

Diseño y ensayo de vigas de madera compuestas

Ing. Juan Tuk, M.Sc.*

Ing. Federico Picado**

RESUMEN

*Se diseñaron vigas a escala natural y se sometieron a pruebas de resistencia a la flexión. Las vigas investigadas fueron de dos tipos: CAJON—alas de madera sujetas con dos almas y tipo I—alas sujetas con alma única. Las almas fueron cortadas de tablero aglomerado, mientras que las alas se construyeron con madera de caobilla (*Carapa* sp.) seca al 14% de contenido de humedad.*

Los resultados mostraron fallas por cortante a niveles de carga inferiores a los esperados en el alma de los tableros.

Las deflexiones observadas en el rango elástico fueron mayor que lo esperado en forma consistente.

La explicación de esta imprecisión se puede deber a que no se consideró la deformación por cortante que ocurre en el tablero.

Aunque la muestra fue muy pequeña, se estima necesario aplicar un factor de corrección a las ecuaciones de diseño por resistencia de 1,68; en casos que el elemento trabaje en conjunto con otras vigas, caso contrario el factor deberá ser de 2,27 como mínimo. En el diseño por deformación se usará 1,88 para sistemas de vigas y 2,15 para vigas individuales.

1. INTRODUCCION

Las vigas de madera compuestas toman ventaja de la distribución de esfuerzos que se presenta en la sección transversal por acción del momento flector y el cortante.

En las zonas de esfuerzo normal máximo se coloca madera sólida dejando vacía la zona de esfuerzo menor, al centro de la sección. En las regiones de cortante máximo se disponen placas resistentes al cortante pero débiles a los esfuerzos de tensión. Estas placas son de menor costo que la madera sólida y aumentan la velocidad de construcción de las vigas. Como resultado se obtiene un uso más racional de los materiales y una estructura más liviana.

Las figuras 1 y 2 muestran la disposición de los materiales en una viga cajón y una viga I respectivamente.

Consideraciones económicas muestran la ventaja de utilizar un sistema de vigas compuestas en combinación con losas de concreto. Este análisis económico no se incluye en este trabajo.

Fernández, C. (2) realizó un trabajo semejante usando alas de laurel (*Cordia alliodora*) y alma de madera contrachapada. En esta investigación las cargas observadas experimentalmente fueron inferiores a las calculadas.

Los ensayos se apegaron a normas ASTM (1) y a los procedimientos para pruebas encoladas que señala Tuk, J. (5).

Para el cálculo de las cargas teóricas se utilizó el procedimiento normal de diseño recomendado por American Institute of Timber Construction que se describe en el libro de Hoyle, R. (3).

Otras ecuaciones para el cálculo de las propiedades seccionales de uso común son presentadas en Popov, E. (4)

* Director del Centro de Investigación de Ingeniería en Maderas del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

** Investigador del Centro de Investigación de Ingeniería en Maderas del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

2. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

La resistencia estimada a la flexión de las vigas experimentales se obtuvo por el procedimiento que se describe a continuación. Las variables empleadas en las ecuaciones de diseño se refieren a las dimensiones que se muestran en la figura 1.

Las condiciones de falla pueden ser alcanzadas por esfuerzos originados por cargas diferentes: momento flector y cortante.

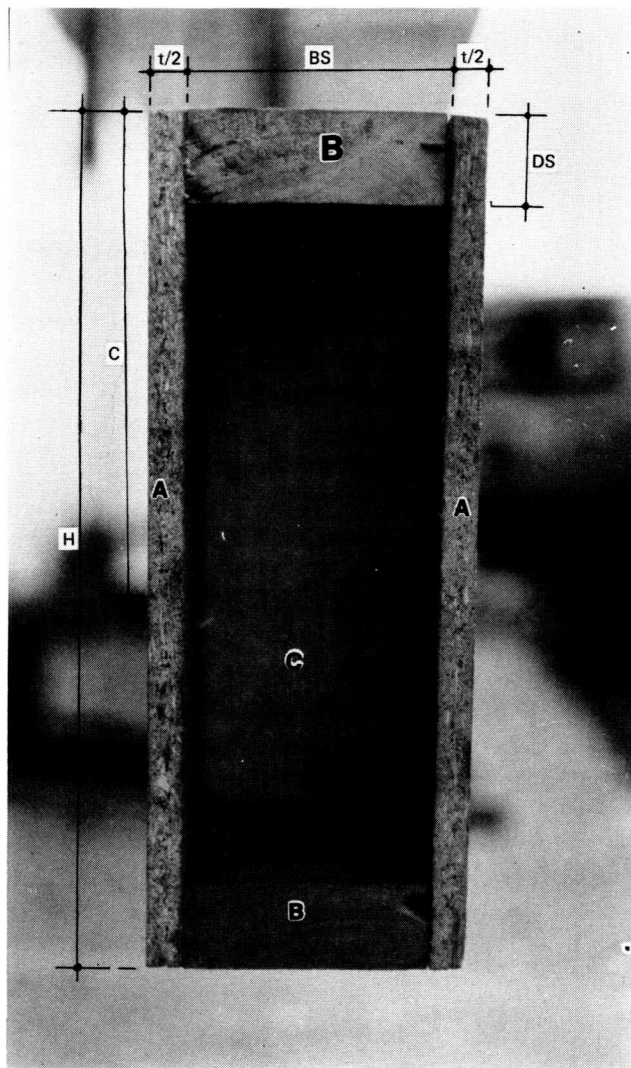


FIGURA 1: Sección de viga tipo cajón, cuyas alas (B) son de madera de Caobilla y almas (A) de aglomerado. Las piezas C corresponden a refuerzos de cortante.

(Foto J. Tuk)

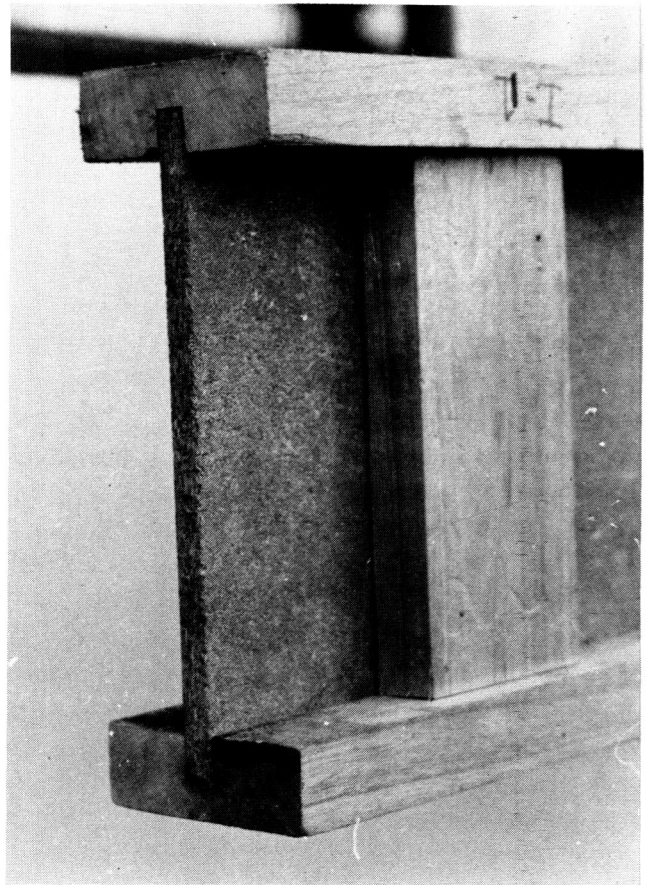


FIGURA 2: Sección de viga compuesta tipo "I".

(Foto J. Tuk)

2.1. Estimación de la resistencia a la flexión

La ecuación convencional para establecer esfuerzos en flexión es:*

$$f = \frac{Mc}{I}$$

Igualando f al esfuerzo de trabajo se tiene para M :

$$M = \frac{fI}{c}$$

El esfuerzo " f " debe ser modificado de acuerdo con un efecto observado experimentalmente, que consiste en una reducción relacionada con el peralte de la viga.

* Nomenclatura usada.

Este efecto viene cuantificado por el factor C_d que se establece por la ecuación:

$$C_d = 0.81 \left(\frac{h^2 + 567,7 + 355 C_y}{h^2 + 567,6} \right)$$

donde:

$$C_y = P^2 (6 - 8P + P^2) (1 - q) + q$$

El factor C_d se obtuvo para las secciones una vez que fueron transformadas. La transformación para los espesores del alma se hizo con base en la siguiente ecuación:

$$b_t = \frac{E_{agl.}}{E_{mad.}} b$$

a : Distancia del apoyo al punto de carga, simétrico (cm).

b_t : Factor de transformación (adimensional).

c : Distancia del eje neutro a la fibra más alejada (cm).

C_d : Factor de forma (adimensional).

E : Módulo de elasticidad de la madera (kg/cm^2).

f : Esfuerzo de trabajo en flexión (kg/cm^2).

f_v : Esfuerzo de trabajo en cortante (kg/cm^2).

H : Peralte de la viga (cm).

I : Momento de inercia de la sección respecto al eje nuevo (cm^4).

L : Claro de la viga (cm).

M : Momento flector ($\text{kg} - \text{cm}$).

P : Razón del peralte de las alas respecto al ancho total de la viga.

Q : Primer momento de área respecto al eje neutro (cm^3).

q : Razón del espesor de las almas respecto al ancho total de la viga.

t : Espesor (cm).

V : Carga cortante (kg).

2.2. Estimación de la resistencia al cortante

La falla por cortante puede ocurrir en dos zonas críticas en este tipo de vigas:

- en la unión entre el ala y el alma, y
- en el eje neutro de la viga que ocurre aproximadamente en la mitad del peralte.

La porción de los tercios externos del claro corresponden a la zona de máximo cortante, como se muestra en la figura 3,

El esfuerzo cortante para una porción de la viga viene dado por la siguiente ecuación:

$$f_v = VQ / It$$

2.3. Cálculo de las deformaciones

La ecuación para el cálculo de la deformación máxima al centro del claro viene dada por:

$$\Delta = \frac{Pa}{24EI} (3L^2 - 4a^2)$$

Las dimensiones a y L se muestran en la figura 3. Sustituyendo estos valores tenemos que:

$$\Delta = 744583.3 \frac{P}{EI}$$

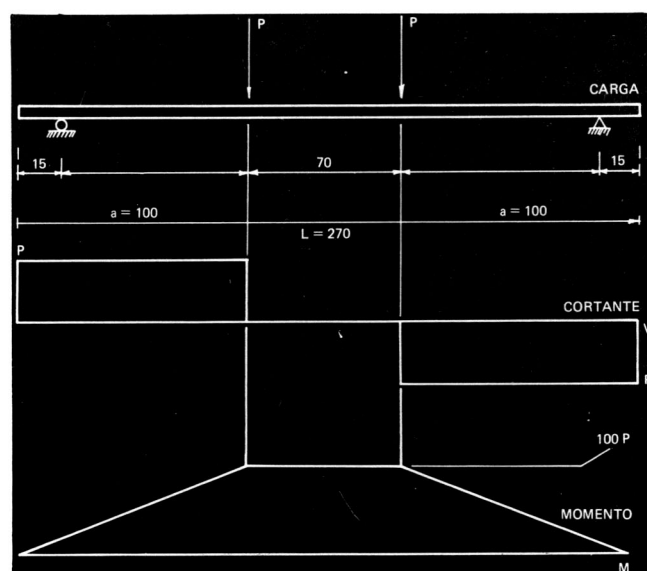


FIGURA 3. Diagramas de carga, cortante y momento flector para el ensayo a flexión de vigas compuestas.

Los valores de resistencia mecánica empleados para estimar la resistencia de las vigas se obtuvieron de un muestreo sobre el lote de material que fue usado posteriormente en la construcción de las vigas.

El Cuadro N° 1 describe las propiedades mecánicas de los materiales y uniones empleadas.

La carga última que puede resistir la viga, se obtuvo como la menor de tres cargas críticas calculadas:

- la que produce la falla de la unión ala—alma,
- la que produce esfuerzo cortante máximo en el alma, ambas para la zona de cortante máximo, y
- la que produce la falla en las alas por acción del momento flector.

CUADRO 1. *Propiedades mecánicas de los materiales y uniones usadas.*

DESCRIPCION	PROMEDIO	DESVIACION ESTANDAR
Tablero aglomerado		
Resistencia última al cortante (kg/cm ²)	139	22
Módulo de elasticidad KG/cm ² x 1000.	32	—
Densidad KGS/m ³	700	—
Caobilla		
Resistencia última a la compresión. kg/cm	379	25
Resistencia última a la tensión kg/cm ²	672	63
Módulo de elasticidad kg/cm ² x 1000	81	—
Unión: caobilla — aglomerado con polivinil acetato. kg/cm²		
	33,6	5,0

3. RESULTADOS

Las pruebas de carga, determinaron experimentalmente la capacidad máxima, el tipo de falla y las deflexiones ocurridas.

El Cuadro N° 2 presenta el nivel máximo de carga y el nivel último calculado para cada viga. También se muestran los errores calculados como porcentaje con base en el valor experimental. La razón entre la resistencia calculada y la experimental se muestra en la última columna.

El resultado de la medición de deformaciones al centro del claro se muestra en el Cuadro N° 3. En este cuadro se comparan las deformaciones calculadas con las observadas.

Un ejemplo de cálculo mostrando todos los detalles del procedimiento seguido para obtener los valores teóricos se incluye en el Apéndice.

La figura 4 muestra los diagramas de carga deformación para las vigas tipo I obtenidas en el rango elástico hasta el nivel de carga al límite de proporcionalidad.

La figura 5 muestra los diagramas para las vigas cajón.

4. CONCLUSIONES

Las vigas fueron diseñadas para obtener la falla por cortante. Los valores de falla experimentales fueron inferiores a los esperados en 1,41 veces para la viga I y en 1,68 veces para las cajón en promedio.

Existen dos causas posibles que pueden explicar este fenómeno. La primera es imprecisión en el análisis de distribución de esfuerzos dentro de la viga debido a que la relación claro/altura es bastante baja (resultó igual a 9), así como a que la aplicación de las cargas concentradas en el ala superior originan un efecto de placa en flexión. Se encuentra en proceso el desarrollo de un programa de computadora para el análisis de esfuerzo—deformación en sólidos por el método del elemento finito. Esto permitiría obtener la magnitud y la dirección de los esfuerzos principales.

CUADRO 2. Comparación entre carga de falla experimental y carga de diseño para vigas.

VIGA	CARGA DE FALLA CALCULADA kgs	CARGA DE FALLA EXPERIMENTAL kgs	TIPO FALLA	DIFERENCIA (%)*	RESISTENCIA CALCULADA RESISTENCIA EXPERIMENTAL
I – 1	1346	648,9	Cortante alma	– 107,0	2,07
I – 2	1380	1376,0	Cortante alma	– 0,2	1,00
I – 3	1295	1108,0	Cortante alma	– 17,0	1,17
Promedio	1340	1044,0		– 28,0	1,41
C – 1	2637	2019,0	Cortante alma	– 30,6	1,31
C – 2	2601	1757,0	Cortante alma	– 48,0	1,48
C – 3	2615	1150,0	Cortante alma	– 127,4	2,27
Promedio	2618	1642,0		– 68,6	1,68

*Con base en la carga experimental.

CUADRO 3. Comparación entre las deflexiones calculadas y experimentales, al centro del claro.

VIGA	DEFLEXION ^(o) CALCULADA (cm)	DEFLEXION EXPERIMENTAL (cm)	ERROR ⁽¹⁾ (%)	DEFLEXION EXPERIMENTAL DEFLEXION CALCULADA
I – 1	0,365	0,606	– 0,398	1,66
I – 2	0,509	1,010	– 0,496	1,98
I – 3	0,405	0,768	– 0,473	1,90
C – 1	1,110	1,616	– 0,506	1,46
C – 2	0,751	1,616	– 0,535	2,15
C – 3	0,358	0,768	– 0,534	2,15

(1) Con base en la deformación experimental.

(o) En el límite proporcional.

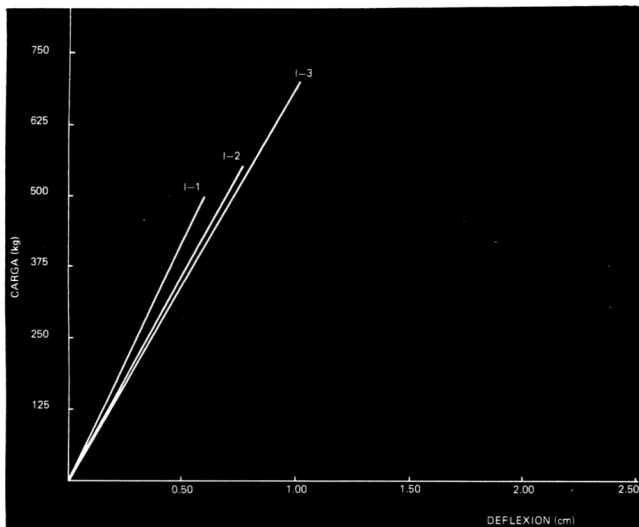


FIGURA 4: Diagrama de carga-deformación para las vigas I en el rango elástico.

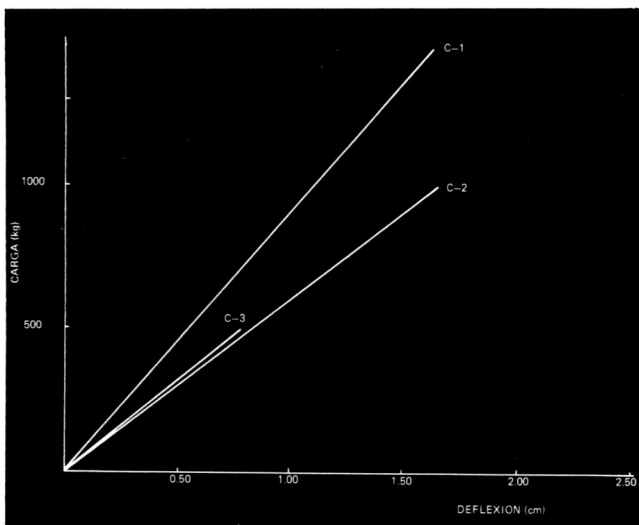


FIGURA 5: Diagrama de carga-deformación para las vigas cajón en rango elástico.

En segundo lugar, debe hacerse una revisión que incluya más muestras de la resistencia al cortante del aglomerado así como del módulo elástico del mismo.

Provisionalmente, y con base en los resultados obtenidos se puede usar un factor de seguridad al estimar la carga máxima que cubra en forma conservadora estas imprecisiones.

Para vigas I que trabajen en forma conjunta, se recomienda un valor de 1,50, para vigas trabajan-

do en forma individual 2,10. Para vigas de tipo cajón trabajando en forma conjunta se recomienda un valor de 1,70. Para vigas cajón que trabajen individualmente 2,30.

Para estimar las deflexiones bajo carga permanente más carga de servicio, se recomienda un factor de magnificación de 2,00 para vigas I y 2,20 para vigas cajón.

La variación en la inclinación del grano en las alas afectó en el rango elastoplástico el sistema de estabilidad lateral en las vigas I.

LITERATURA CONSULTADA

1. American Society for Testing and Materials. **Small Clear Specimens of Timber.** ASTM-D143, Part 22, 1979.
2. Fernández, Carlos. **Estructuras compuestas de madera sólida y contrachapeada.** Tesis de Grado. San José: Universidad de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Civil, 1974.
3. Hoyle, Robert J. Jr. **Wood technology in the design of structures.** Montana: Mountain Press, 1978.
4. Popov, Igor. **Introducción a la mecánica de sólidos.** México: Limusa, 1976.
5. Tuk, Juan B. **Encolado de maderas tropicales.** Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 1979.

APENDICE

A-1 Ejemplo de cálculo

Se expondrá el cálculo de las cargas máximas para cada posible condición de falla para la viga I-1, según se describió en el procedimiento de diseño.

Primer momento de área, unión	$Q_1 = 468,6$
ala alma, superior 1, inferior 2	$Q_2 = 470,3$
Primer momento de área en el eje neutro	$Q_c = 501,2$
Momento de inercia	$I = 12398,8$

Las dimensiones actuales se muestran en la figura 6.

Cálculo del factor C_d :

$$p = 3,57 / 29,2 = 0,12$$

$$q = 0,4 / 10,22 = 0,039$$

$$C_y = (0,12)^2 (6 - 8 \times 0,12 + (0,12)^2)(1 - 0,039) + 0,039$$

$$C_y = 0,1089$$

$$C_d = 0,81 \left[\frac{(29)^2 + 567,7 + 355 \times 0,1089}{(29)^2 + 567,7} \right]$$

Luego:

$$C_d = 0,83$$

El momento flector último será:

$$M_{ut} = \frac{f \times 12598,8}{14,5} \times 0,83$$

El valor de f , sin los factores de seguridad, carga, etc. se obtiene como el valor del 5% de exclusión para el lote de madera, en tensión y en compresión:

$$f_t = (672 - 1,64 \times 63) = 568 \text{ kgs/cm}^2$$

$$f_c = (379 - 1,64 \times 25) = 338 \text{ kgs/cm}^2$$

y M_{ut} viene entonces dado por:

$$M_{ut} = \frac{338 \times 12598,8}{14,5} \times 0,83 = 243756 \text{ K - cm}$$

Por las condiciones de carga de la viga:

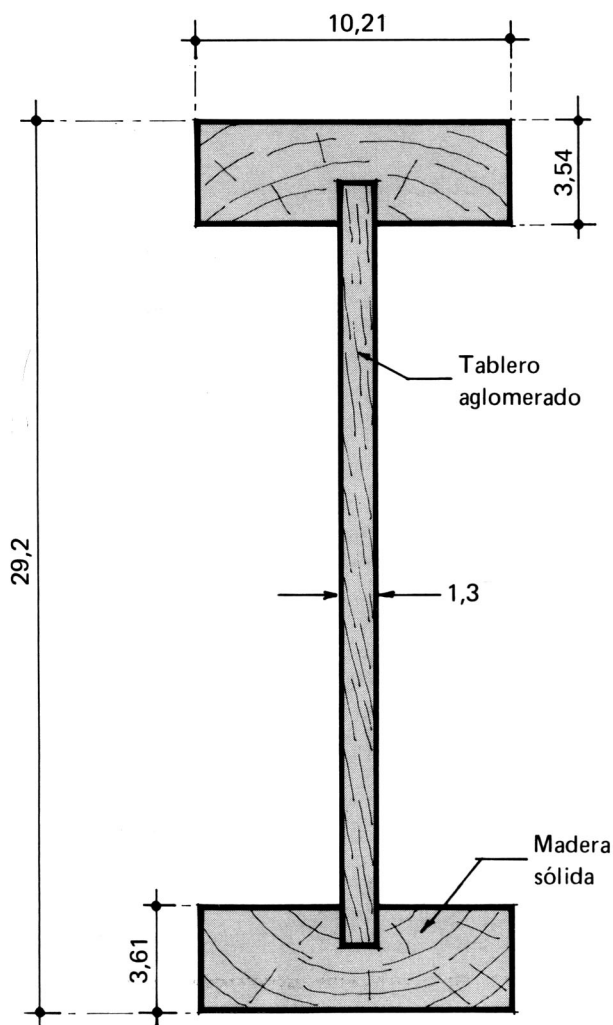
$$P_{ut} = \frac{M_{ut}}{100 \text{ cm}} = 2437 \text{ kgs}$$

Estimación, de la carga que produce la carga por cortante en el espesor del alma. Del cuadro de resistencia de los materiales tenemos:

$$J_{ut} = 139 - 1,64 \times 22 = 103 \text{ kgs/cm}^2$$

Luego, ya que el cortante: $V = P$, el cortante último viene dado por:

$$V_{ut} = \frac{103 \times 12598,8 \times 0,52}{501,2} = 1346 \text{ kgs}$$



ESC. 1:25

FIGURA 6: Dimensiones actuales de viga tipo I.

Carga última debido a falla de la unión ala-alma, la inserción promedio en el ala fue de 1,5 cm.

$$J = 33,6 - 1,64 * 5 = 25,4 \text{ K/cm}^2$$

$$V_{ut} = \frac{25,4 * 12598,8 (2 * 1,5)}{470,3} = 2041$$

El conjunto de posibles cargas últimas que originan la falla de la viga N° 1 es:

$$\{ 2437, 1346, 2041 \}$$

Del conjunto de fallas posibles, la falla última será: 2041 kgs.


La falla máxima para esta viga fue un par de cargas de 649 kgs. Se observó que la causa se debió a una falla temprana del alma.

Estimaciones de las deformaciones

La deflexión al centro del claro, para una carga igual a la mitad del máximo valor experimental, $P = 324.5$ es:

$$\Delta = \frac{324,5 * 100}{24 * 81 * 10^3 * 12598,8} (3 * 270^2 - 4 * 100^2)$$

$$\Delta = 0,237 \text{ cms}$$


AGENCIAS UNIDAS, S. A.

22 AÑOS DE EXPERIENCIA EN LA
DISTRIBUCION DE LAS MEJORES
CALIDADES DE

PAPEL, CARTULINA Y TINTAS
PARA IMPRENTA Y LITOGRAFIA

Central Telefónica

23 76 66


Despacho de Papel

22 99 81

Bodegas

23 34 93

Establecida en 1933
Apartado 10112 - San José, Costa Rica - Télex: 2128


AGENCIAS UNIDAS, S. A.

AGENTES DE VAPORES EN:

PUERTO LIMON
SAN JOSE
PUNTARENAS

JOHNSON / EFFOA
C.N. LLOYD BRASILEIRO
JUGOLINIYA LINE
MITSUI O. S. K. LINES LTD
WESTFAL LARSEN LINE
CIA. TRASATLANTICO ESPANOLA

45 Años de experiencia al servicio de los
Importadores y Exportadores Costarricenses
con servicios directos a los principales puertos
de los 5 continentes

DEPARTAMENTO DE SEGUROS Y RECLAMOS
Agentes de: "The Institute of London Underwriters"

CENTRAL TELEFONICA


23 76 66

 LIMON

58 03 38

 PUNTARENAS

61 00 98



Establecida en 1933
Apartado: 10112
San José, Costa Rica
Télex: 2128