

EL ANÁLISIS DE LOS CICLOS DE CARGA EN LOS ENSAYOS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES DE RIGIDEZ Y RESISTENCIA DE LA MADERA

¹Morales, E. A. M. / ²Rocco Lahr, F. A.

¹ Universidade de São Paulo - Área Interunidades Ciência e Engenharia de Materiais - Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro. CEP: 13566 - 590, São Carlos, São Paulo, Brasil.

² Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Engenharia de Estruturas - Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro. CEP: 13566 - 590, São Carlos, São Paulo, Brasil.

ANALYSING LOADING CYCLES IN TEST TO DETERMINE WOOD STIFFNESS AND STRENGTH

ABSTRACT

The NBR 7190/1997 of Brazilian Technical Standard Association (ABNT) adopts three *loading cycles* for *test* to determine wood *stiffness* and *strength*. Based on recommendations of ABNT methods and on the statistical analysis of *modulus of elasticity* (E) values obtained in compression, tension and bending *tests* carried out with Cambará Rosa (*Erismia sp*) and Eucalipto Grandis (*Eucalyptus grandis*) species, we verify that the second and third cycles furnish statistically equivalent E values. This analysis suggests that the third *loading cycle* is not necessary.

KEY WORDS: wood, modulus of elasticity, tests, loading cycles.

RESUMEN

El texto normativo NBR 7190/1997 de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT), adopta tres *ciclos de carga* en los *ensayos* para la determinación de las propiedades de rigidez y resistencia de la *madera*. A partir de las recomendaciones de tal documento y del análisis estadístico de los valores de los *módulos de elasticidad* (E) obtenidos en los *ensayos* de compresión, tracción y flexión realizados con probetas de Cambará Rosa (*Erismia sp*) y Eucalipto Grandis (*Eucalyptus grandis*), se observa que el segundo y tercer *ciclo de carga* proporcionan valores de E estadísticamente equivalentes. El análisis sugiere que el tercer ciclo de carga es innecesario.

PALABRAS CLAVES: madera, módulo de elasticidad, ensayos, ciclos de carga.

INTRODUCCIÓN

El estudio de las maderas y de su caracterización mecánica es de fundamental importancia para que se pueda alcanzar mejor utilización de ese material, al lado de otros materiales cuyas propiedades son muy conocidas, cualesquiera sean los segmentos industriales comprometidos.

Muchos estudios han sido conducidos con el objetivo de caracterizar a la madera de diferentes especies, en varios países, pero el tema está todavía muy lejos de agotarse. En particular en Brasil, a partir de la adopción en el texto revisto de NBR 7190/1997, algunos de los ensayos para la caracterización físico-mecánica como los de compresión paralela al grano, compresión perpendicular al grano, tracción paralela al grano y flexión estática, pasaron a ser realizados con dos ciclos de cargas previas, y el ciclo final a partir del cual es hecha la determinación de los valores de la resistencia y del correspondiente módulo de elasticidad.

Analizando los referidos ciclos, surgen diversas preguntas, algunas de las cuales son discutidas aquí.

Para los ensayos, ¿serían realmente imprescindibles tres ciclos de carga?

La eventual suspensión del tercer ciclo de carga, ¿llevaría al comprometimiento de la representatividad de los resultados obtenidos en los ensayos?

Para situar mejor el problema son presentadas, al lado de las recomendaciones de ensayo contenidas en el documento normativo brasileño, las indicaciones de los métodos de ensayo internacionales más representativos. Son citados los métodos propuestos por la AFNOR (Association Française de Normalization), por la ASTM (American Society for Testing and Materials), por la COPANT (Comisión Panamericana de Normalización), por la ISO (International Organization for Standardization), además de NBR 6230, antiguo MB – 26 (Brasil).

Por lo que se presenta en la Tabla 1, a continuación, es posible observar que el método ISO es el único –entre los examinados– que recomienda la realización de un ciclo más de carga en los ensayos para la determinación de las propiedades de resistencia y rigidez de la madera.

En la bibliografía consultada no se encontraron artículos que presenten justificativos para la adopción de

Tabla 1: Principales requerimientos de los ensayos de compresión paralela y perpendicular al grano, tracción paralela al grano y flexión estática, de acuerdo con las normas ISO, ASTM, COPANT, AFNOR, NBR 6230 y NBR 7190

Ensayo	Norma	Dimensiones			N° de Ciclos de Carga
		a (cm)	h (cm)	l (cm)	
Compresión Paralela al Grano	ISO [1]	2,0	2,0	3,0 ó 6,0	1
	ASTM [2]	5,0	5,0	20,0	1
	COPANT [3]	5,0	5,0	20,0	1
	AFNOR [4]	2,0	2,0	6,0	1
	NBR 6230 [5]	2,0	2,0	3,0	1
	NBR 7190 [6]	5,0	5,0	15,0	3
Flexión Estática	ISO [7]	2,0	2,0	30,0 ó 38,0	3
	ASTM [2]	5,0	5,0	76,0	1
	COPANT [8]	5,0	5,0	15,h	1
	AFNOR [9]	2,0	2,0	34,0	1
	NBR 6230 [5]	2,0	2,0	30,0	1
	NBR 7190 [6]	5,0	5,0	115,0	3
Compresión Perpendicular al Grano	ISO [10]	2,0	2,0	3,0 ó 6,0	1
	ASTM [2]	5,0	5,0	15,0	1
	COPANT [11]	5,0	5,0	15,0	1
	NBR 7190 [6]	5,0	5,0	10,0	3
Tracción Paralela al Grano	ISO [12]	0,5 a 1,0	1,0 a 2,0	5,0 a 10,0	1
	ASTM [2]	2,5	2,5	45,0	1
	COPANT [13]	2,5	2,5	45,0	1
	NBR 7190 [6]	2,0	5,0	>35,0	3

Tabla 2: Principales recomendaciones en los ensayos de la NBR 7190

Ensayo	Velocidad de carga (MPa/minuto)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Resistencia (MPa)
Compresión Paralela al Grano	10	$E_{CO} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}}$	$f_{CO} = \frac{F_{CO,max}}{A}$
Flexión Estática	10	$E_w = \frac{(F_{50\%} - F_{10\%})l^3}{(V_{50\%} - V_{10\%})4bh^3}$	$f_M = \frac{Pl}{\frac{4}{bh^2} \cdot \frac{6}{6}}$
Compresión Perpendicular al Grano	10	$E_{CO} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}}$	(*) Figura 1
Tracción Paralela al Grano	10	$E_{CO} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}}$	$f_{tO} = \frac{F_{tO,max}}{A}$

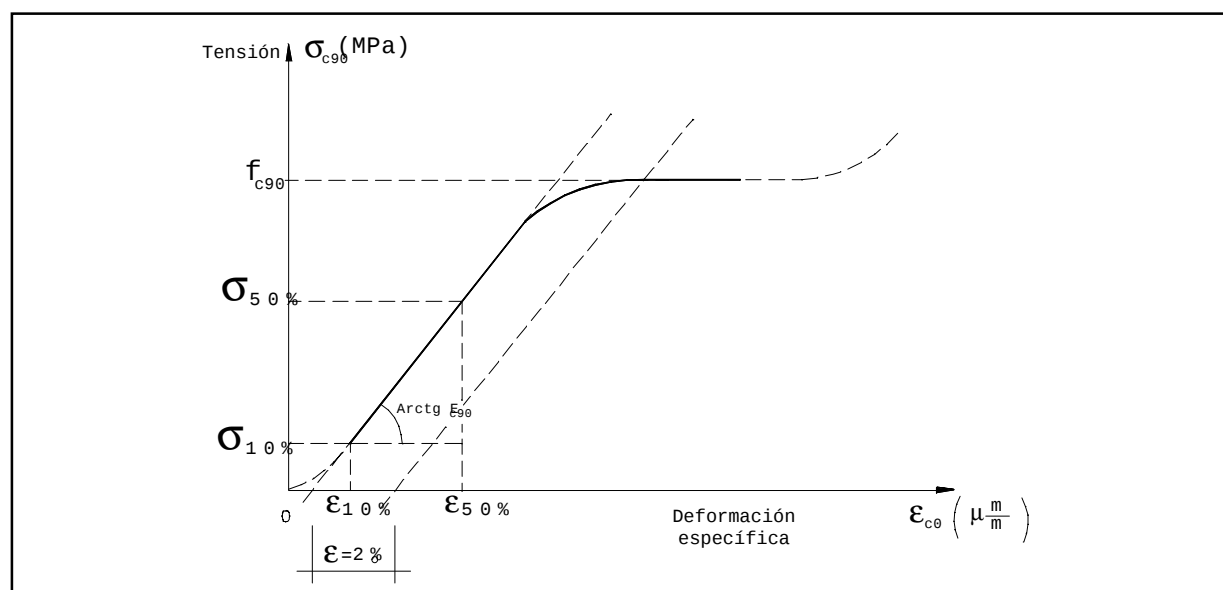
ciclos de carga, ni tampoco que se posicionen contrariamente a tal procedimiento. En otras palabras, no están disponibles otras informaciones bibliográficas que posibiliten la comparación con los resultados obtenidos en este trabajo.

De esta forma, se necesitó dar especial atención a la parte experimental de la investigación, desde la preparación de las probetas hasta la ejecución propiamente dicha de los ensayos. Con esto se buscó la generación de datos seguros y significativos para fundamentar futuras providencias de carácter normativo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos fueron realizados de acuerdo con las recomendaciones de la NBR 7190 resumidos en sus aspectos más notables en la Tabla 2. Los respectivos símbolos están presentados en la sección posterior.

En la Figura 1, a título de ilustración, se presenta el diagrama para la obtención de resistencia convencional de la madera en la compresión perpendicular al grano. La Figura 2 muestra el diagrama de los ciclos de carga aplicados en probetas de acuerdo con la NBR 7190. En el eje

**FIGURA 1:** Diagrama de esfuerzos-deformaciones para la determinación de resistencia de la madera en la dirección perpendicular al grano.

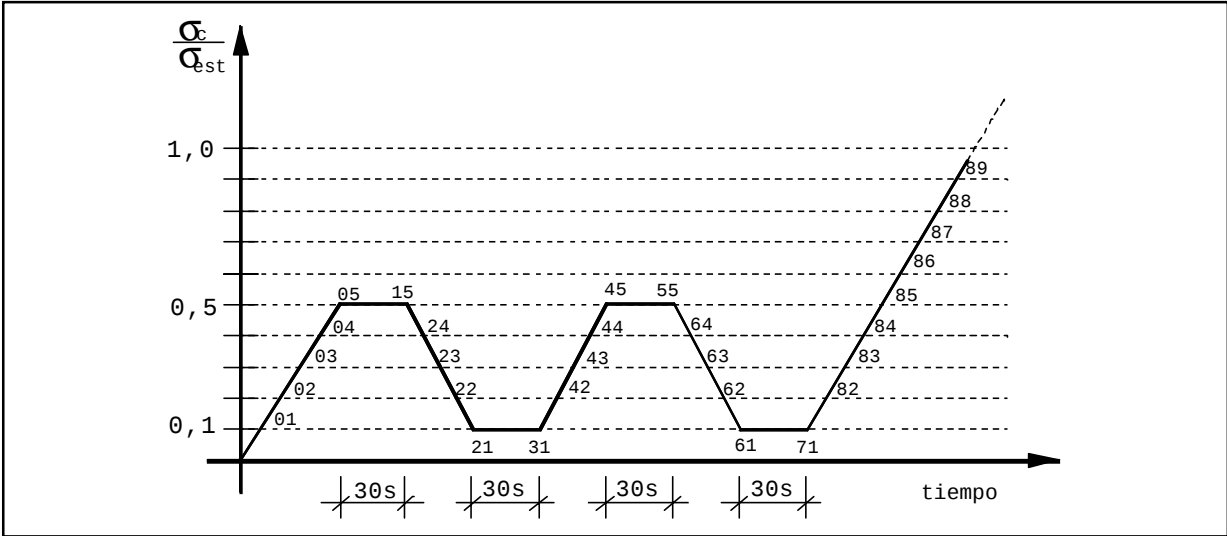


FIGURA 2: Diagrama de carga para determinar la rigidez de la madera a la compresión paralela al grano, compresión perpendicular al grano, tracción paralela al grano y flexión estática

de las coordenadas están representados los valores de la razón $\frac{\sigma_c}{\sigma_{est}}$ entre la tensión aplicada en la probeta y el valor de la resistencia estimada en el ensayo preliminar. En el eje de las abscisas está representado el tiempo, en segundos.

En el experimento fueron utilizadas dos especies de las dicotiledóneas: Cambará Rosa (*Erisma sp*), con densidad media 0,6 g/cm³, y el Eucalipto Grandis (*Eucalyptus grandis*) con densidad media 0,7 g/cm³, ambas en humedad de 12%. Fueron ensayadas doce probetas por especie, como indica el anexo B de la NBR 7190.

El Cambará Rosa tiene parénquima visible a simple vista, en franjas cortas o largas tangenciando o envolviendo los poros visibles a simple vista, en la mayoría de los medios, solitarios y múltiples con obstrucción por tñides, rayos visibles a través de lente en la extremidad y en la fase tangencial, duramen de coloración variando de beige a rosado. Su presencia se observa en la Floresta Tropical Amazónica, dispersa principalmente en el Estado de Pará y en el norte del Estado de Mato Grosso. El origen del material estudiado es del norte del Estado de Mato Grosso.

El Eucalipto Grandis tiene parénquima visible a través de lente, vasicéntrico, escaso y ocasionalmente disperso, poros visibles a simple vista, numerosos, medios, raramente con obstrucciones, rayos visibles a través de lente en la extremidad y en la fase tangencial, duramen de coloración fuertemente rosada. Su presencia se observa en las áreas de reforestación en las regiones sur y sureste de Brasil. El lugar de origen del material estudiado es Telémaco Borba, Paraná [14].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de los módulos de elasticidad para las doce probetas de Cambará Rosa y Eucalipto Grandis en los tres ciclos de carga están mostrados en las Tablas 3, 4, 5 y 6.

Las anotaciones E1, E2 y E3 representan, respectivamente, los valores de los módulos de elasticidad obtenidos en el primero, segundo y tercer ciclos de carga.

En el análisis de los resultados, para eliminar la variabilidad inherente al material, los valores de los módulos de elasticidad en el primero, segundo y tercer ciclos de carga fueron divididos por el valor del módulo de elasticidad del primer ciclo.

Se utilizó el procedimiento “comparación de pares”, a través del cual fue investigada la equivalencia estadística entre los valores de los módulos de elasticidad obtenidos en el primero y segundo ciclos, así como los obtenidos en el segundo y tercer ciclos de carga.

En la comparación de pares, a partir de los conjuntos de “n” resultados, es generado un tercero, correspondiente a las diferencias entre los valores de los conjuntos originales.

Si el cero pertenece al intervalo de confianza de la media de las diferencias (m), los valores analizados pueden ser considerados estadísticamente equivalentes.

En el presente estudio, como es usual en análisis de esta naturaleza, fue considerado el nivel de confiabilidad de 95%.

Como fueron realizados doce ensayos por especie, se presentó la situación de pequeñas muestras y, por consiguiente, en la determinación del intervalo de la media de las diferencias se utilizaron los parámetros correspon-

Tabla 3: Valores de módulo de elasticidad en ensayos de tracción paralela al grano

Probetas	Cambará Rosa			Eucalipto Grandis		
	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)
1	12002	11656	11689	16114	17614	17030
2	11887	11398	11079	14799	15500	15582
3	13995	13122	13271	18640	16423	16694
4	12652	12241	12525	20737	19631	19121
5	10620	10034	10584	11188	11568	11835
6	16193	15349	15569	21016	24196	23727
7	11545	11257	11056	14373	14835	14568
8	10677	10289	10616	19243	20617	20223
9	13544	13400	13253	12442	13656	13546
10	11428	11277	11045	21452	20875	20988
11	15759	15370	15416	20006	20644	24410
12	14142	14299	14001	18593	17756	17836

Tabla 4: Valores de módulo de elasticidad en ensayos de compresión paralela al grano

Probetas	Cambará Rosa			Eucalipto Grandis		
	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)
1	9721	9496	9537	19115	18708	18414
2	11021	10613	10664	15218	16186	16113
3	13544	13412	13232	26805	23588	22976
4	12378	11959	11725	21752	24897	24897
5	11995	11297	11511	22986	26867	26523
6	15762	14683	14524	22789	24407	24121
7	10820	11042	10722	13338	14361	14667
8	10720	9886	10156	19984	19793	19421
9	17159	16684	16621	19215	19125	18439
10	15691	15119	15119	11812	11812	12963
11	14890	14586	14822	26181	25531	25373
12	13981	13726	13859	21291	23335	23075

Tabla 5: Valores de módulo de elasticidad en ensayos de compresión perpendicular al grano

Probetas	Cambará Rosa			Eucalipto Grandis		
	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)
1	721	686	684	970	1071	941
2	962	896	909	687	796	782
3	977	885	862	593	727	673
4	1020	945	963	589	709	667
5	831	734	722	584	735	651
6	1237	1187	1062	327	453	457
7	906	800	810	938	1072	1047
8	889	776	790	456	543	524
9	1150	1006	968	220	251	253
10	1016	922	941	284	330	323
11	1237	1087	1068	297	339	378
12	984	886	908	308	366	360

Tabla 6: Valores de módulo de elasticidad en ensayos de flexión estática

Probetas	Cambará Rosa			Eucalipto Grandis		
	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)
1	10096	9857	9556	14931	14811	14731
2	12337	13406	13192	13817	13851	13646
3	12859	12970	12751	16702	17566	17480
4	7772	8320	8427	29783	30441	30274
5	14278	14391	14323	20366	19366	19889
6	11199	11837	11915	16872	17054	17107
7	-	-	-	12985	13299	13235
8	12170	12478	12145	16185	16209	17628
9	6384	6278	6227	14042	14202	14202
10	11949	12985	13127	11232	11879	12007
11	12173	12545	12399	18893	19055	19187
12	-	-	-	14573	14787	14846

Tabla 7: Intervalos de confianza 95% de la media de las diferencias (μ)

Ensayos	Intervalos de confianza de μ para Cambará Rosa		Intervalos de confianza de μ para Eucalipto Grandis	
	Ciclos 1 y 2	Ciclos 2 y 3	Ciclos 1 y 2	Ciclos 2 y 3
Compresión Paralela al Grano	$0,016 \leq \mu \leq 0,050$	$-0,010 \leq \mu \leq 0,010$	$-0,088 \leq \mu \leq 0,015$	$-0,020 \leq \mu \leq 0,024$
Compresión Perpendicular al Grano	$0,075 \leq \mu \leq 0,113$	$-0,015 \leq \mu \leq 0,029$	$-0,239 \leq \mu \leq -0,145$	$-0,012 \leq \mu \leq 0,080$
Tracción Paralela al Grano	$0,018 \leq \mu \leq 0,044$	$-0,018 \leq \mu \leq 0,012$	$-0,074 \leq \mu \leq 0,022$	$-0,046 \leq \mu \leq 0,028$
Flexión Estática	$-0,062 \leq \mu \leq 0,004$	$-0,003 \leq \mu \leq 0,019$	$-0,029 \leq \mu \leq 0,005$	$-0,026 \leq \mu \leq 0,008$

dientes a la distribución “t” de Student. La síntesis de los resultados de este análisis está mostrada en la Tabla 7.

No todos los intervalos de confianza 95% de la media de las diferencias entre los valores de E obtenidos en el primero y en el segundo ciclos de carga contienen el cero, tanto para el Cambará Rosa como para el Eucalipto Grandis. Esto evidencia la no equivalencia entre los mencionados resultados, destacando la conveniencia de que sean realizados por los menos dos ciclos de carga en los ensayos para la determinación de las propiedades mecánicas consideradas.

Por otro lado, el cero pertenece a todos los intervalos de confianza 95% de la media de las diferencias entre los resultados de E obtenidos en el segundo y en el tercer ciclos de carga, tanto para el Cambará Rosa como para el Eucalipto Grandis.

Por lo tanto, queda demostrado que son suficientes dos ciclos de carga en los mencionados ensayos.

CONCLUSIÓN

El análisis de los resultados obtenidos para el método de elasticidad en los tres ciclos de carga propuestos por la NBR 7190/1997 indica que el tercer ciclo puede ser suprimido de los ensayos de compresión paralela al grano, compresión perpendicular al grano, tracción paralela al grano y flexión estática sin el comprometimiento de la representatividad de los resultados obtenidos. Actualmente se encuentra en fase final la investigación incluyendo cinco especies más de madera de amplia gama de densidades, objetivando la obtención de datos que confirmen las conclusiones presentadas en este trabajo.●

SÍMBOLOS

$e_{10\%}$ = Deformación correspondiente a 10% de la resistencia estimada

$S_{10\%}$ = Tensión correspondiente a 10% de la resistencia estimada (MPa)

$e_{50\%}$ = Deformación correspondiente a 50% de la resistencia estimada

$S_{50\%}$ = Tensión correspondiente a 50% de la resistencia estimada (MPa)

A = Área de la sección transversal (m^2)

$F_{10\%}$ = Tensión correspondiente a 10% de la carga (MPa)

$F_{50\%}$ = Tensión correspondiente a 50% de la carga (MPa)

$F_{co, max}$ = Máxima carga de compresión aplicada en la probeta (N)

$F_{to, max}$ = Máxima carga de tracción aplicada en la probeta (N)

P = Fuerza aplicada (N)

$V_{10\%}$ = Deflación en la carga de 10% (cm)

$V_{50\%}$ = Deflación en la carga de 50% (cm)

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) por el soporte financiero proporcionado al desenvolvimiento de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **International Organization For Standardization. ISO 3787.** *Wood – Test methods – Determination of ultimate stress in compression parallel to grain.* 1ra. Ed. Geneve, p. 1-2. 1976.
2. **American Society For Testing And Materials. ASTM D-143.** *Standard methods of testing small clear specimens of timber.* Philadelphia, p. 12-16. 1982.
3. **Comisión Panamericana De Normas Técnicas Copant R 464.** *Método de determinación de la compresión axial o paralela al grano.* Buenos Aires, p. 1-4. 1972.
4. **L'association Française De Normalisation. AFNOR B 51-007.** *Bois – Méthodes d'essais – essai de compression axiale.* París, p. 1-4. 1942.
5. **Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 7190.** *Projeto de estruturas de madeira –Anexo B.* Río de Janeiro, p. 50-58, 65-67. 1997.
6. **Associação Brasileira De Normas Técnicas. MB 26.** *Ensayos físicos e mecânicos de madeiras.* Río de Janeiro, p. 8-12. 1940.
7. **International Organization For Standardization. ISO 3349.** *Wood – Determination of modulus of elasticity in static bending.* 1ra. Ed. Geneve, p. 1-3. 1975.
8. **Comisión Panamericana De Normas Técnicas. COPANT R 555.** *Método de ensayo de flexión estática.* Buenos Aires, p. 3-9. 1973.
9. **L'association Française De Normalisation. AFNOR. B 51-009.** *Bois – Méthodes d'essais – Essai de choc ou flexion statique.* París, p. 1-4. 1942.
10. **International Organization For Standardization. ISO 3132.** *Wood – Testing in compression perpendicular to grain.* 1ra. Ed. Geneve, p. 1-2. 1975.
11. **Comisión Panamericana De Normas Técnicas. COPANT R 466.** *Método de determinación de la compresión perpendicular al grano.* Buenos Aires, p. 1-5. 1973.
12. **International Organization For Standardization. ISO 3345.** *Wood –Determination of ultimate tensile stress parallel to grain.* 1ra. ed. Geneve, p. 1-2. 1975.
13. **Comisión Panamericana De Normas Técnicas. COPANT R 742.** *Método de ensayo de tracción paralela al grano.* Buenos Aires, p. 1-10. 1973.
14. **Rachid, C.** *Identificação e descrição da madeira de 12 espécies do gênero Eucalyptus.* Primeiro relatório de atividades processo FAPESP, p. 11. Jan. 1991.