

**PROYECTO REGIONAL URUGUAY - ARGENTINA “ADAPTACIÓN AL CAMBIO
CLIMÁTICO EN CIUDADES Y ECOSISTEMAS COSTEROS VULNERABLES
DEL RÍO URUGUAY”**

**RESULTADOS DE LOS ENSAYOS
SOBRE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE
LA MADERA DE ACACIA NEGRA
(*Gleditsia tricanthos*)**

Facultad de Arquitectura y Urbanismo
FADU - UDELAR

LABORATORIO DE ENSAYOS
Dpto. Materiales y Procedimientos
Instituto de Tecnologías

Este documento ha sido elaborado en el marco del proyecto regional (Argentina-Uruguay) Adaptación al cambio climático en ciudades y ecosistemas costeros vulnerables del río Uruguay. Este Proyecto -promovido por la Secretaría de Turismo Ambiente y Deportes de Argentina (ex Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible) y el Ministerio de Ambiente de Uruguay- es financiado por una donación del Fondo de Adaptación y es implementado a través de CAF (Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe). Los componentes regionales del Proyecto son ejecutados por PNUD y los componentes nacionales son ejecutados, respectivamente, por la Secretaría de Turismo Ambiente y Deportes de Argentina y por la Corporación Nacional para el Desarrollo (CND) de Uruguay. El análisis, las observaciones, las recomendaciones de políticas que contiene este documento corresponden exclusivamente a quienes lo han preparado y no reflejan necesariamente las opiniones de las entidades implementadoras y ejecutoras del Proyecto.

F a d u Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo UDELAR	INFORME DE ENSAYO V4 20221228	INF.001.2023
		Pág. 1 de 2

EMPRESA	PROYECTO ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CIUDADES Y ECOSISTEMAS COSTEROS VULNERABLES DEL RÍO URUGUAY
DIRECCIÓN	
TELÉFONO	29162800

SOLICITANTE	Ana Fusco, Gte. Gobs. Departamentales, CND
-------------	--

SOLICITUD	SOL. 013.2022
-----------	---------------

ENSAYO	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL VAPOR DE AGUA.
NORMA	UNIT-ISO 12572:2016, Desempeño higrotérmico de los materiales y productos de construcción. Determinación de las propiedades de transmisión de vapor de agua. Método de la copa.
PRINCIPIO DE ENSAYO	La probeta se sella a la parte abierta de una copa de ensayo que contiene un desecante y, este conjunto se coloca en una cámara de ensayo con temperatura y humedad controladas. Debido a la diferencia entre las distintas presiones de vapor parciales entre la copa de ensayo y la cámara se consigue que un flujo de vapor de agua pase a través de las probetas de ensayo permeables. Se pesa el conjunto de ensayo de forma periódica con el fin de determinar el coeficiente de transmisión de vapor de agua cuando se alcanza el estado estacionario.
PROCEDENCIA DE LA MUESTRA	Elaboradas en el laboratorio a solicitud del cliente.
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	La muestra consiste en 6 probetas circulares extraídas de las vigas suministradas por el solicitante para la realización del ensayo de flexión.
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	Se identificaron las probetas con los códigos P1, P2, P3, P4, P5 e P6.
EQUIPOS Y MATERIALES	— 5 copas de ensayo resistentes a la corrosión del desecante que contienen. — Balanza digital Marca: AND Modelo: GP-30K Precisión: 0,1 g — Calibre Marca: MITUTOYO, Modelo: 505-633-50 Precisión: 0,05 mm. — Cámara con temperatura en el rango (23,0 ± 1,0) °C y humedad relativa en el rango (50 ± 5) %. — Sellante — Cloruro de Calcio en escamas.
PROCEDIMIENTO	De acuerdo con lo establecido en la norma de referencia. La configuración de ensayo se asimila a la Serie A de la Tabla 2 de la norma UNIT-ISO 12572.

F a d u Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo UDELAR LABORATORIO DE ENSAYOS Dpto. Materiales y Procedimientos INSTITUTO DE TECNOLOGÍAS	INFORME DE ENSAYO V4 20221228	INF.001.2023
		Pág. 2 de 2

RESULTADOS - Propiedades de transmisión de vapor de agua y espesor de las probetas						
Propiedades	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	Promedio
Tasa transmisión vapor de agua WVTR (g/(m²·24h))	0,92	1,34	1,74	1,14	1,28	1,28
Tasa transmisión vapor de agua (g/(h·m²))	0,0383	0,0558	0,0725	0,0475	0,0533	0,0535
Permeancia, W (g/(Pa·s·m²))	7,58·10 ⁻⁹	11,04·10 ⁻⁹	14,33·10 ⁻⁹	9,39·10 ⁻⁹	10,55·10 ⁻⁹	10,58·10 ⁻⁹
Resistencia al vapor de agua, Z ((Pa·s·m²)/g)	1319·10 ⁵	906·10 ⁵	698·10 ⁵	1065·10 ⁵	948·10 ⁵	945·10 ⁵
Espesor (m)	0,0200	0,0230	0,0210	0,0200	0,0210	0,0210
Permeabilidad al vapor de agua, δ (g/(Pa·s·m))	1,52·10 ⁻¹⁰	2,54·10 ⁻¹⁰	3,01·10 ⁻¹⁰	1,88·10 ⁻¹⁰	2,22·10 ⁻¹⁰	2,22·10 ⁻¹⁰

Se deja constancia que este informe refiere exclusivamente a las muestras identificadas en el mismo.

No se debe reproducir este informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita del laboratorio.

Se expide el presente informe en Montevideo, a los 19 días del mes de abril de 2023.

Arq. Claudia Chocca

Laboratorio del IC

INSTITUTO DE TECNOLOGÍAS - DMP - OMO

Laboratorio de Ensayos

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO Y URBANISMO

**DENSIDAD Y CONTENIDO DE HUMEDAD
EN PEQUEÑAS PROBETAS LIBRES DE DEFECTOS
DE MADERA ACACIA NEGRA (*Gleditsia tricanthos*)**

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
INTRODUCCIÓN	3
MATERIALES	3
MASA Y DENSIDAD APARENTE	4
DENSIDAD APARENTE ANHIDRA	5
CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE SECA	6
TABLAS DE DENSIDAD Y CONTENIDO DE HUMEDAD	7
RESULTADOS Y CONCLUSIONES	10

Determinación de la Densidad y Contenido de humedad de la madera de Acacia negra (*Gleditsia triacanthos*)

Introducción

Con el objetivo de determinar las características físicas de la madera de Acacia negra se extrajeron muestras de las cinco vigas después que se ensayaron a flexión estática. Se presenta a continuación la metodología utilizada para determinar la densidad aparente y la densidad aparente anhidra. Se calcula además, el contenido de humedad (CH) en base seca. Se procesaron los resultados y se hallaron los valores medios y característicos de ambas propiedades.

Materiales

Para determinar la densidad y el contenido de humedad de la madera es necesario cortar pequeñas probetas libres de defectos (sin nudos). Para el ensayo de densidad de la madera se realiza el procedimiento establecido en la norma UNIT 237:2008 “*Determinación de la densidad aparente en maderas*”, y para el ensayo de contenido de humedad en base seca por el método de secado en estufa se siguen los lineamientos dados en la norma UNIT 223–1-2007 “*Contenido de humedad de la madera*” que se realiza con probetas cúbicas de 30 mm de arista.

De las vigas se cortaron secciones transversales de 50x30x200 mm, cada 30 centímetros a lo largo de 100 cm de tabla. Esas secciones se aserraron en los dos sentidos para obtener 58 probetas cúbicas de 30 mm de arista y se lijaron todas las caras (Foto 1).

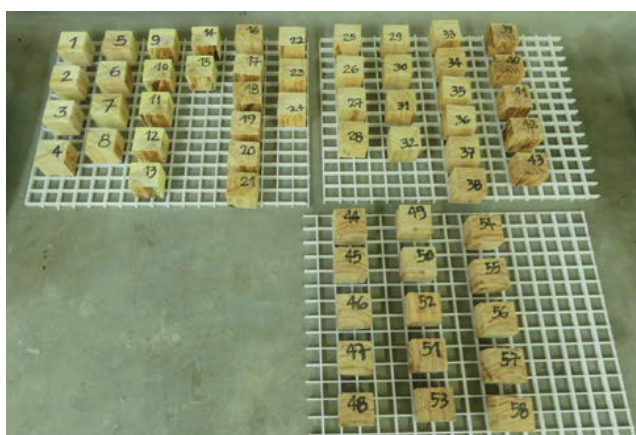


Foto 1 Probetas cúbicas de Acacia negra.

Las probetas seleccionadas responden a diferentes proporciones de madera de albura y duramen tal como ilustra la Foto 2.

Las probetas numeradas del 1 al 24 corresponden a las probetas que se cortaron de las vigas en las cuales la presencia de madera de albura era mayor que la de duramen. Las numeradas del 25 al 48 proceden de vigas con mayor presencia de duramen y duramen con médula. Las probetas identificadas con los números 49 al 58 corresponden a probetas de cortes radiales y tangenciales de madera de duramen. (Foto 3).



Foto 2. Probetas cúbicas de Acacia negra. Izq. Madera de albura. Centro. Duramen con médula. Der. Duramen

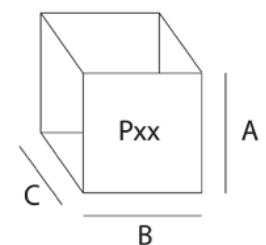


Foto 3. Izq. Probetas con más albura. Centro. Probetas de duramen y/o médula. Der. Probetas de corte radial y tangencial de duramen.

Mediciones iniciales

1. Volumen

El volumen de las probetas se obtuvo por medición directa. Se toman las 3 dimensiones desde los puntos medios de las respectivas caras opuestas (A, B y C). Luego se calcula volumen de la probeta realizando el producto de los tres valores: $V = C \times B \times A$



Para la medición se utilizó un calibre Digimatic Mitutoyo de 0,01 mm de precisión. El procedimiento se hizo de igual manera para todas las probetas en las mediciones posteriores: se posiciona el calibre en el centro de una cara y de su opuesta, se registran las tres medidas necesarias para obtener el volumen.

1.2 Masa

La masa de las probetas se determinó con una balanza de 0,001 gramos de precisión. Para el secado de las probetas se utilizó un horno eléctrico con control de temperatura, Marca Novus, Modelo N480D, capacidad 160 lt, con tres bandejas tipo rejilla de acero inoxidable.



Foto 4: Balanza de 0,001 gramos de precisión

Con la densidad aparente y la densidad anhidra de la madera, sumado a las dimensiones relevadas, se puede calcular el contenido de humedad en base seca.

2. Ensayo de Densidad

2.1 Densidad aparente

Para determinar la Densidad aparente, se deben acondicionar las probetas en una sala climatizada con atmósfera controlada con una humedad relativa de $65 \% \pm 1 \%$, y temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ de acuerdo a la norma UNIT 362.

El volumen y la masa se miden antes de ingresar las probetas a la sala climatizada. Luego, las probetas se pesan cada 4 horas. Cuando las últimas dos pesadas sucesivas tienen una diferencia menor al 0,1 % se considera que la masa es constante. En ese momento, por medición directa se registran los datos de cada cara de las probetas. Todas las mediciones se realizan sin sacar las probetas de la sala climatizada.

Los datos obtenidos se utilizan para calcular la **densidad aparente** aplicando la fórmula (1):

$$\rho_c = \frac{m_0}{v_{12}} \quad (1)$$

Siendo: ρ_c = densidad aparente expresada en gr/cm^3

m_0 = masa en gramos de la probeta en condición anhidra

v_{12} = volumen en cm^3 de la probeta con un CH próximo al 12 %

2.2 Densidad aparente anhidra

Para obtener la masa anhidra (masa final para el cálculo del contenido de humedad) se utilizó un horno eléctrico, de acuerdo al procedimiento que se describe en el punto 7.1.2 de la norma UNIT 223–1:2007 “Contenido de humedad de la madera”.



Foto. 5. Probetas en el horno.

Se trasladaron desde la sala controlada todas las probetas y se colocaron directamente en el horno del laboratorio, a una temperatura de 103 ± 2 °C. Se dejan las probetas en el horno durante 24 horas. Completado este primer secado, las probetas se trasladaron en bolsas de polietileno hasta la sala controlada y se pesaron. Después, se colocaron nuevamente en el horno durante 4 horas. Se retiraron y se pesaron.

Debido a que los valores de masa obtenidos diferían más de 0,1% de los anteriores, se volvieron a colocar las probetas en el horno por 4 horas más. Se repitió este procedimiento en lapsos de 4 horas, hasta obtener valores de masa constante de acuerdo a lo que establece la norma UNIT 223–1:2007. Por último, se registraron las dimensiones de las probetas en la sala climatizada una vez que éstas se enfriaron dentro de un deshumificador de vidrio con tapa sellada con vaselina. Con esos valores se calculó la densidad anhidra, aplicando la fórmula 2:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{v_0} \quad (2)$$

Siendo: ρ_0 = densidad aparente anhidra expresada en gr/cm^3

m_0 = masa en gramos de la probeta en condición anhidra

v_0 = volumen en cm^3 de la probeta en estado anhidro

2.3 Contenido de humedad en base seca %:

El ensayo de contenido de humedad se realizó de acuerdo al método de secado en estufa descrito en la norma UNIT 223-1:2007. Se determinó el contenido de humedad en base seca aplicando la fórmula 3:

$$CH = \frac{mi - mf}{mf} 100$$

(3)

Siendo: mi = masa de la probeta al 12% CH (gr)
 mf= masa final de la probeta (gr)
 CH= contenido de humedad en %

Para este cálculo se utilizaron los valores de masa obtenidos en el ensayo de densidad. Para la masa inicial se tomó el valor de masa de las probetas con un contenido de humedad cercano al 12% y para la masa final, se tomó el valor de masa constante de las probetas en condiciones de masa anhidra.

Tablas de registro de datos

En las tablas siguientes se presentan los datos relevados y los resultados obtenidos de la densidad y contenido de humedad.

Tablas de Densidad Apparente y Densidad Apparente Anhídrica | Contenido de humedad en base seca de probetas de Acacia negra

Tabla de densidad y contenido de humedad de las probetas 1 a 24 de ACACIA NEGRA (*Gléditsia triacanthos*)

Nº de probeta	Densidad Apparente CH de 12%										Densidad Apparente ANHIDRA							Contenido de humedad en base seca CH= (mi - mf) / mf *100 (%)
	volumen precisión:0,01 mm					volumen cm ³	masa (mi) precisión: 0,001 g	densidad g/cm ³	volumen precisión:0,01 mm				masa (mf) precisión: 0,01 g	densidad g/cm ³				
	a	b	c	vol	a				b	c	vol							
A01	29,70	30,11	30,76	27507,65	27,508	18,747	0,682	29,70	29,79	29,79	26357,09	17,021	0,646	10,1				
A02	29,62	29,37	31,45	27359,59	27,360	18,881	0,690	29,69	29,08	30,03	25927,46	17,114	0,660	10,3				
A03	29,87	30,11	30,61	27530,20	27,530	18,635	0,677	30,91	29,31	29,67	26880,19	16,927	0,630	10,1				
A04	31,33	29,34	30,28	27834,05	27,834	19,013	0,683	30,18	28,76	30,11	26134,78	17,133	0,656	11,0				
A05	31,14	29,61	30,43	28058,15	28,058	19,135	0,682	30,40	29,48	30,30	27154,62	17,215	0,634	11,2				
A06	31,42	29,58	30,05	27928,58	27,929	19,700	0,705	30,96	29,06	29,90	26900,96	17,620	0,655	11,8				
A07	31,08	29,30	29,42	26791,15	26,791	18,912	0,706	30,26	28,83	29,31	25569,92	17,025	0,666	11,1				
A08	30,10	30,19	29,02	26371,03	26,371	17,702	0,671	29,60	29,69	29,12	25591,35	15,962	0,624	10,9				
A09	29,48	30,29	29,62	26449,16	26,449	19,832	0,750	28,96	29,99	29,79	25872,92	17,899	0,692	10,8				
A10	29,95	30,15	29,32	26475,74	26,476	19,598	0,740	29,31	29,74	29,69	25880,16	17,676	0,683	10,9				
A11	29,37	30,74	29,48	26615,54	26,616	20,112	0,756	28,92	30,28	29,46	25798,05	18,128	0,703	10,9				
A12	29,56	30,69	29,33	26608,07	26,608	19,900	0,748	29,46	30,09	29,46	26114,86	17,947	0,687	10,9				
A13	29,98	29,95	29,47	26461,14	26,461	19,690	0,744	28,96	29,50	29,56	25253,70	17,764	0,703	10,8				
A14	30,03	30,75	29,97	27674,97	27,675	21,233	0,767	29,04	30,28	29,84	26239,24	19,178	0,731	10,7				
A15	29,41	30,69	29,43	26563,31	26,563	20,375	0,547	28,78	30,60	29,67	26129,42	18,394	0,704	10,8				
A16	30,02	31,25	30,00	28143,75	28,144	18,747	0,666	31,36	31,57	29,82	29522,85	16,983	0,575	10,4				
A17	31,01	30,93	29,56	28352,16	28,352	18,690	0,659	31,07	30,16	29,59	27727,94	16,911	0,610	10,5				
A18	31,08	31,06	29,45	28429,40	28,429	18,445	0,649	31,84	30,50	29,71	28851,98	16,701	0,579	10,4				
A19	30,85	31,35	29,34	28376,11	28,376	18,950	0,668	29,97	30,77	29,27	26992,12	17,164	0,636	10,4				
A20	31,11	31,47	29,36	28744,37	28,744	18,630	0,648	30,46	30,85	29,35	27579,93	16,880	0,612	10,4				
A21	31,09	30,68	29,26	27909,39	27,909	18,242	0,654	30,43	30,17	29,19	26798,55	16,569	0,618	10,1				
A22	30,48	30,19	29,75	27375,69	27,376	19,660	0,718	30,03	29,03	29,61	25813,14	17,284	0,670	13,7				
A23	30,62	30,07	30,10	27714,38	27,714	19,723	0,712	30,36	29,45	30,02	26840,94	17,406	0,648	13,3				
A24	30,71	29,87	29,70	27244,04	27,244	19,269	0,707	30,18	28,57	29,83	25720,70	17,083	0,664	12,8				
Resultados finales																		
Valor para el coeficiente K para un fractil de 5% y para 24 ensayos realizados: K=1.78							Valor medio							11,0				
							Desviación estándar							0,040				
							CV %							0,061				
							Valor característico							0,583				

Resultados

Cuadro resumen de los diferentes tipos de probetas analizadas

Densidad Aparente CH de 12% gr/cm ³			Densidad Aparente ANHIDRA gr/cm ³		Contenido de humedad en base seca en %
Albura	Valor medio	0,693	Valor medio	0,654	11,2
	Desviación estándar	0,048	Desviación estándar	0,040	1,6
	CV %	0,069	CV %	0,061	
	Valor característico	0,608	Valor característico	0,583	
Duramen y médula	Valor medio	0,695	Valor medio	0,647	11,2
	Desviación estándar	0,042	Desviación estándar	0,034	1,6
	CV %	0,061	CV %	0,052	
	Valor característico	0,620	Valor característico	0,587	
Duramen corte T y R	Valor medio	0,719	Valor medio	0,668	13,0
	Desviación estándar	0,015	Desviación estándar	0,023	3,2
	CV %	0,021	CV %	0,035	
	Valor característico	0,687	Valor característico	0,619	

Conclusiones

Comparando los resultados obtenidos, vemos que las probetas extraídas de vigas con mayor presencia de albura alcanzaron una densidad aparente media de **0,693** gr/cm³ con una desviación estándar de 0,048. Las probetas de duramen y duramen con médula presentan una densidad aparente media levemente superior a las de albura, **0,695** gr/cm³ con una desviación estándar de 0,042. A su vez, la densidad aparente media de las probetas de cortes radiales y tangenciales de madera de duramen es mayor a las anteriores, **0,719** gr/cm³ y una desviación estándar menor de 0.015.

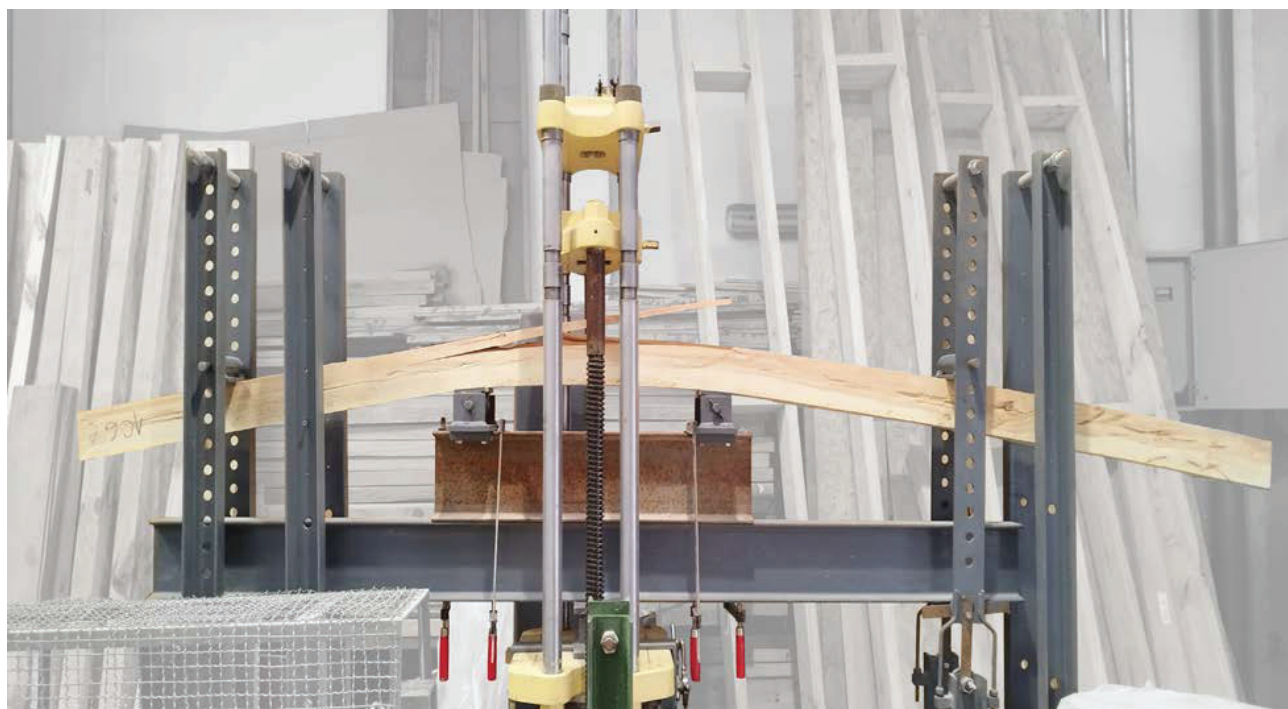
Es interesante destacar la incidencia que tiene la presencia de médula en la densidad aparente media de la madera de duramen y médula ya que el valor es más bajo si se compara con la densidad aparente media de la madera solo de duramen.

La madera de acacia estudiada presenta valores similares de densidad al valor dado por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) de Argentina para la Acacia Negra de **0,670** gr/cm³ (670 k/m³).

La densidad del material tiene una relación directa con el módulo de elasticidad.

Nota.

Valor característico: Valor de una propiedad mecánica calculado para el 5° percentil. Es decir, el 95% de las piezas de madera tienen ese valor de propiedad mecánica o mayor.



INFORME DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS MADERA DE ACACIA NEGRA (*Gleditsia tricanthos*)

Susana Torán
Luis Gallardi

Equipo Tecnología de la Construcción en madera
IT | FADU | Udelar

Abril
2023

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
INTRODUCCION	3
CONTENIDO DE HUMEDAD DE LAS VIGAS Y ENSAYO NO DESTRUCTIVO	3
ENSAYO DE FLEXIÓN ESTÁTICA	4
RESULTADOS	8
CONCLUSIONES	8
GLOSARIO	9

Determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) y Módulo de Rotura (MOR) de la madera de Acacia negra (*Gleditsia triacanthos*). Ensayo A flexión estática

Introducción

La Regional Litoral oeste del Sistema Nacional de Áreas Protegidas, del Ministerio de Ambiente, solicitó caracterizar mecánica y físicamente unas vigas de madera de Acacia negra (*Gleditsia triacanthos*), las que se ensayaron en el laboratorio del Instituto de Tecnologías de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU). Las vigas presentaban dimensiones y longitudes variables, por lo que fue necesario dimensionarlas y es cuadrarlas.

De la muestra se seleccionaron 6 vigas que se estacionaron en un ámbito protegido por varios meses para bajar su contenido de humedad (CH). Según la proporción de albura y duramen presente en cada viga, el CH variaba desde un 25 % al 60 %. El ensayo a flexión estática requiere que el CH de la madera sea menor al 20 %.

Como este estudio es de carácter exploratorio, no universal, se analizaron 5 vigas de madera de *Gleditsia triacanthos* con el propósito de determinar el Módulo de Elasticidad (MOE), Módulo de Rotura (MOR), densidad y contenido de humedad de la madera.

1. Contenido de humedad de las vigas

En cada viga se controló el contenido de humedad antes de ensayarlas. Para medir el CH se utilizó un xilohigrómetro digital PROTIMETER MINI. Las púas de acero del xilohigrómetro se hincan 3 mm a 30 cm de los extremos y en el punto medio de la pieza, en zonas sin nudos. El CH se mide por contacto de los electrodos con la superficie de la madera. El valor se lee en una escala de diodos led de colores: verde indica madera seca CH = 6 % a 16 %; amarillo CH = 17 % a 19 % y la zona roja CH = 20 % a 60 % madera no seca, no es apta para uso estructural. Se observó que la albura tiene un CH mayor que el duramen. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Control del CH en las probetas antes del ensayo.

PROBETA N°	SECCIÓN (mm)	CH %	CH %	CH %	CH promedio %
AC 01	100X50	14	17	15	15
AC 02	100X50	16	14	16	15
AC 03	100X50	18	22	17	19
AC 04	98X50	14	17	17	16
AC 05	100x37	12	16	12	13
AC 06	98X50	14	22	19	18



Fig. 2
Xilohigrómetro

2. Caracterización de la madera por métodos no destructivos | Sylvatest Trio

Con un equipo Sylvatest Trio se determinó el Módulo de elasticidad medio (E) de la madera. Es un ensayo no destructivo que consiste en propagar ondas ultrasónicas en la dirección longitudinal de la pieza. El equipo registra el tiempo –en milisegundos– que tarda en llegar una onda de 22.000 hertz desde un transductor emisor a un transductor receptor, conectados en los extremos de la viga de madera. Luego, usando la fórmula (1) se obtiene el módulo de elasticidad medio, siendo c la velocidad de propagación de la onda, ρ la densidad media de la madera y g la constante de aceleración gravitacional.

$$E_{\text{medio}} = \frac{c^2 \cdot \rho}{g} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

(1)

Los resultados obtenidos del Módulo de Elasticidad medio se muestran en la Tabla 2.



Fig.2. Equipo Sylvatest Trio.



Fig. 3 Ensayo no destructivo en vigas de Acacia negra.

Tabla 2. Módulo de elasticidad medio - Sylvatest.

PROBETA Nº	c		ρ		g	E medio MÓDULO DE ELASTICIDAD. k/cm ²
	VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN m/s cm/s		DENSIDAD k/m ³ k/cm ³		CTE. DE ACELERACIÓN GRAVITACIONAL. cm/seg ²	
AC 01	4048	404800	670*	0,000670	980	112029
AC 02	3969	396900				107699
AC 03	4074	407400				113473
AC 04	4134	413400				116839
AC 06	4185	418500				119740

* Valor de densidad de la Acacia negra tomado del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) de Argentina.

3. Ensayo destructivo

3.1 Dimensiones de las probetas

Espesor de la probeta = 50mm
Altura de la probeta = 100mm.
Longitud de la probeta = 3000mm
Longitud de ensayo = 1800mm.
Número de probetas: 5

Las propiedades mecánicas se determinaron en probetas a tamaño real. Se ensayaron a flexión estática hasta la rotura 5 probetas de 50x100mm y una luz de ensayo de 1800 mm.

3.2 Ensayo de flexión estática hasta la rotura

Se utiliza la norma **UNIT 1191:2010**. Madera - Determinación de las propiedades mecánicas a través de ensayos de flexión estática, la cual está basada en la norma ASTM D198 “*Statistic Tests of Lumber in Estructural Sizes*, cuya filosofía es la realización de ensayos de probetas a *tamaño de uso* (tamaño real).

Los ensayos a flexión se realizaron en una prensa Universal Tinus Olsen que tiene una capacidad de carga hasta 60000 libras. Cuenta con un marco rígido para soportar la probeta y a la vez facilitar su deformación sin restricciones, una cabeza de carga que reparte en dos puntos la fuerza aplicada y una viga de reacción que asegura la rigidez del sistema. El esquema al que responde el ensayo se muestra en la Fig. 4.

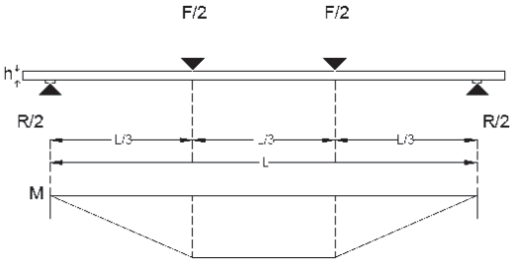


Fig. 4. Esquema del dispositivo para el ensayo a flexión.

La probeta de madera de sección rectangular con una luz igual a 18 ± 1.5 veces la altura de la probeta, simplemente apoyada en rodillos que posibilitan su rotación alrededor de la reacción a medida que se deforma, se le aplica una carga **F** a velocidad constante, en el tercio central. Se registra la carga y la deformación hasta que la probeta rompe. La carga se mide con un dinamómetro Dillon ubicado en una de las reacciones y la deformación con un calibre Digimatic Mitutoyo de 0.001 mm de precisión.

3.3 Ensayo

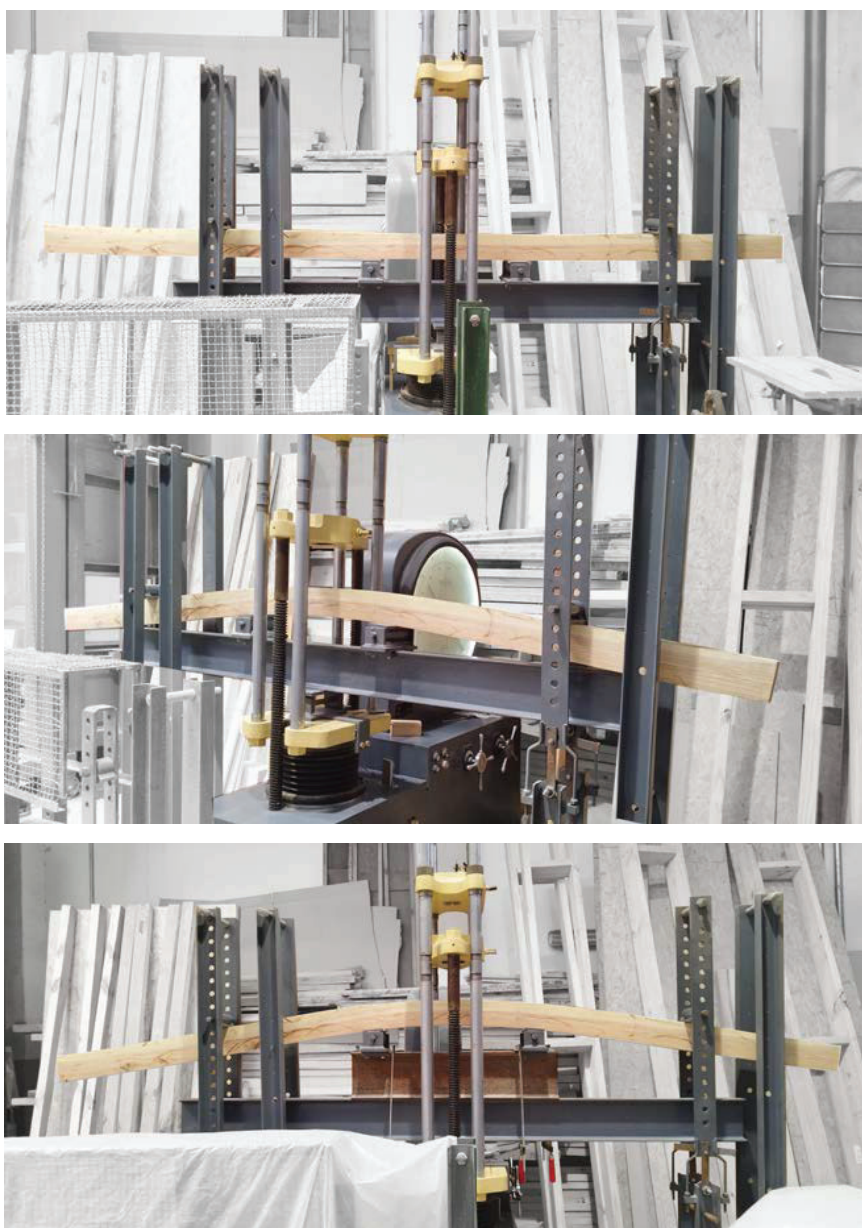


Fig. 5. Ensayo a flexión estática hasta la rotura.

3.4 Registro de datos

Con los valores obtenidos se trazan los gráficos de carga/deformación. Para el análisis de regresión lineal se determina la carga en el tramo de la curva entre el **10%** y **40%** de la carga máxima. Con la diferencia entre la deformación en el rango elástico asociada a sus respectivas cargas, se determina experimentalmente el Módulo de Elasticidad **E** y la Tensión de rotura **frot** empleando las siguientes fórmulas:

$$E = 23 F_{le} \times luz^3 / 108 bh^3 \times \delta \qquad \mathbf{frot} = Frot \times luz / bh^2$$

Donde: F_{le} = carga en el período elástico de la curva carga/deformación
 $Frot$ = carga de rotura

- l = luz de ensayo
- b = base de la probeta
- h = altura de la probeta
- δ = incremento de la deformación correspondiente a F_{le}
- f_{rot} = Tensión de rotura
- E = Módulo de Elasticidad

3.5 Formas de rotura



Fig. 6. Tipos de rotura

GRÁFICO CARGA-DEFORMACIÓN PROBETA – AC 03

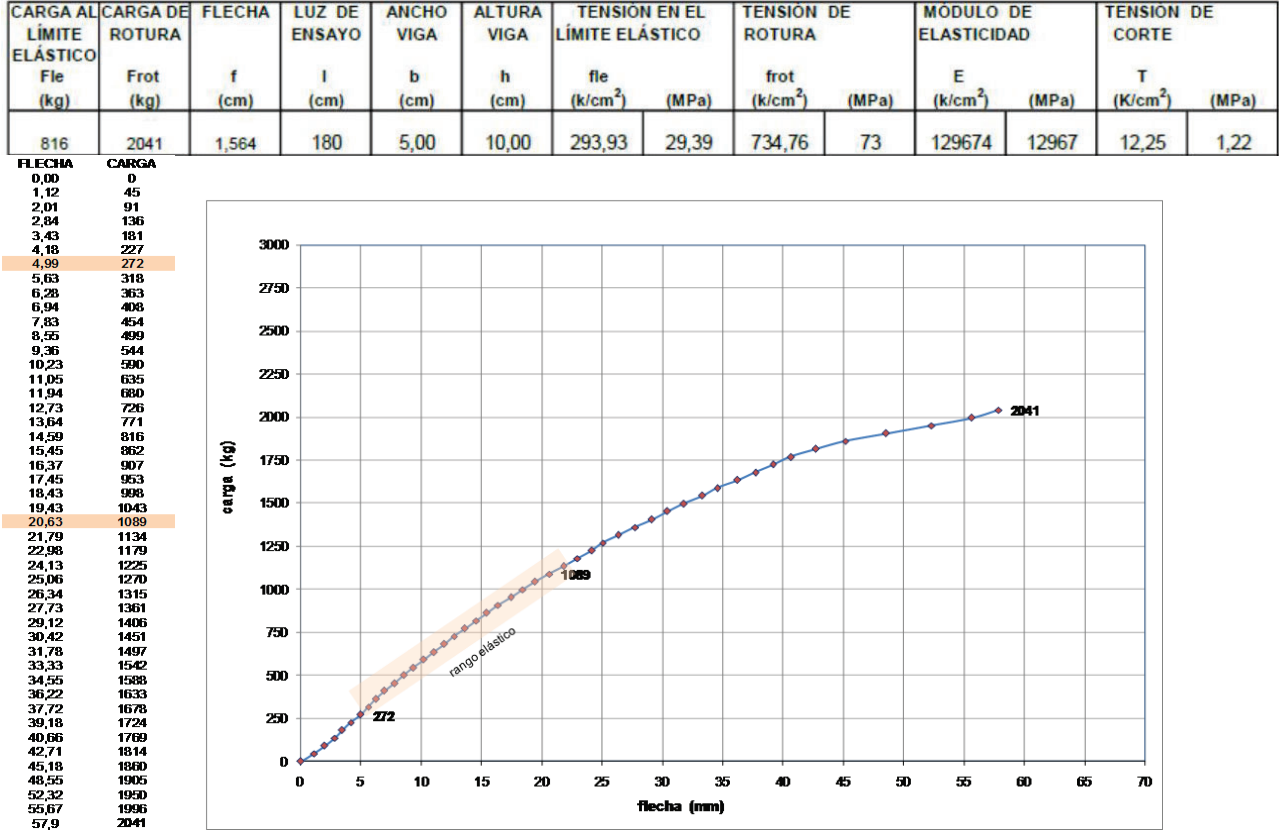
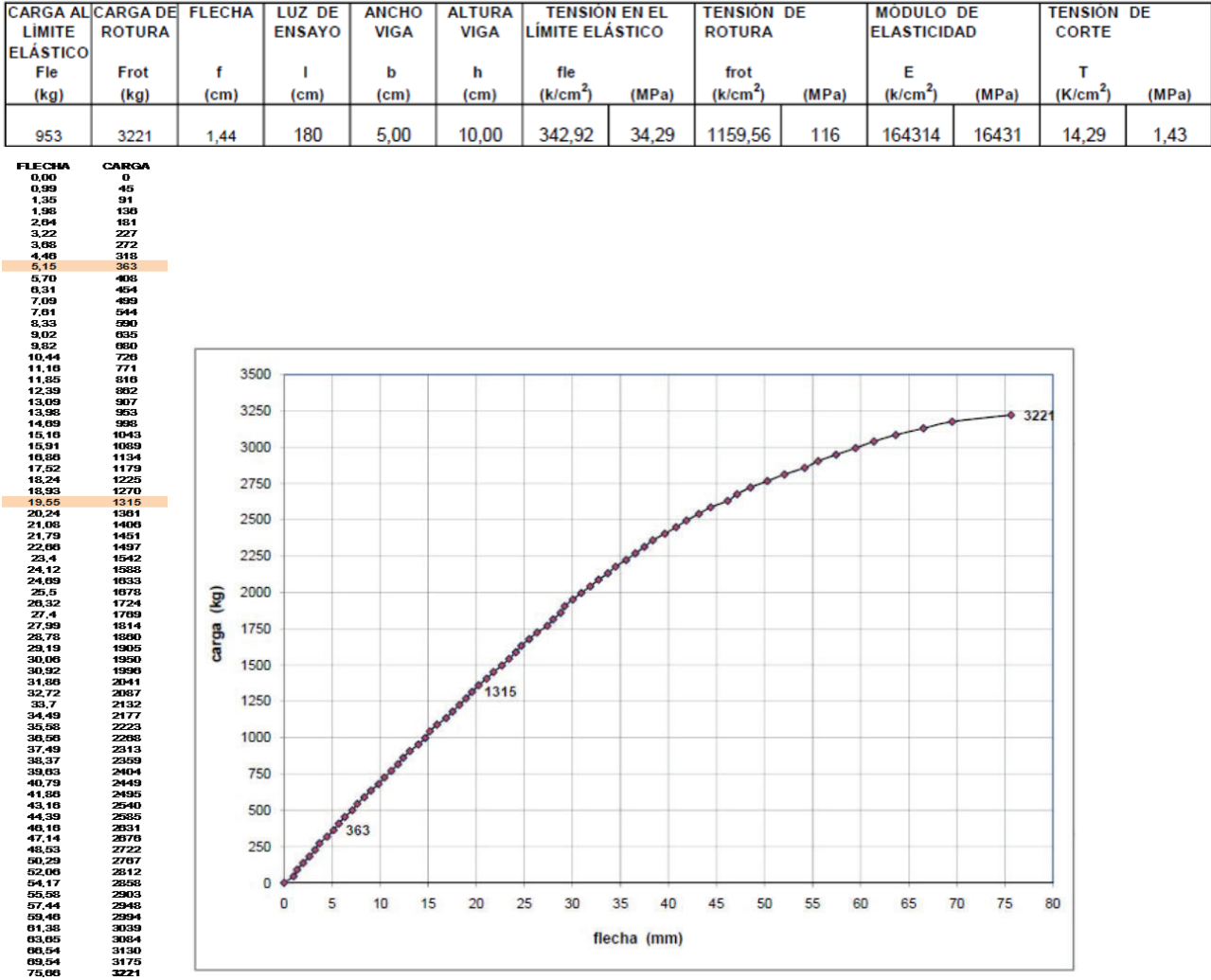


GRÁFICO CARGA-DEFORMACIÓN PROBETA AC 04



Si bien se ensayaron 7 probetas, se descartaron las probetas AC 05 y AC 07 por tener un menor ancho la primera y una curvatura muy acentuada la segunda.
Se adjuntan los datos y resultados obtenidos del ensayo a flexión estática de 5 probetas.

4. Resultados ensayo a flexión

PROBETA N°	TENSIÓN DE ROTURA frot		MÓDULO DE ELASTICIDAD E	
	K/cm ²	Mpa	K/cm ²	Mpa
AC 01	1273,7	127,4	213935	21393
AC 02	800,3	80,0	136454	13645
AC 03	734,8	73,5	129674	12967
AC 04	1159,6	116,0	164314	16431
AC 06	1009,1	100,9	156718	15672

Resultados				
n	5			
Media	995,5	99,5	160219,0	16021,9
Desviación estándar	229,4	22,9	33212,0	3321,2
CV %	23,0	23,0	20,7	20,7

Conclusiones

Podemos observar que la viga AC 03 presenta el valor más bajo de Módulo de Elasticidad, E=129674 k/cm².
El mayor valor corresponde a la viga AC 01 con E=213935 k/cm². Estos resultados se relacionan con el tipo de madera; la viga AC 03 tiene mayor presencia de albura y la viga AC 01 es de duramen.
La viga AC 02 compuesta de madera de duramen y médula, presenta el segundo valor más bajo de Módulo de Elasticidad, E=136454 k/cm².
Las vigas AC 04 y AC 06 tienen tanto madera de duramen como de albura, sus Módulos de Elasticidad son similares.

Al comparar el resultado del ensayo no destructivo (Sylvatest) con los datos del ensayo a flexión estática vemos que el Módulo de elasticidad es menor en todos los casos. Hay que tener en cuenta que la velocidad de onda que emite el Sylvatest se mide únicamente en la línea neutra de la sección, en la dirección longitudinal.

Se muestra a continuación un cuadro resumen de los valores de Módulo de Elasticidad obtenidos en los dos tipos de ensayos (destructivo y no destructivo) y el tipo de madera de cada viga.

PROBETA N°	MÓDULO DE ELASTICIDAD E		SYLVATEST E medio k/cm ²	OBSERVACIONES
	K/cm ²	Mpa		
AC 01	213935	21393	112029	Viga de duramen
AC 02	136454	13645	107699	Viga de duramen y médula
AC 03	129674	12967	113473	Viga con 80% de albura
AC 04	164314	16431	116839	Viga con 70% de duramen
AC 06	156718	15672	119740	Viga con 50% de albura

Al comparar los valores medios del Módulo de elasticidad de ambos ensayos, la viga AC 01 presenta el mayor valor de E=213935 k/cm², valor que es muy diferente al obtenido con el Sylvatest.

Se realiza el análisis sin la viga AC 01, los resultados se muestran en el cuadro siguiente:

PROBETA N°	TENSIÓN DE ROTURA frot		MÓDULO DE ELASTICIDAD E	
	K/cm ²	Mpa	K/cm ²	Mpa
AC 02	800,3	80,0	136454	13645
AC 03	734,8	73,5	129674	12967
AC 04	1159,6	116,0	164314	16431
AC 06	1009,1	100,9	156718	15672

Resultados

n	4			
Media	925,9	92,6	146790,1	14679,0
Desviación estándar	194,8	19,5	16385,3	1638,5
CV %	21,0	21,0	11,2	11,2

Cabe señalar que los valores obtenidos experimentalmente de **E = 146790,1 K/cm²** y **frot = 925,9 K/cm²** son meramente indicativos. No se pueden extrapolar a toda la madera de Acacia Negra, ya que sería necesario realizar un mayor número de ensayos con madera procedente de diferentes zonas del país, para que los datos tengan validez estadística.

Glosario

Cara, altura o canto (h): Lado mayor de la sección transversal de las piezas rectangulares (vigas).

Contenido de humedad: Masa de agua contenida en la madera, expresada en porcentaje respecto a su masa anhidra.

Longitud (L): Largo total de la pieza.

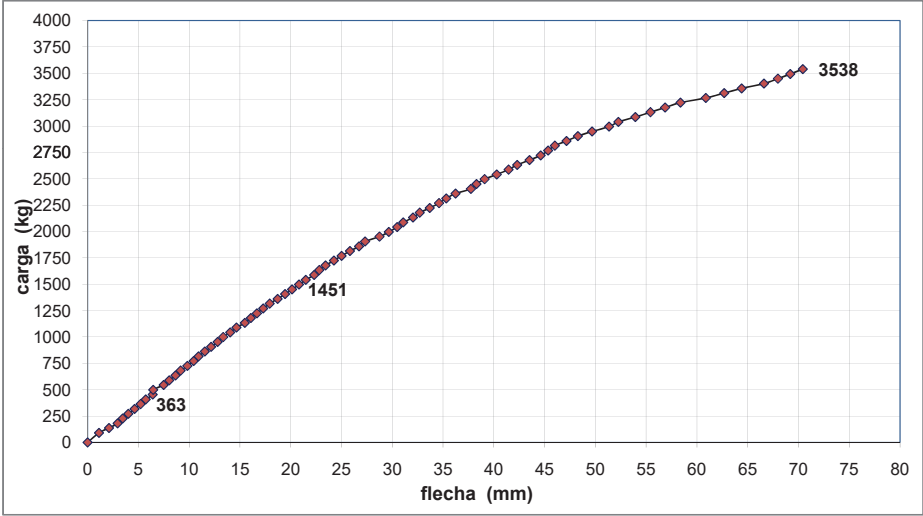
Luz de ensayo (l): Distancia entre apoyos de una viga. Puede coincidir o no con la longitud.

ENSAYO A FLEXIÓN ESTÁTICA VIGA AC 01

CARGA AL LÍMITE ELÁSTICO	CARGA DE ROTURA	FLECHA	LUZ DE ENSAYO	ANCHO VIGA	ALTURA VIGA	TENSIÓN EN EL LÍMITE ELÁSTICO		TENSIÓN DE ROTURA		MÓDULO DE ELASTICIDAD		TENSIÓN DE CORTE	
Fle (kg)	Frot (kg)	f (cm)	l (cm)	b (cm)	h (cm)	fle (k/cm ²)	(MPa)	frot (k/cm ²)	(MPa)	E (k/cm ²)	(MPa)	T (K/cm ²)	(MPa)
1225	3538	1,422	180	5,00	10,00	440,89	44,09	1273,68	127	213935	21393	18,37	1,84

Diferencia entre la flecha mayor y menor en el rango elástico asociada a sus respectivas cargas

FLECHA	CARGA
0,00	0
1,11	91
2,10	136
2,94	181
3,45	227
4,01	272
4,62	318
5,21	363
5,72	408
6,41	454
6,45	499
7,49	544
8,04	590
8,66	635
9,15	680
9,83	726
10,44	771
10,92	816
11,54	862
12,15	907
12,79	953
13,36	998
14,04	1043
14,65	1089
15,48	1134
16,07	1179
16,68	1225
17,29	1270
17,92	1315
18,70	1361
19,43	1406
20,13	1451
20,82	1497
21,48	1542
22,30	1588
22,81	1633
23,42	1678
24,24	1724
25,00	1769
25,82	1814
26,73	1860
27,33	1905
28,75	1950
29,65	1996
30,48	2041
31,08	2087
32,03	2132
32,69	2177
33,68	2223
34,61	2268
35,31	2313
36,23	2359
37,75	2404
38,28	2449
39,10	2495
40,29	2540
41,44	2585
42,29	2631
43,51	2676
44,61	2722
45,35	2767
46,01	2812
47,15	2858
48,27	2903
49,67	2948
51,35	2994
52,25	3039
53,93	3084
55,42	3130
56,87	3175
58,38	3221
60,88	3266
62,68	3311
64,40	3357
66,59	3402
67,98	3447
69,19	3493
70,42	3538

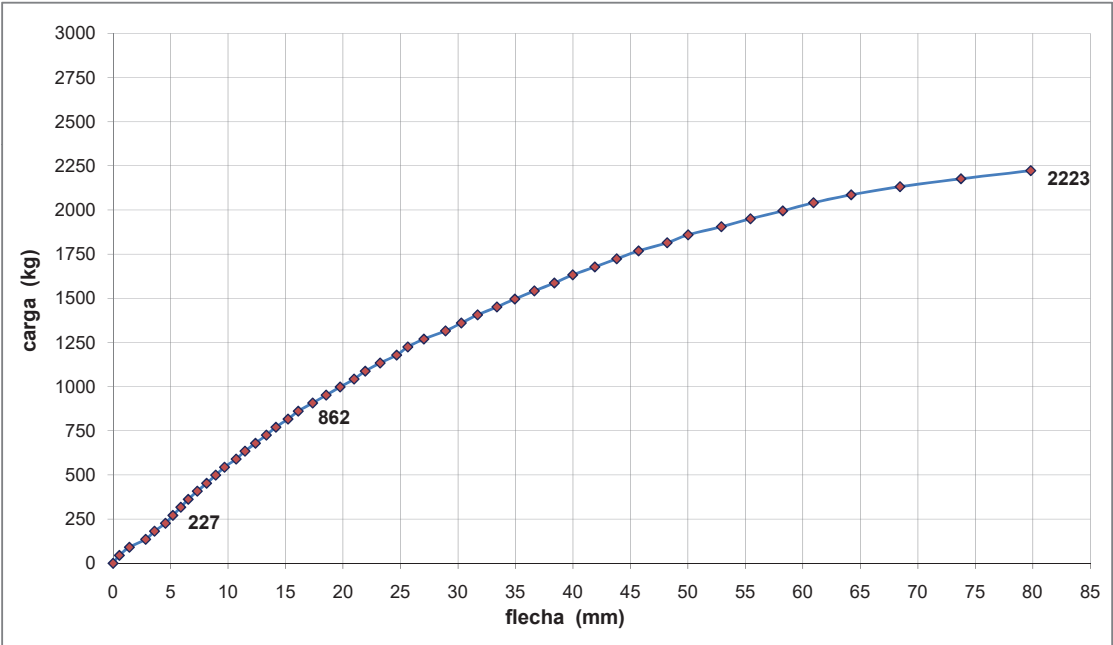


ENSAYO A FLEXIÓN ESTÁTICA VIGA AC 02

CARGA AL LÍMITE ELÁSTICO Fle (kg)	CARGA DE ROTURA Frot (kg)	FLECHA f (cm)	LUZ DE ENSAYO l (cm)	ANCHO VIGA b (cm)	ALTURA VIGA h (cm)	TENSIÓN EN EL LÍMITE ELÁSTICO		TENSIÓN DE ROTURA		MÓDULO DE ELASTICIDAD		TENSIÓN DE CORTE	
						fle (k/cm ²)	(MPa)	frot (k/cm ²)	(MPa)	E (k/cm ²)	(MPa)	T (K/cm ²)	(MPa)
635	2223	1,156	180	5,00	10,00	228,61	22,86	800,28	80	136454	13645	9,53	0,95

Diferencia entre la flecha mayor y menor en el rango elástico asociada a sus respectivas cargas

FLECHA	CARGA
0,00	0
0,55	45
1,42	91
2,85	136
3,62	181
4,56	227
5,20	272
5,89	318
6,54	363
7,34	408
8,14	454
8,94	499
9,71	544
10,71	590
11,48	635
12,39	680
13,35	726
14,17	771
15,22	816
16,12	862
17,36	907
18,55	953
19,75	998
20,98	1043
21,95	1089
23,24	1134
24,67	1179
25,65	1225
27,05	1270
28,92	1315
30,29	1361
31,72	1406
33,4	1451
34,95	1497
36,65	1542
38,39	1588
39,98	1633
41,92	1678
43,81	1724
45,72	1769
48,21	1814
50,03	1860
52,92	1905
55,45	1950
58,25	1996
60,94	2041
64,2	2087
68,45	2132
73,75	2177
79,83	2223

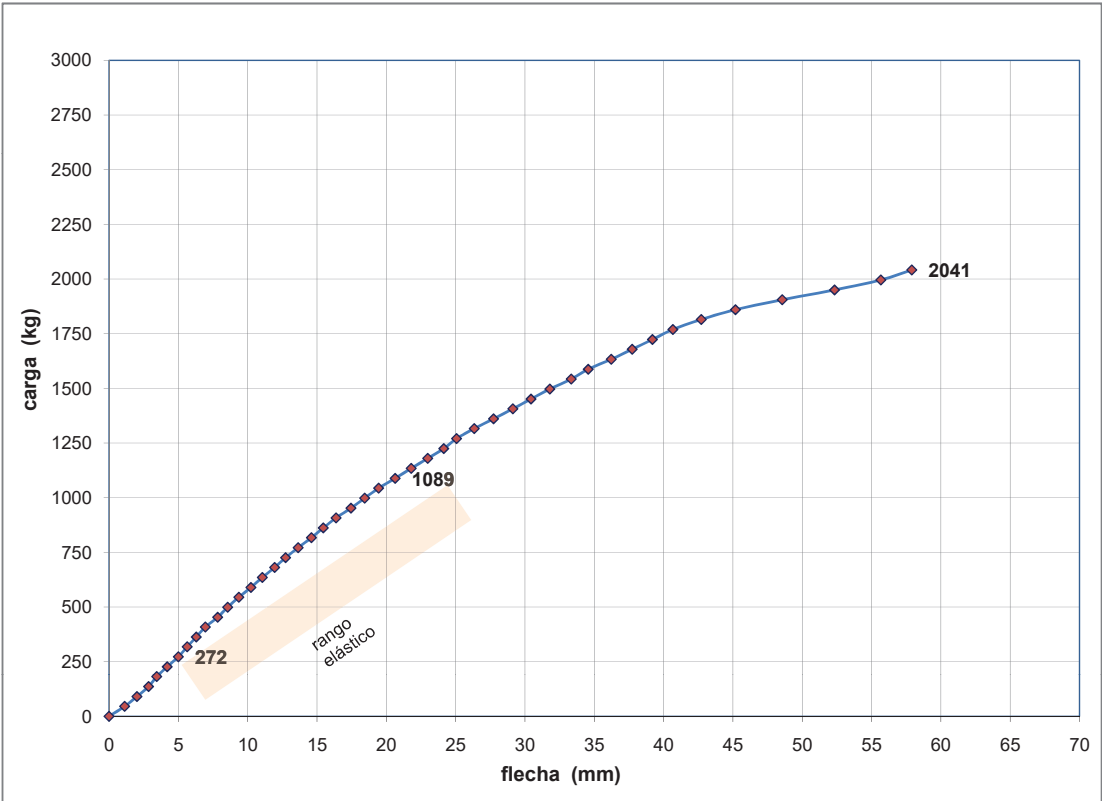


ENSAYO A FLEXIÓN ESTÁTICA VIGA AC 03

CARGA AL LÍMITE ELÁSTICO	CARGA DE ROTURA	FLECHA	LUZ DE ENSAYO	ANCHO VIGA	ALTURA VIGA	TENSIÓN EN EL LÍMITE ELÁSTICO		TENSIÓN DE ROTURA		MÓDULO DE ELASTICIDAD		TENSIÓN DE CORTE	
Fle (kg)	Frot (kg)	f (cm)	l (cm)	b (cm)	h (cm)	fle (k/cm²)	(MPa)	frot (k/cm²)	(MPa)	E (k/cm²)	(MPa)	T (K/cm²)	(MPa)
816	2041	1,564	180	5,00	10,00	293,93	29,39	734,76	73	129674	12967	12,25	1,22

Diferencia entre la flecha mayor y menor en el rango elástico asociada a sus respectivas cargas

FLECHA	CARGA
0,00	0
1,12	45
2,01	91
2,84	136
3,43	181
4,18	227
4,99	272
5,63	318
6,28	363
6,94	408
7,83	454
8,55	499
9,36	544
10,23	590
11,05	635
11,94	680
12,73	726
13,64	771
14,59	816
15,45	862
16,37	907
17,45	953
18,43	998
19,43	1043
20,63	1089
21,79	1134
22,98	1179
24,13	1225
25,06	1270
26,34	1315
27,73	1361
29,12	1406
30,42	1451
31,78	1497
33,33	1542
34,55	1588
36,22	1633
37,72	1678
39,18	1724
40,66	1769
42,71	1814
45,18	1860
48,55	1905
52,32	1950
55,67	1996
57,9	2041

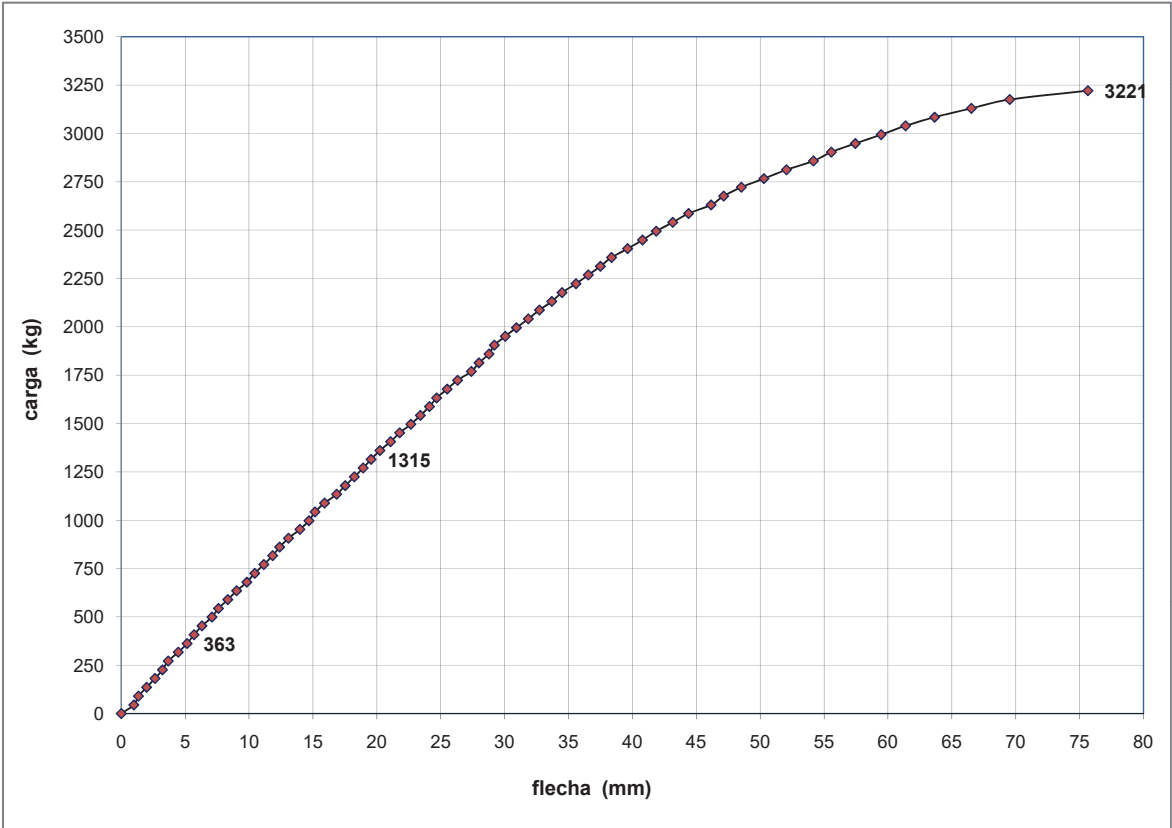


ENSAYO A FLEXIÓN ESTÁTICA VIGA AC 04

CARGA AL LÍMITE ELÁSTICO Fle (kg)	CARGA DE ROTURA Frot (kg)	FLECHA f (cm)	LUZ DE ENSAYO l (cm)	ANCHO VIGA b (cm)	ALTURA VIGA h (cm)	TENSIÓN EN EL LÍMITE ELÁSTICO		TENSIÓN DE ROTURA		MÓDULO DE ELASTICIDAD		TENSIÓN DE CORTE	
						fle (k/cm ²)	(MPa)	frot (k/cm ²)	(MPa)	E (k/cm ²)	(MPa)	T (K/cm ²)	(MPa)
953	3221	1,44	180	5,00	10,00	342,92	34,29	1159,56	116	164314	16431	14,29	1,43

Diferencia entre la flecha mayor y menor en el rango elástico asociada a sus respectivas cargas

FLECHA	CARGA
0,00	0
0,99	45
1,35	91
1,98	136
2,64	181
3,22	227
3,68	272
4,46	318
5,15	363
5,70	408
6,31	454
7,09	499
7,61	544
8,33	590
9,02	635
9,82	680
10,44	726
11,16	771
11,85	816
12,39	862
13,09	907
13,98	953
14,69	998
15,16	1043
15,91	1089
16,86	1134
17,52	1179
18,24	1225
18,93	1270
19,55	1315
20,24	1361
21,08	1406
21,79	1451
22,66	1497
23,4	1542
24,12	1588
24,69	1633
25,5	1678
26,32	1724
27,4	1769
27,99	1814
28,78	1860
29,19	1905
30,06	1950
30,92	1996
31,86	2041
32,72	2087
33,7	2132
34,49	2177
35,58	2223
36,56	2268
37,49	2313
38,37	2359
39,63	2404
40,79	2449
41,86	2495
43,16	2540
44,39	2585
46,16	2631
47,14	2676
48,53	2722
50,29	2767
52,06	2812
54,17	2858
55,58	2903
57,44	2948
59,46	2994
61,38	3039
63,65	3084
66,54	3130
69,54	3175
75,66	3221

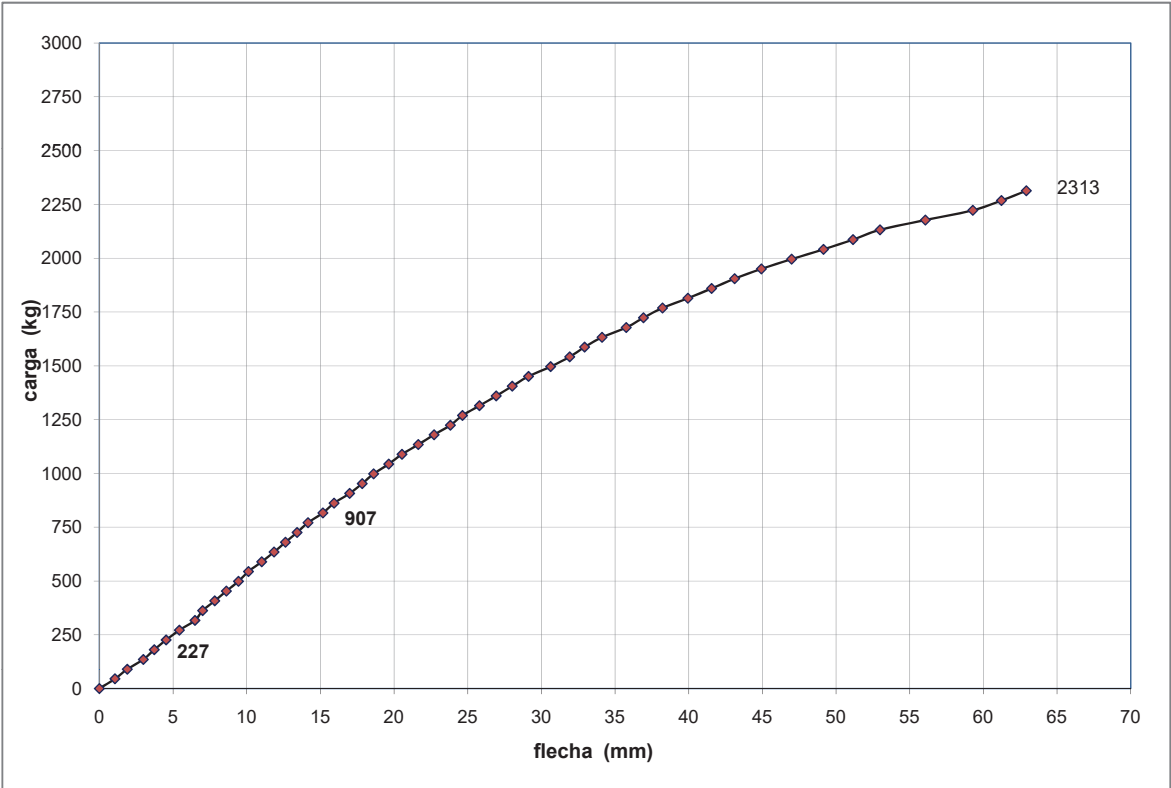


ENSAYO A FLEXIÓN ESTÁTICA VIGA AC 05 viga de menores dimensiones

CARGA AL LÍMITE ELÁSTICO Fle	CARGA DE ROTURA Frot	FLECHA f	LUZ DE ENSAYO l	ANCHO VIGA b	ALTURA VIGA h	Tensión en el Límite Elástico		Tensión de Rotura		Módulo de Elasticidad		Tensión de Corte	
(kg)	(kg)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	fle (k/cm²)	(MPa)	frot (k/cm²)	(MPa)	E (k/cm²)	(MPa)	T (K/cm²)	(MPa)
680	2313	1,246	180	5,00	10,00	244,94	24,49	832,68	83	135641	13564	10,21	1,02

Diferencia entre la flecha mayor y menor en el rango elástico asociada a sus respectivas cargas

FLECHA	CARGA
0,00	0
1,05	45
1,89	91
2,98	136
3,72	181
4,52	227
5,43	272
6,48	318
7,01	363
7,83	408
8,62	454
9,43	499
10,12	544
11,01	590
11,86	635
12,63	680
13,41	726
14,16	771
15,17	816
15,93	862
16,98	907
17,83	953
18,61	998
19,63	1043
20,53	1089
21,64	1134
22,71	1179
23,82	1225
24,65	1270
25,79	1315
26,93	1361
28,02	1406
29,12	1451
30,62	1497
31,92	1542
32,93	1588
34,12	1633
35,76	1678
36,92	1724
38,22	1769
39,94	1814
41,56	1860
43,12	1905
44,93	1950
46,99	1996
49,15	2041
51,15	2087
52,98	2132
56,07	2177
59,29	2223
61,23	2268
62,92	2313

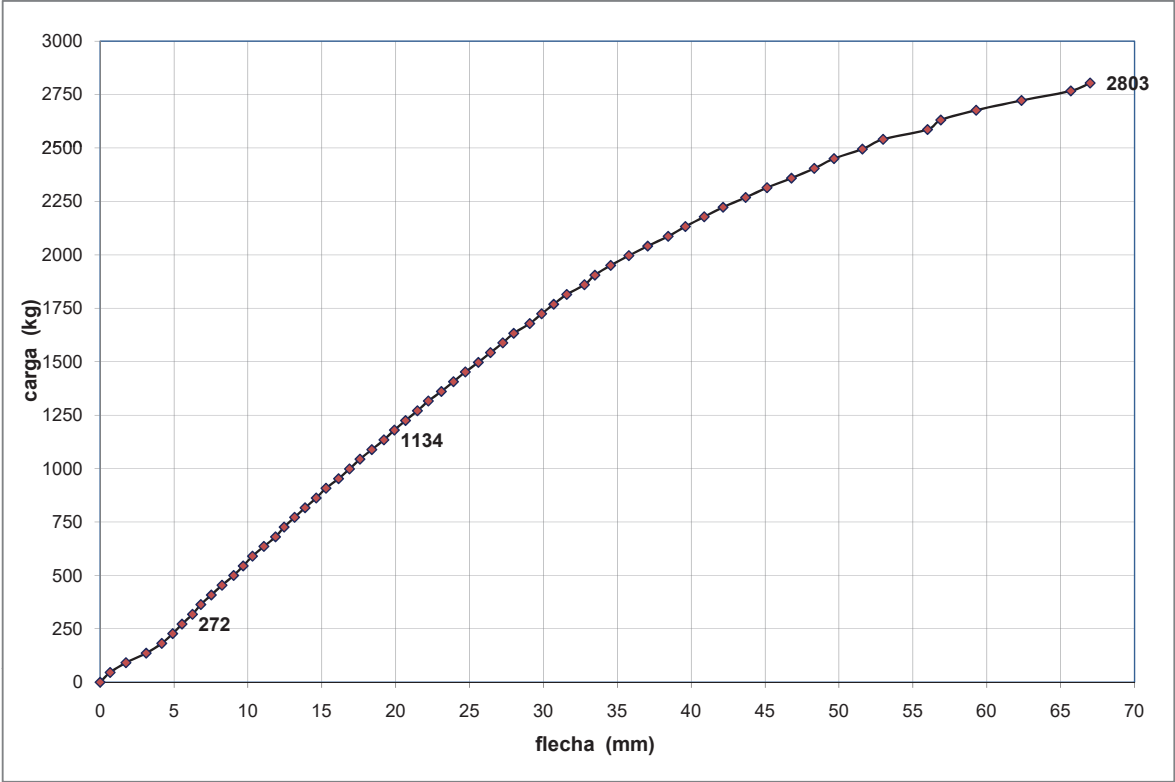


ENSAYO A FLEXIÓN ESTÁTICA VIGA AC 06

CARGA AL LÍMITE ELÁSTICO Fle (kg)	CARGA DE ROTURA Frot (kg)	FLECHA f (cm)	LUZ DE ENSAYO l (cm)	ANCHO VIGA b (cm)	ALTURA VIGA h (cm)	TENSIÓN EN EL LÍMITE ELÁSTICO		TENSIÓN DE ROTURA		MÓDULO DE ELASTICIDAD		TENSIÓN DE CORTE	
						fle (k/cm ²)	(MPa)	frot (k/cm ²)	(MPa)	E (k/cm ²)	(MPa)	T (K/cm ²)	(MPa)
862	2803	1,37	180	5,00	10,00	310,26	31,03	1009,08	101	156718	15672	12,93	1,29

Diferencia entre la flecha mayor y menor en el rango elástico asociada a sus respectivas cargas

FLECHA	CARGA
0,00	0
0,68	45
1,75	91
3,12	136
4,17	181
4,91	227
5,55	272
6,25	318
6,81	363
7,52	408
8,25	454
9,03	499
9,68	544
10,31	590
11,09	635
11,87	680
12,45	726
13,16	771
13,87	816
14,62	862
15,29	907
16,14	953
16,88	998
17,58	1043
18,39	1089
19,21	1134
19,91	1179
20,67	1225
21,48	1270
22,22	1315
23,09	1361
23,91	1406
24,72	1451
25,59	1497
26,42	1542
27,25	1588
27,99	1633
29,07	1678
29,88	1724
30,69	1769
31,58	1814
32,78	1860
33,49	1905
34,55	1950
35,79	1996
37,05	2041
38,44	2087
39,61	2132
40,89	2177
42,15	2223
43,68	2268
45,14	2313
46,78	2359
48,33	2404
49,66	2449
51,59	2495
52,99	2540
55,99	2585
56,89	2631
59,29	2676
62,35	2722
65,69	2767
67,00	2803



ENSAYO A FLEXIÓN ESTÁTICA VIGA AC 07

CARGA ALC LÍMITE ELÁSTICO	CARGA DE ROTURA	FLECHA	LUZ DE ENSAYO	ANCHO VIGA	ALTURA VIGA	TENSIÓN EN EL LÍMITE ELÁSTICO		TENSIÓN DE ROTURA		MÓDULO DE ELASTICIDAD		TENSIÓN DE CORTE	
Fle (kg)	Frot (kg)	f (cm)	l (cm)	b (cm)	h (cm)	fle (k/cm ²)	(MPa)	frot (k/cm ²)	(MPa)	E (k/cm ²)	(MPa)	T (K/cm ²)	(MPa)
400	1498	0,839	150	5,00	10,00	120,00	12,00	449,40	45	68534	6853	6,00	0,60

Diferencia entre la flecha mayor y menor en el rango elástico asociada a sus respectivas cargas

FLECHA	CARGA
0,00	0
1,67	100
3,50	200
5,36	300
7,07	400
10,30	500
11,89	600
14,20	700
16,94	800
19,54	900
21,62	1000
24,60	1100
28,25	1200
31,57	1300
34,75	1400
40,49	1498

