

Capacidad de carga de uniones

con tornillos tirafondo*

Juan Tuk **

RESUMEN

*Se presenta el procedimiento para determinar los esfuerzos de trabajo usando madera de jícaro (*Lecythis costaricensis*) y tres tipos de tornillos tirafondo. Se analizaron dos formas de construcción de las uniones: en verde y falladas en seco (12% contenido de humedad); en seco y falladas en seco. Los resultados muestran que no existe diferencia significativa entre ambos procedimientos de fabricación.*

REVISIÓN DE LITERATURA

En Costa Rica se han realizado varios estudios para determinar valores de diseño de juntas en madera (6), (7) y (8). En estos proyectos se ha determinado fundamentalmente la capacidad máxima de las uniones y luego se ha reducido por un factor que toma en consideración varios efectos. Este factor varía según la fuente de información: el **Uniform Building Code** recomienda un factor de reducción de cuatro sobre la carga última⁽⁶⁾; Ramírez A. utilizó un factor de 3,8 en la derivación de cargas de trabajo. El **Truss Plate Institute**⁽³⁾ recomienda utilizar un factor de 1,8 sobre el límite de proporcionalidad o de cuatro sobre la carga última para placas dentadas. El valor final de diseño será el menor de ambos.

En general, un valor limitante de la capacidad de carga en uniones tiene significado principalmente al considerar los desplazamientos de una estructura. Las deformaciones de uniones apernadas son de tipo elastoplástico principalmente, por ellos, una aproximación al estado elástico es deseable

(*) El autor agradece a los estudiantes del grupo Mecánica de la madera del año 1981 y al señor José María Zúñiga por su colaboración en la confección y ensayo de las probetas.

(**) Director de Investigación del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

para aplicar con un bajo nivel de error los procedimientos normales del análisis estructural. La caracterización de la curva de carga–desplazamiento es importante para la utilización de modelos no lineales (2), (4).

Las normas para realizar ensayos de capacidad de carga de uniones metálicas en madera han sido establecidas por ASTM (1).

Se encuentran trabajos con varios tipos de conectores pero con distinta variedad de especies maderables. Ramírez, A. y Tuk, J. han investigado anillos partidos y pernos (6), (7) y Tuk, J. grapas neumáticamente clavadas (8).

Las maderas investigadas son: Lechoso, (Brosimum utile), Níspero, (manilkara sp.), Tempisque (*Syderoxylum tempisque*) y Pilón (*Hieronyma alchornoides*).

La madera de Jícaro (*Lecythis costaricensis*) ha sido estudiada en cuanto a sus propiedades físicas y mecánicas. A continuación se presentan los valores correspondientes a dichas propiedades ya que aún no han sido publicados.

PROPIEDAD	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Peso específico básico Resistencia última a la compresión paralela verde (kg/cm ²)	394	66,9
Resistencia última a la compresión paralela seco (kg/cm ²)	551	58
Módulo de ruptura, verde (kg/cm ²)	871,7	122
Módulo de ruptura, seco (kg/cm ²)	1847,6	404
Módulo de elasticidad (kg/cm ² × 1 000) verde	204,2	--
Módulo de elasticidad seco (kg/cm ² × 1 000)	236	--
Dureza lateral seco (kg)	628	87,9
Dureza lateral verde (kg)	593	124
Dureza axial seco (kg)	892	139
	767	148

PROCEDIMIENTO

Los ensayos de uniones se realizaron con madera de Jícaro (*Lecythis costaricensis*).

Para determinar la capacidad de carga de uniones apernadas con tornillos tirafondo se montó un diseño experimental de tipo unidireccional bloqueado. El número de repeticiones por unidad experimental fue de 5. Los tratamientos corresponden a los tres diámetros de tornillos bloqueados (Figura N° 1).

Las piezas de madera fueron asignadas aleatoriamente a las unidades experimentales para garantizar la homogeneidad en los grupos.

Los grupos fueron luego divididos en dos bloques:

- uniones realizadas en verde, falladas en seco (12% CH) y
- uniones realizadas en seco y falladas en seco

Los tornillos empleados para ejecutar las uniones son los del tipo denominado tirafondo. Las dimensiones y geometría se muestran en la Figura N° 1.

Una vez realizadas las uniones según la disposición de los elementos unidos, como se observa en la Figura N° 2, se procedió a fallar las muestras en una máquina universal de ensayos para la condición seca.

Las muestras verdes, una vez unidas, eran colocadas en un cuarto con clima controlado para llevarlas a 12% de contenido de humedad. El tiempo que transcurrió entre la fecha de ensamble y la de falla fue de 1,5 meses a 18°C y una humedad relativa de 65%.

Las uniones fueron ejecutadas colocando los tornillos en huecos—guía de 0,8 veces el diámetro del tornillo.

Para medir la capacidad de carga de las uniones se empleó una máquina universal de ensayos. El registro de la carga respecto al desplazamiento

relativo entre las piezas conectadas se realizó colocando un indicador de deformaciones. La Figura N° 3 muestra una unión con carga paralela al grano durante el experimento.

La Figura N° 4 muestra una unión en ensayo con la carga perpendicular al grano.

Se anotaron la carga máxima resistida por la unión y la curva de carga—deformación. Sobre una muestra seleccionada en forma aleatoria se obtuvo el contenido de humedad.

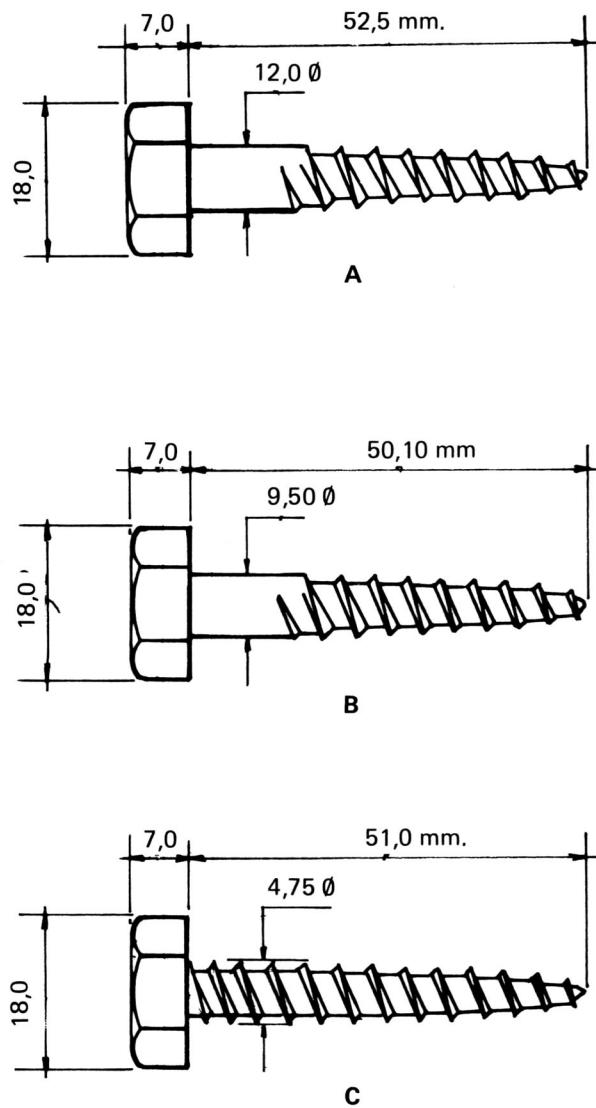


FIGURA N° 1. Dimensiones y geometría de los tornillos usados en uniones ensayadas.

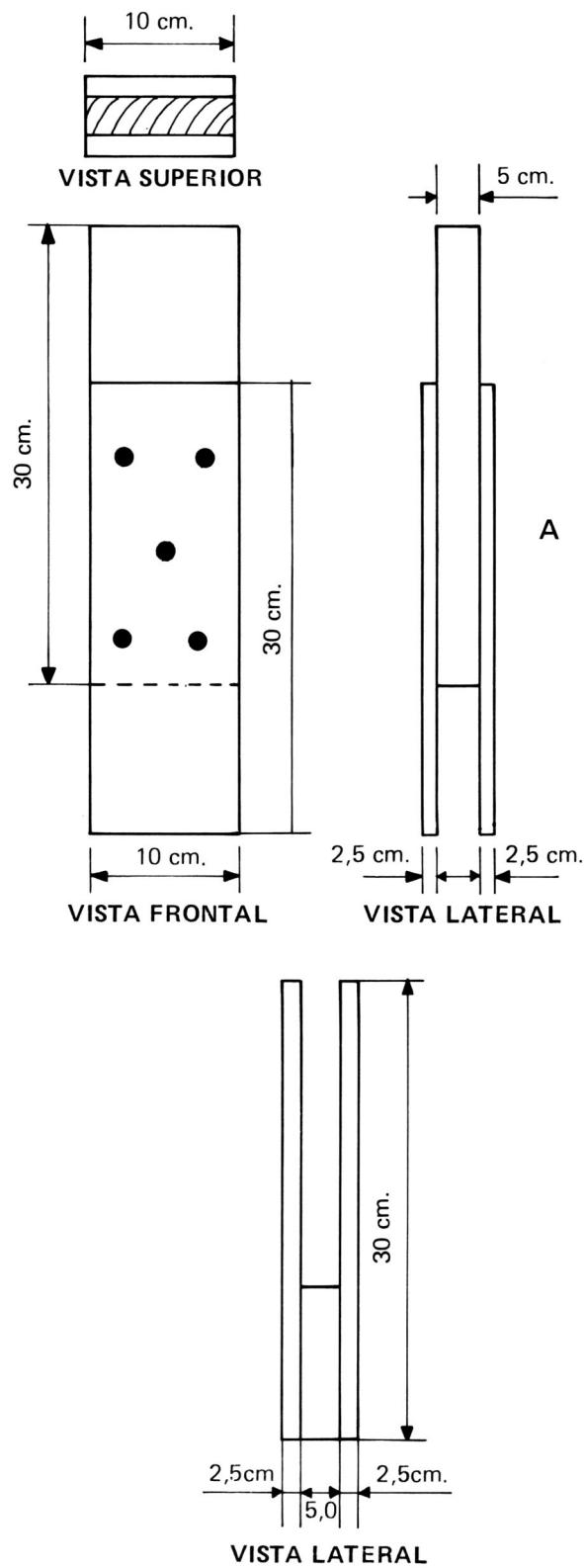


FIGURA N° 2. Disposición de los elementos unidos:
(A) Ángulo de la carga respecto al grano 0,
y (B) Ángulo de la carga respecto al grano 90.

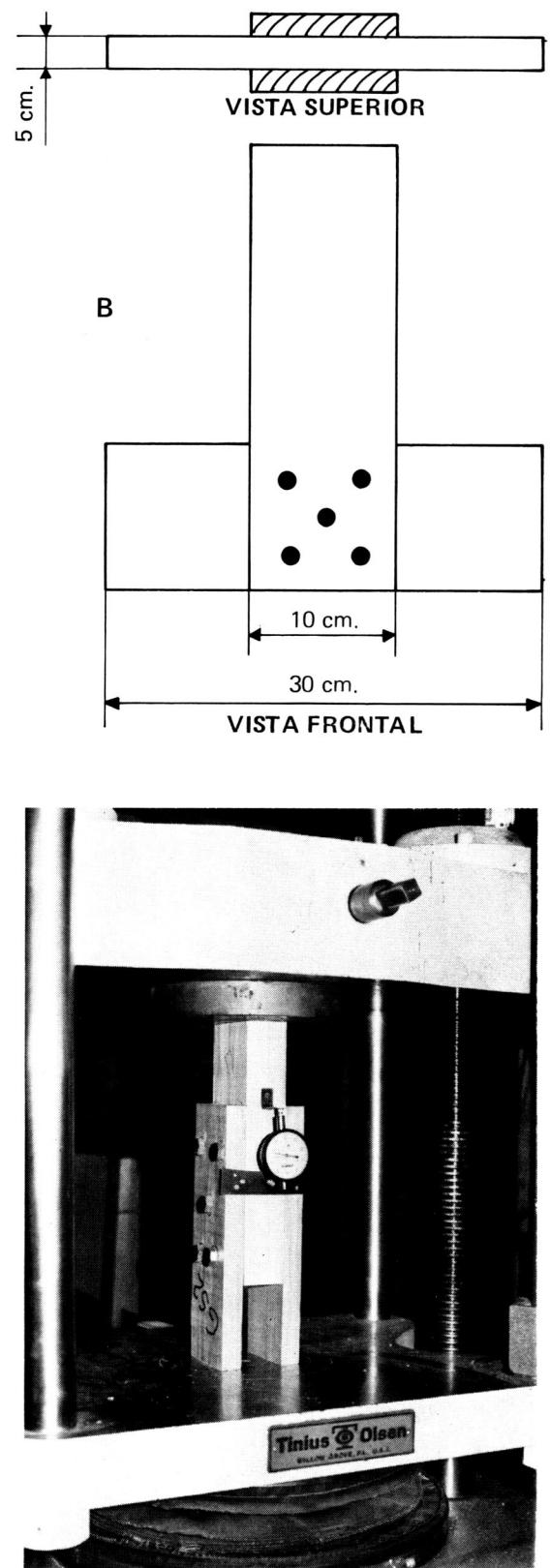


FIGURA N° 3. Ensayo de unión con tornillos actuando paralelamente al grano. Se observa el extensómetro para registro de desplazamientos relativos entre las piezas conectadas.

RESULTADOS

La evaluación de las uniones apernadas se basó en la carga por perno a cualquier nivel y el módulo de desplazamiento.

La carga por perno se calculó con la siguiente ecuación

$$C_i = P_i/M$$

Las variables indicadas se explican en la nomenclatura.

El módulo de desplazamiento por perno a 0,5 milímetros de deformación relativa se obtuvo por:

$$MD_{0,05} = \bar{C}_{0,05}/0,05$$

El resultado de carga última por ensayo se muestra en el Cuadro N° 1. Estos valores corresponden a la condición de cortante simple para direcciones de carga paralela y perpendicular al grano.

CUADRO N° 1. Valores experimentales para carga última de uniones apernadas en madera de Jícaro.

	DIRECCION PARALELA			DIRECCION PERPENDICULAR		
Diámetro del perno mm.	4,75	9,0	12,0	4,75	9,0	12,0
	ENSAMBLADAS EN VERDE					
	387,5	800,0	1 037,5	320,0	715,0	212,5
	395,0	917,5	1 030,0	375,0	777,5	662,5
	420,0	887,5	1 120,0	355,0	717,5	720,0
	175,0	870,0	885,0	307,5	--	625,0
	475,0	985,0	1 065,0	395,0	612,5	655,0
\bar{x}_i	370,5	892,0	1 027,5	350,5	702,0	575,0
	ENSAMBLADAS EN SECO					
	450,0	885,0	827,5	335,0	695,0	665,0
	415,0	832,5	782,5	345,0	685,0	605,0
	430,0	885,0	967,5	345,0	650,0	662,5
	372,0	840,0	887,5	425,0	625,0	730,0
	410,0	805,0	990,0	350,0	730,0	645,0
\bar{x}	415,5	849,5	891,0	360,0	677,0	665,5

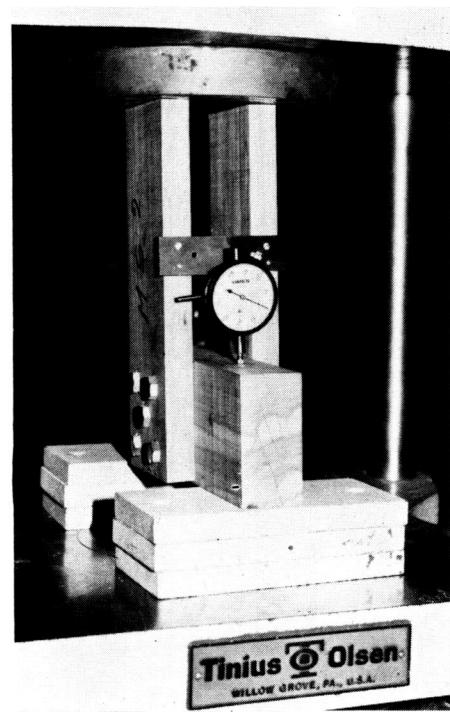


FIGURA N° 4. Ensayo de unión con la dirección de la carga perpendicular al grano. Se muestra la disposición del extensómetro para registrar la deformación relativa entre barras.

Los valores correspondientes a la carga generada a un desplazamiento de 0,5 mm se muestran en el Cuadro N° 2.

En el Cuadro N° 3 se listan los valores de módulo de desplazamiento correspondientes a las

cargas a 0,5 mm. Los valores de MD, se basan en el valor promedio de $C_{0,5}$.

La Figura N° 5 muestra la relación entre el diámetro del tornillo con respecto a la capacidad última y a 0,5 milímetros de desplazamiento.

CUADRO N° 2. Valores experimentales para carga a 0,5 (mm) de deformación de uniones apernadas en madera de Jícaro.

Diámetro del perno mm	DIRECCION PARAPELA			DIRECCION PERPENDICULAR		
	4,75	9,0	12,0	4,75	9,0	12,0
UNION ENSAMBLADA EN VERDE						
	85,0	240,0	392,5	150,0	152,5	192,5
	180,0	272,5	385,0	67,5	105,0	170,0
	202,5	288,0	185,0	125,0	105,0	227,5
	157,5	312,5	330,0	125,0	—	217,5
	257,5	225,0	417,5	85,0	140,0	207,5
\bar{x}	176,5	267,6	342,0	110,5	125,6	202,9
UNION ENSAMBLADA EN SECO						
	157,5	302,5	280,0	125,0	260,0	237,5
	142,5	332,5	285,0	115,0	189,0	330,0
	142,0	442,5	405,0	112,5	205,0	300,0
	—	272,5	375,0	95,0	190,0	302,5
	170,0	340,0	490,0	80,0	177,5	347,5
\bar{x}	153,0	338,0	387,0	105,5	204,3	303,5

CUADRO N° 3. Módulo de desplazamiento por tornillo, con base en valor de carga promedio a 0,5 mm.

CONDICION	DIAMETRO PERNO		
	4,75	9,0	12,0
Dirección paralela ensamble en verde	3530	5352	6840
ensamble en seco	3060	6680	7740
Dirección perpendicular ensamble en verde	2210	2512	4058
ensamble en seco	2110	4086	6070

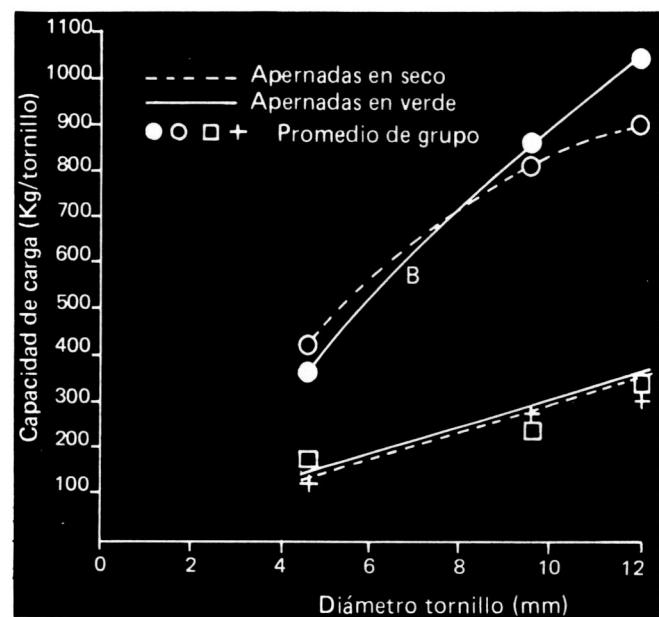


FIGURA N° 5. Relación entre el diámetro del tornillo y la capacidad última (Capacidad de tornillo en madera de Jícaro) (A) a 0,5 mm. de desplazamiento, (B) carga última.

ANALISIS

El análisis se realizó de acuerdo con lo que establece el diseño experimental. La primera hipótesis consiste en aceptar con un nivel de confianza de 5% si dos o más promedios son iguales. Esta hipótesis fue planteada independientemente para cada dirección de carga respecto al grano.

En el Cuadro N° 4 se muestra el resultado de un análisis de varianza efectuado con los datos de carga última en la dirección paralela al grano. El valor de F (2,62) es altamente significativo.

CUADRO N° 4. Análisis de varianza para carga última, dirección paralela.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Tratamientos	5	1912205	382441	65,1**
Error	24	140795	5866	
Total	29	2053001		

Nota: en análisis de varianza, el empleo de ** indica que el dato es significativo.

La comparación entre medidas se hizo por el método de nuevos rangos múltiples de Duncan y el resultado se resume a continuación:

V4	S4	S9	S12	V9	V12
370,5	415,5	849,5	891	892	* 1027,5

Esto es, no existe diferencia significativa entre uniones realizadas en verde y en seco.

Los valores de resistencia entre tornillos de 4,75 mm. de diámetro y diámetros superiores son significativamente diferentes.

El Cuadro N° 5 muestra el resultado del análisis de varianza para las cargas observadas a 0,05 cm. de desplazamiento.

De nuevo, el valor de F tabular es menor que el experimental. El resultado de establecer comparaciones es el siguiente:

S4	V4	V9	S9	V12	S12
153,0	176,0	* 267,6	338,0	342,0	387,0

CUADRO N° 5. Análisis de varianza para carga 0,5 mm. de desplazamiento, dirección paralela.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Tratamientos	5	212053	42410	10,21**
Error	23	95483	4151	
Total	28	307536		

La variación de la capacidad de carga para otros diámetros de tornillos se determinó por interpolación. La ecuación de predicción para el valor C, obtenida por el método de mínimos cuadrados, para la carga paralela en condición de ensamble verde o seco es la siguiente:

$$C_{PL\ 0,05} = 26,86 D + 45,63$$

$$r = 0,792$$

$$n = 29$$

$$C_{PP\ 0,05} = 19,68 D + 8,43$$

$$r = 0,786$$

$$n = 29$$

donde la capacidad C viene dada en kg. y el diámetro en mm.

Las ecuaciones se describen gráficamente en la Figura N° 5, así como los promedios de grupo.

Las ecuaciones de predicción de C; última condición de ortogonalidad entre la carga y el diámetro del perno incluyendo las dos condiciones de ensamble posible se detallan a continuación:

$$C_{PLUT} = 80,40 D + 50,88$$

$$r = 0,914$$

$$n = 30,0$$

*Nota: las líneas colocadas bajo los valores indican que los promedios no son significativamente diferentes.

$$C_{PPUT} = 38,21 D + 220,42$$

$$r = 0,695$$

$$n = 29,0$$

	Aper-nada en Condición	Dirección paralela			Dirección perpendicular		
		4,75	9,0	12,0	4,75	9,0	12,0
Diámetro tornillo (mm)							
Con base en carga última	Verde	98,0	235,0	270,0	92,0	185,0	151,0
	Seca	109,0	223,5	234,0	95,0	178,0	172,5
Con base en carga a 0,5 mm.	Verde	110,0	167,0	214,0	69,0	78,5	127,0
	Seca	96,0	211,0	242,0	66,0	128,0	190,0

CUADRO N°6. Esfuerzos de trabajo para las uniones apernadas de Jícaro según dos criterios.

CONCLUSIONES

Con base en los datos experimentales obtenidos y al análisis de varianza se puede concluir que:

1. No existen diferencias significativas entre los valores de capacidad de carga observados en muestras atornilladas en verde o en seco. Se observa una mayor dispersión de los datos obtenidos en ensambles realizados en verde. Para evitar la variabilidad de la rendija que se genera y las contracciones que sufre la madera durante el período de secado, se encuentra en etapa de experimentación un nuevo grupo de uniones, que serán resocadas antes de someter a prueba la unión, eliminando de esta manera el efecto de la rendija. Esta influencia que señalamos de la rendija sobre la dispersión de los datos ha sido explicada en trabajos realizados por Ricardo Foschi (2). Esperamos que al resocar las uniones aumente la capacidad inicial por efectos de fricción y se reduzca la dispersión de los datos observados a carga única. No es posible anticipar el resultado de la carga a 0,05 cm.
2. Las diferencias entre los valores de carga según los diámetros del tornillo son significativos.

Se observa también una fuerte correlación entre las variables diámetro del tornillo y capacidad de carga a 0,05 cm. y entre diámetro del tornillo y capacidad de carga última, pudiendo utilizarse las ecuaciones de correlación lineal con confianza, tanto en la dirección de la carga paralela al grano como perpendicular al grano.

3. Los esfuerzos de trabajo desarrollados para las uniones de jícaro unidas con tornillo tirafondo para diámetro de 4,75; 9 y 12 mm. se presentan en el Cuadro N° 6, para carga última reducida por un factor de seguridad de 3,8 y con base en las cargas observadas a 0,5 mm., afectados por un factor de 1,8. Se recomienda utilizar el valor menor de ambos análisis, aunque se presentan los valores con el objeto de que el diseñador estime la condición más conveniente según el problema a que se enfrente.

NOMENCLATURA

- C_i = carga unitaria a un nivel cualquiera
 \bar{C}_i = promedio de cargas
 D = diámetro de perno
 M = número de tornillos que transmiten la carga aplicada
 $MD_{0,5}$ = módulo de desplazamiento por perno a 0,05 cm.
 desplazamiento relativo entre placas
 r = coeficiente de explicación

LITERATURA CONSULTADA

1. American Society for Testing and Materials. Metal fasteners in wood. *Annual Book of ASTM Standards*. Part 22, D, 1761-81. Philadelphia: ASTM, 1981.
2. Foschi, Ricardo. "Load-slip characteristics of nails". *Wood Sci* 7 (1): 69–76, 1974.

3. Hoyle, R. Jr. **Wood technology in the design of structures.** Montana: Mountain Press, 1979.
4. Mc Lain, Thomas. **Curvilinear load–ship relations in laterally loaded nailed joints.** Conferencia presentada en la trigésima Reunión Anual de la Forest Products Research Society, Toronto, 1976.
5. Meeks, John. **U.S. and Canadian design methodology, structural engineering automated building components, metal plate.** Wood Truss Conference. Saint Louis Missouri, 1979.
6. Ramírez, Aldo. **Resistencia en uniones de madera con dos especies aptas para la construcción de puentes.** Informe final para graduación. San José: Universidad de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Civil, 1977.
7. Tuk, Juan. **Resistencia en juntas de madera.** San José, Universidad de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Civil, 1975.
8. Tuk, Juan. "Clavado neumático de miembros estructurales livianos con madera de Pilón". **Tecnología en Marcha**, 1 (3): 15–18 Oct–Dic., 1978.

Ciencia y tecnología a su alcance



EDITORIAL TECNOLÓGICA
DE COSTA RICA

impulsando el progreso tecnológico