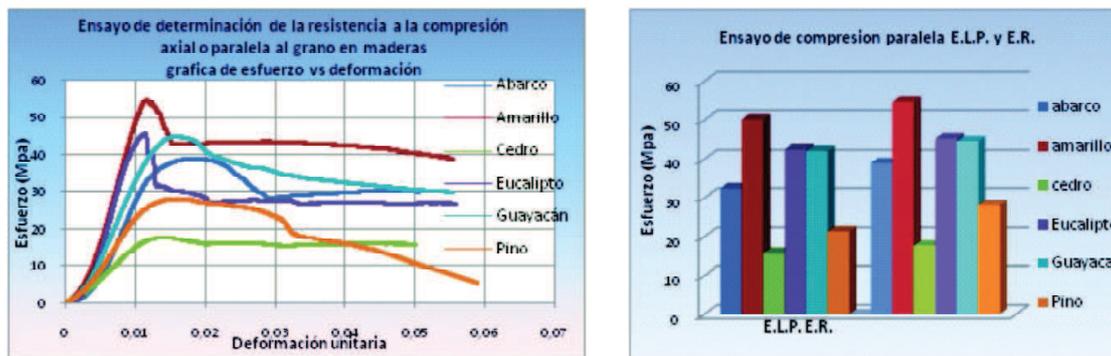


Figura 10. Ensayo de compresión paralela Gráfica esfuerzo-deformación (a), E.L.P. y E.R. (b).

Tabla 6. Tabla de valores obtenidos en el ensayo de determinación de la resistencia a la compresión axial o paralela al grano

Madera	Tipo resistencia (Mpa)	ESTADÍSTICA				Deformación unitaria
		Máximo	Mínimo	Media	Desv. estándar	
Abarco	E.L.P.	36,13	28,23	32,43	3,95	0,0115
	E.R.	40,20	35,59	38,95	2,33	0,0163
Amarillo	E.L.P.	64,89	48,34	50,27	9,05	0,0103
	E.R.	63,48	50,56	54,82	6,58	0,0116
Cedro	E.L.P.	18,82	14,81	15,76	2,09	0,0106
	E.R.	20,54	17,56	17,71	1,68	0,0137
Eucalipto	E.L.P.	48,95	38,24	42,56	4,43	0,0099
	E.R.	51,68	38,63	45,33	6,62	0,0114
Guayacán	E.L.P.	43,22	40,21	42,13	1,67	0,0132
	E.R.	45,25	41,67	44,67	1,86	0,0157
Pino	E.L.P.	24,38	18,21	21,40	2,94	0,0094
	E.R.	29,79	21,65	28,01	4,08	0,0160

E.L.P. (Esfuerzo en el límite proporcional); E.R. (Esfuerzo de rotura)

E. Resistencia a la compresión perpendicular al grano

Al realizar este ensayo se obtuvieron unos valores que generaron las gráficas contenidas en la Figura 11.

Los valores por conocer en este ensayo, según la norma y con fines de caracterización, son el esfuerzo límite proporcional (E.L.P) y el esfuerzo a una deformación del 1% del espesor (E.1%) de la probeta, y se muestran en la tabla 7:

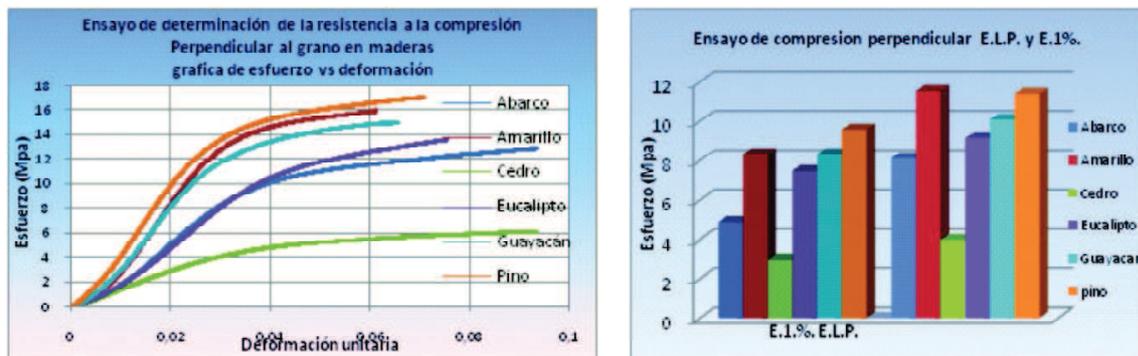


Figura 11. Grafica Esfuerzo-deformación (a), E.L.P. y esfuerzo en el 1% (b)

Tabla 7. Tabla de valores obtenidos en el ensayo de compresión perpendicular

Madera	Tipo resistencia (Mpa)	ESTADÍSTICA			
		Máximo	Mínimo	Media	Desv. estándar
Abarco	E.L.P.	8,43	8,25	8,11	0,36
	E.1	7,51	3,12	4,87	2,31
Amarillo	E.L.P.	11,65	11,42	11,54	0,11
	E.1	9,68	6,25	8,33	1,83
Cedro	E.L.P.	4,13	3,90	3,98	0,12
	E.1	3,13	2,81	2,97	0,16
Eucalipto	E.L.P.	9,61	8,64	9,14	0,48
	E.1	8,75	6,56	7,51	1,12
Guayacán	E.L.P.	10,51	9,87	10,08	0,35
	E.1	10,31	7,51	8,33	1,72
Pino	E.L.P.	12,04	10,34	11,39	0,75
	E.1	9,84	9,22	9,56	0,31

E.L.P. (Esfuerzo en el límite proporcional) E.1. (Esfuerzo en el 1% de deformación)

F. Determinación de la tracción paralela al grano

Los valores obtenidos en este ensayo permitieron generar las gráficas que se muestran en la Figura 12.

La Tabla 8 muestra los valores promedio obtenidos en el ensayo de tracción paralela para el esfuerzo límite proporcional (E.L.P.), esfuerzo de rotura (E.R.) y (M.O.E.) módulo de elasticidad obtenido por método directo (con el uso del extensómetro).

G. Determinación de la tracción perpendicular al grano

En este ensayo se obtuvieron valores que se muestran en la Figura 13 y que reflejan el comportamiento de las especies de madera sometidas a prueba.

La Tabla 9 muestra los valores obtenidos en el laboratorio al realizar el ensayo de resistencia ala tracción perpendicular en las especies en estudio.

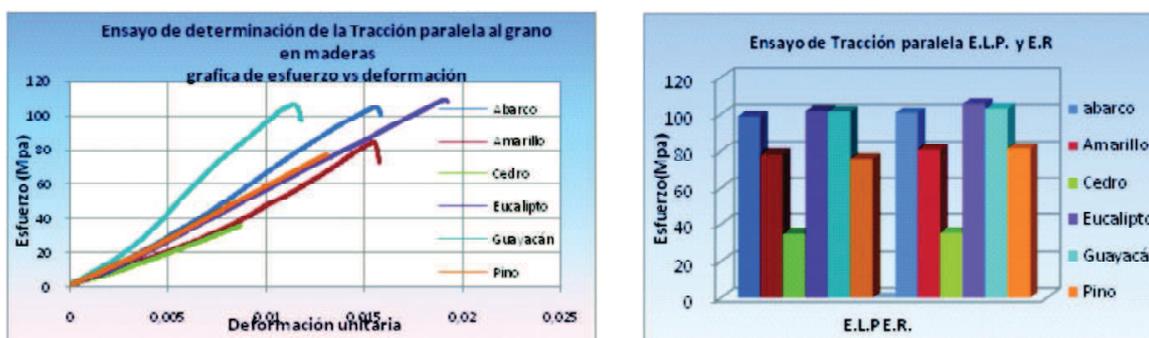
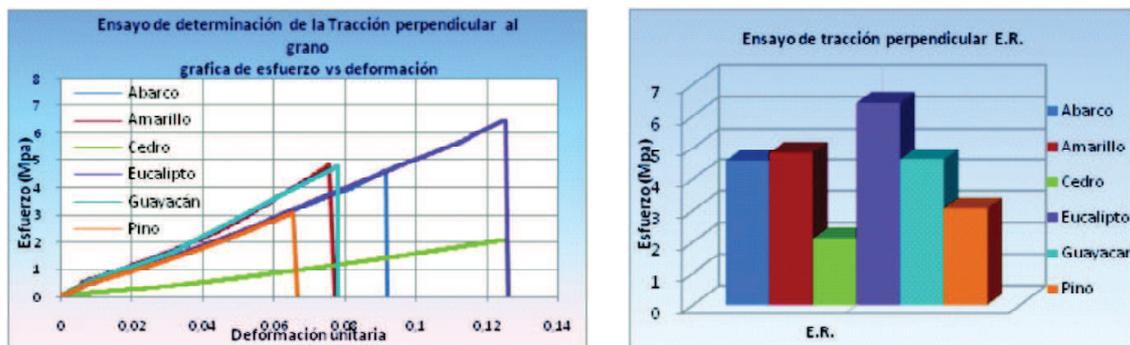


Figura 12. Gráfica tracción paralela curvas esfuerzo-deformación (a), E.L.P y E.R (b)

Tabla 8.Tabla de valores del ensayo de determinación de la tracción paralela al grano

Madera	Tipo resistencia (Mpa)	ESTADÍSTICA				Deformación unitaria
		Máximo	Mínimo	Media	Desv. estándar	
Abarco	E.L.P.	101,44	96,44	98,84	2,51	0,0144
	E.R.	105,10	95,71	100,77	4,85	0,0147
	MO.E.	16123,85	14125,24	14606,96	789,62	
Amarillo	E.L.P.	80,56	75,98	78,43	2,30	0,0142
	E.R.	86,75	68,72	80,57	8,38	0,0148
	MO.E.	21911,16	11185,34	17290,85	50,48	
Cedro	E.L.P.	37,34	32,78	34,85	2,31	0,0083
	E.R.	47,53	26,48	35,34	10,91	0,0086
	MO.E.	7306,12	5407,84	6611,98	1046,87	
Eucalipto	E.L.P.	105,21	95,82	101,67	5,11	0,0169
	E.R.	106,02	104,91	105,51	0,57	0,0183
	MO.E.	16210,03	12256,16	14262,70	1977,59	
Guayacán	E.L.P.	103,24	98,24	101,49	2,82	0,0103
	E.R.	109,77	92,21	103,10	9,51	0,0106
	MO.E.	15103,93	12411,21	14193,43	1543,57	
Pino	E.L.P.	76,46	75,84	76,03	0,37	0,0129
	E.R.	88,87	76,97	81,31	6,57	0,0130
	MO.E.	18684,11	14677,09	16274,03	2123,58	

**Figura 13.** Gráfica tracción perpendicular esfuerzo-deformación (a), esfuerzo de rotura (b)**Tabla 9.**Tabla de valores del ensayo de determinación de la tracción perpendicular al grano

Madera	Tipo resistencia (Mpa)	ESTADÍSTICA			
		Máximo	Mínimo	Media	Desv. estándar
Abarco	E.R.	5,33	3,91	4,57	0,72
Amarillo	E.R.	5,73	3,82	4,84	0,76
Cedro	E.R.	2,35	1,98	2,11	0,21
Eucalipto	E.R.	6,41	6,33	6,41	0,08
Guayacán	E.R.	5,24	4,24	4,62	0,51
Pino	E.R.	3,19	2,87	3,06	0,06

H. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad se obtuvo por dos métodos: directo e indirecto; el primero se utilizó en el ensayo de determinación de resistencia a la tracción paralela y con la ayuda de un extensómetro calibrado; esto brindó un alto grado de precisión. El valor del módulo de elasticidad, obtenido indirectamente mediante

fórmula en el ensayo de resistencia a flexión, brinda un valor que no refleja proximidad a las condiciones reales de la madera estudiada.

Los valores promedio del módulo de elasticidad en las seis especies de madera, obtenidos por el método directo e indirecto, se muestran en la Figura 14 y se especifican en la Tabla 10.



Figura 14. Módulos de elasticidad obtenidos por método directo e indirecto

Tabla 10. Valores de módulos de elasticidad obtenidos por método directo e indirecto

Tipo de madera	Método directo MOE(Mpa)	Método indirecto MOE(Mpa)
Abarco	14607	8478
Amarillo	17291	10929
Cedro	6612	4510
Eucalipto	14263	10736
Guayacán	14193	8215
Pino	16274	3691

I. Parámetros de agrupación

En el reglamento NSR-10, el principal parámetro de agrupación es el módulo de elasticidad (MOE), teniendo en cuenta también los esfuerzos obtenidos para las especies estudiadas y usadas en nuestro país [13].

Los grupos en los que se seleccionan las especies son: ES1, ES2, ES3, ES4, ES5, ES6.

Según el apéndice G-B del reglamento NSR-10 (Parámetros de estructuración), las especies de madera pueden clasificarse como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Clasificación de las maderas según su módulo de elasticidad promedio

Tipo de madera	Grupo de madera ES	Módulo de elasticidad (Mpa)
Abarco	ES4	13200
Amarillo	ES4	14000
Cedro	ES6	9000
Eucalipto	ES5	13800
Guayacán	ES4	15000
Pino	ES6	11000

Fuente: NSR-10

Para realizar la comparación entre los valores promedio logrados y los valores referenciados en la NSR-10 es necesario someter los datos de los ensayos a una metodología de obtención de los esfuerzos admisibles, contenida en el anexo G-A de la norma. Esta metodología realiza una reducción de los valores obtenidos con unos factores relevantes en el diseño de elementos estructurales de madera. Entre estos factores tenemos:

Factor de Calidad (FC): obtenido del estudio de PADT-REFORT [14], 1984, comparación de ensayos de probetas y elementos a dimensión real.

Factor Altura (Cd): obtenido de considerar elementos de hasta 300 mm de altura.

Factor de Seguridad (FS): se consideró un factor de seguridad adecuado con la complejidad de la madera.

Factor de Duración de la Carga (FDC): que corresponde a un valor de 1.6. Se consideró una reducción de resistencia del 0.625 para 10 años, con respecto al ensayo de 5 minutos.

Las características de los seis tipos de maderas estudiadas según la NSR-10 se encuentran contenidas en la Tabla 12.

Tabla 12. Esfuerzos admisibles de los cuadros de clasificación de maderas de la NSR-10

Tipo de Madera	Módulo de elasticidad (Mpa)	Flexión (Mpa)	Compresión paralela (Mpa)	Compresión perpendicular (Mpa)	Tensión (Mpa)
Abarco	13200	17,1	14,9	3,7	12,8
Amarillo	14000	20,2	17,9	3,5	15,2
Cedro	9000	11,6	9,2	1,38	9,0
Eucalipto	13800	17,7	12,9	2,7	13,3
Guayacán	15000	21,7	18,4	3,5	16,3
Pino	11000	13,2	11,9	2,5	9,9

J. Valores obtenidos con la metodología de reducción contenida en el reglamento NSR-10

Los valores promedio obtenidos en los ensayos fueron sometidos a la metodología de reducción del anexo

G-A del reglamento. Los esfuerzos admisibles obtenidos bajo esta metodología se presentan en la Tabla 13 y son relevantes en el proceso de diseño estructural.

Tabla 13. Esfuerzos admisibles obtenidos en las seis maderas más usadas en Boyacá

Tipo de Madera	Módulo de elasticidad (Mpa)	Flexión (Mpa)	Compresión paralela (Mpa)	Compresión perpendicular (Mpa)	Tensión (Mpa)
Abarco	14607	13,5	10,7	2,7	12,5
Amarillo	17291	14,9	15,1	3,9	10,0
Cedro	6612	5,0	4,9	1,3	4,4
Eucalipto	14263	13,0	12,5	3,1	13,1
Guayacán	14193	12,7	12,3	3,4	12,8
Pino	16274	6,6	7,7	3,8	10,1

IV. COMPARACIÓN DE LA NORMA NSR-98 Y EL REGLAMENTO NSR-10

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, del 2010, usa como variable principal de clasificación y diseño el módulo de elasticidad (MOE), a diferencia de la norma anterior, NSR-98, que utilizaba

como principal referencia de clasificación la densidad básica (DB).

La Tabla 15 nos muestra la comparación de los parámetros presentados por las norma NSR-10 y NSR-98, que sirven como principales herramientas de diseño por el método de los esfuerzos admisibles estipulado en las dos normas.

Tabla 15. Comparación de parámetros mostrados en la NSR-10 y NSR-98 para la utilización del método de diseño de los esfuerzos admisibles

Variable	NSR-10	NSR-98
Grupo de clasificación	ES1, ES2, ES3, ES4, ES5, ES6	A, B, C
Parámetro clasificación de los grupos	Módulo de elasticidad	Densidad básica
Tipos de esfuerzo admisibles	Flexión (Fb) Tensión (Ft) Compresión Paralela (Fc) Compresión perpendicular (Fp) Cortante (Fv)	Flexión (Fb) Tensión (Ft) Compresión Paralela (Fc) Compresión perpendicular (Fp) Cortante (Fv)
Módulo de elasticidad	E Promedio E0.5 E 5° Percentil E0.05 E Mínimo	E Mínimo E Promedio
Factores de modificación (Coeficientes) de los esfuerzos admisibles	Duración de la carga (CD) Contenido de humedad (Cm) Temperatura (Ct) Estabilidad lateral de vigas (CL) Forma (CF) Uso en cara ancha (Cfu) Por incisiones (Cin) Por acción de conjunto (Cr) Estabilidad de columnas (Cp) Rigidez al pandeo (CT) Área de soporte (Cb) Por desviación al grano	Duración de la carga (Cd) Forma (Cf) Contenido de humedad (Cm) Redistribución de cargas (acción conjunta)(Cr) Esbeltez (CS) Por desviación al grano

V. CONCLUSIONES

Las características estudiadas para las seis especies mostraron que las maderas son óptimas para el uso en estructuras sismorresistentes.

Las maderas disponibles en los aserraderos cumplen con las condiciones de resistencia y seguridad necesarias para proyectos ocupacionales, sin embargo, es necesario evaluar las características básicas de la madera para prevenir fallas por defectos presentes.

Dependiendo del grado de complejidad del proyecto es recomendable realizar ensayos en la madera que se va a utilizar, para obtener valores de las propiedades reales de la especie elegida.

La madera que mostró mejores características de resistencia mecánica frente a los ensayos fue el amarillo, seguida por el abarco, el guayacán y el eucalipto.

Las especies de cedro y pino mostraron los menores valores de resistencia frente a los ensayos realizados.

La mayor resistencia a la flexión la presentó el amarillo, seguido por el abarco y el eucalipto; el guayacán también muestra un buen desempeño frente a este tipo de ensayo.

Especies como el guayacán y el pino presentaron en el ensayo a flexión tendencias a la rotura súbita por fragilidad en el material.

En el ensayo de compresión paralela la especie que presentó mejor comportamiento fue el amarillo, seguido por el eucalipto y, muy cerca, el guayacán; la menor resistencia la presentó el cedro, seguido por el pino.

El ensayo de compresión perpendicular mostró que el pino presenta el mayor valor de resistencia, seguido por el amarillo y el guayacán; la menor resistencia la mostró el cedro.

La especie de madera con mayor resistencia al ensayo de tracción paralela fue el eucalipto, seguido por el guayacán y el abarco.

En el ensayo de tracción perpendicular el eucalipto tuvo el mejor comportamiento; el amarillo, el guayacán y el abarco presentaron comportamiento similar entre ellos.

Los módulos de elasticidad obtenidos por método directo e indirecto mostraron valores muy diferentes, y puede decirse que el método directo, gracias a la precisión del extensómetro calibrado, generó valores más cercanos a los reales en cada especie.

Los módulos de elasticidad obtenidos en el cedro y el guayacán mostraron valores más bajos que los estipulados en la NSR-2010.

REFERENCIAS

- [1] N. A. Ulloa Saavedra y W. A. Wiest Suárez. «Evaluación de propiedades de resistencia de maderas más usadas en Boyacá». Trabajo de grado Ingeniero Civil. Tunja. Universidad Pedagógica y Tecnología de Colombia. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil, 2009. 49p.
- [2] Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). *75 especies de maderas estudiadas*.
- [3] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *Requisitos de las probetas pequeñas para los ensayos físicos y mecánicos de la madera*. Bogotá: ICONTEC, 2007. 9p. (NTC 301).
- [4] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *Madera. Acondicionamiento para los ensayos físicos y mecánicos*. Bogotá: ICONTEC, 2007. 2p. (NTC 790).
- [5] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *Madera. Determinación del*

- peso específico aparente*. Bogotá: ICONTEC, 1974. 5p. (NTC 290 Primera actualización).
- [6] Corporación Chilena de la Madera. *Manual de construcción de cabañas en madera*. Santiago de Chile, Chile 2007.
- [7] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *Determinación del contenido de humedad para ensayos físicos y mecánicos*. Bogotá: ICONTEC, 2006. 6p. (NTC 206).
- [8] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *Determinación de la resistencia a la flexión*. Bogotá: ICONTEC, 1973. 7p. (NTC 663).
- [9] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *Maderas. Determinación de la resistencia a la compresión axial o paralela al grano*. Bogotá: ICONTEC, 1974. 5p. (NTC 784).
- [10] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *Maderas. Determinación de la resistencia a la compresión perpendicular al grano*. Bogotá: ICONTEC, 1974. 5p. (NTC 785).
- [11] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *Determinación de la tracción paralela al grano*. Bogotá: ICONTEC, 1975. 8p. (NTC 944).
- [12] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *Determinación de la tracción perpendicular al grano*. Bogotá: ICONTEC, 1975. 7p. (NTC 961).
- [13] Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Título G estructuras de madera y estructuras de guadua. Bogotá, Colombia, 2010.
- [14] PADT-REFORT. *Descripción General y Anatómica de 105 especies del grupo andino*. Lima, Perú: Junta del Acuerdo de Cartagena, 1984.