

Mecánica del Curvado de la

Madera

(Del Agriculture Handbook número 125, U. S. Department of Agriculture.)

El éxito en el curvado de la madera depende de que no se produzcan esfuerzos de tracción que tienden a rajarla. Para ello es necesario regular adecuadamente la presión en las testas de la pieza mediante mordazas en las mismas y bandas adosadas para guiar el curvado. La importancia de estas precauciones se pone de manifiesto analizando las fuerzas que aparecen durante el curvado. La figura 1 representa un palo que se está curvando. Su grosor es «h» y el último punto de contacto con la matriz es O. El curvado se ha realizado totalmente ya a la izquierda de O. La banda de guía, de grosor «f», está firmemente sujeta a la mordaza «m». El palo se apoya a través de una placa en un punto de giro que lleva la mordaza. El esfuerzo de curvado P es perpendicular al palo. Considerando un plano que pase por O y por el centro de curvatura de la matriz, la acción de la parte de banda y de palo a la izquierda de ese plano puede definirse mediante los siguientes parámetros:

T, tensión en la banda que actúa en el centro de su sec-

ción y perpendicularmente al plano citado.

C, suma de tensiones en el palo, que actúa perpendicularmente al plano.

P, esfuerzo de compresión en la testa del palo.

Igualando los momentos internos y externos respecto de la intersección de la línea de acción de C el plano, se tiene

$$P(x + L) = Ta \quad (1)$$

en donde «a» es la distancia entre las líneas de acción de T y de C. Igualando los momentos respecto de O' (intersección del eje de la banda con el plano de la cara exterior de la placa que lleva el palo en la testa) se tiene

$$P'X = P'b \quad (2)$$

en donde «b» es la distancia entre la línea de acción de P' y el eje de la banda.

P se elimina dividiendo (1) por (2), obteniéndose

$$X = \frac{L}{\frac{Ta}{P'b} - 1} \quad (3)$$

P' debe ser igual a la tensión en la banda en el punto O'. La ten-

sión en este punto es igual a T (tensión en O) reducida por el rozamiento entre la banda y la madera. Este depende del coeficiente de rozamiento entre ambos materiales y de la presión de la banda sobre el palo. La presión es función del ángulo bajo el cual se va doblando la madera. Dado que éste suele ser pequeño, el rozamiento también lo es. Por tanto, la tensión en O' es aproximadamente igual a T. Se deduce que P' = T, pudiéndose escribir la ecuación (3) del siguiente modo:

$$\frac{X}{L} = \frac{1}{\frac{a}{b} - 1} = \frac{b}{a - b} \quad (4)$$

En la parte convexa de la pieza debe haber pocos esfuerzos. En cambio el acortamiento máximo se producirá en la cara situada junto la matriz.

En la fig. 1 se ve el triángulo de tensiones en el punto O. Si las tensiones fueran proporcionales a las deformaciones, su resultante C actuaría a una distancia igual a dos tercios de h a partir de la cara interior de la banda. Sin embargo, dado que la madera se deforma más allá del límite elástico, las tensiones no son proporcionales a las deformaciones, por lo que C actuará a una distancia algo menor. Será, no obstante, mayor que la mitad de «h», ya que si no fuera así, no habría curvado. Si fuese menor que la mitad de «h», la deformación sería en sentido contrario. El peligro de aplastamiento en la testa del palo será menor si P' se aplica en su punto medio. Es decir, si se cumple que:

$$b = \frac{h}{2} + \frac{f}{2}$$

La ecuación (4) indica que

$$\frac{X}{L}$$

será mínimo cuando «a» sea má-

ximo. Admitiendo que la distancia de C a la cara interior de la banda no pasa de dos tercios de «h»,

$$a = \frac{2h}{3} + \frac{f}{2}$$

Sustituyendo en (4) resulta

$$\frac{X}{L} = 3 + 3 \frac{t}{h} \quad (5)$$

Esta ecuación indica que para mantener aproximadamente la tensión adecuada en la testa, X debe ser al menos tres veces mayor que L.

X no puede mantenerse constante, pero debe disminuir a la vez que L. A esta misma conclusión se llega considerando en el análisis el efecto del rozamiento. Sin embargo, X puede mantenerse constante haciendo variar «b» durante el curvado. La fuerza P no está sujeta a variación, porque, fijando la X, el valor de P en cualquier fase de la operación está determinado por el momento necesario para doblar la madera en el punto de contacto con la matriz.

Con el dispositivo indicado en la fig. 2 se evita que la madera se raje, forzando a que toda la sección de la madera se deforme por compresión, usando una banda-guía metálica bastante gruesa, unos fuertes bloques sobre las testas y unas palancas para doblar. Suponiendo que la curva de tensiones en la madera es una recta, que la banda metálica no se desliza sobre la madera y que el bloque de testa está en buen contacto con el palo al empezar el curvado, la posición de la línea neutra se obtiene mediante la fórmula

$$C = \frac{f^2 E_s + 2ht E_w + h^2 E_w}{2t E_s + 2hE_w} \quad (6)$$

Siendo

C: distancia de la línea neutra a la cara exterior de la banda

f: grosor de la banda

h: grosor del palo

E_w : módulo de elasticidad de la madera vaporizada

E_s : módulo de elasticidad de la banda

El esfuerzo de tracción máximo en la madera es:

$$\frac{h^2 E_w - f^2 2 E_s E_w}{2 (h E_w + t E_s r)} \quad (7)$$

Siendo r el radio del molde. Si no hay esfuerzos de tracción en la madera, se verificará la siguiente relación:

$$f = h \sqrt{\frac{E_w}{E_s}} \quad (8)$$

Este es el caso indicado en la figura 2.

Los esfuerzos de tracción en la banda y su grosor serán menores que los obtenidos por la fórmula (8), ya que la curva de tensiones en la madera no es una recta, como se ha supuesto. Por eso el valor de «C» es demasiado grande.

Cuando se emplea un bloque de testa con palanca, la fuerza requerida para curvar el palo puede aplicarse en cualquier punto situado delante del de tangencia de la madera con la matriz. La presión total aplicada en la testa del palo a través de la placa es igual a la suma algebraica de las tensiones que aparecen en toda la sección del mismo. Por otra parte, es también igual a la tensión en la banda metálica. Prescindiendo del grosor de ésta, la fuerza de curvado será:

$$P = \frac{C \cdot a}{S} \quad (9)$$

Siendo

P: fuerza de curvado

S: distancia desde el punto de aplicación de P hasta el de tangencia del palo con la matriz.

C: esfuerzo total de compresión

a: dos tercios del grosor del palo

Se realizaron experiencias

con piezas de roble blanco de 1×2 pulgadas ($25,4 \times 50,8$ milímetros) vaporizadas a la presión atmosférica durante 20 minutos hasta alcanzar el 30 por 100 de humedad. Se curvaron en un ángulo de 180° con un radio de 2,25 pulgadas (57,15 milímetros).

En uno de los bloques de testa se montó un dinamómetro hidráulico para medir la presión total desarrollada. La presión aumentó desde cero al principio hasta un máximo cuando el curvado iba por la mitad. A partir de este momento la presión se mantuvo prácticamente constante. La presión media máxima para varios cientos de piezas fue de 2.200 libras 1.546 g/cm^2 ó 1.100 libras por pulgada cuadrada (773 g/cm^2). En la mitad del curvado la distancia desde el punto de sujeción de la pieza y el de tangencia con la matriz era de 17 pulgadas (431,8 mm.). Usando la ecuación (9) la fuerza de curvado, aplicada perpendicularmente a la pieza, se calculó como sigue:

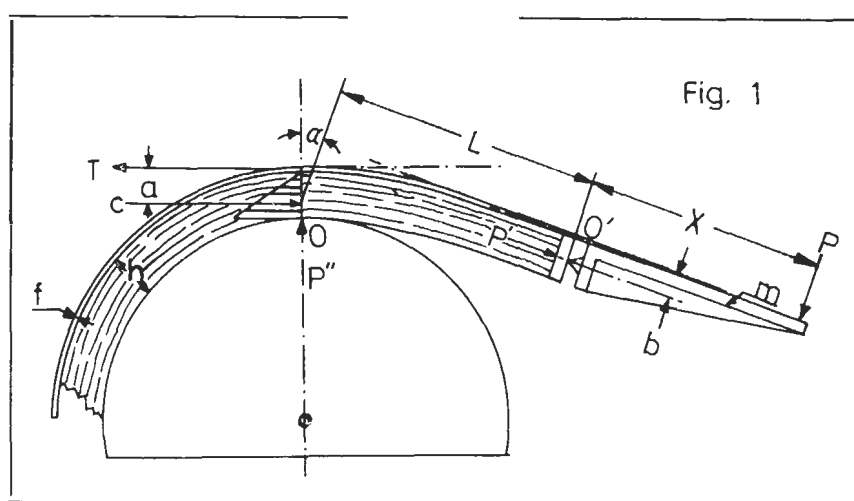
$$P = \frac{2.200 \times 0,67}{17} = 86,7 \text{ lb.} \quad (39 \text{ Kg.})$$

Dado que la presión permanece constante después de la mitad del curvado, el esfuerzo debe incrementarse para que la operación avance, porque la distancia desde el punto de sujeción hasta el de tangencia disminuye.

La presión total en la testa puede calcularse mediante la siguiente fórmula si se conoce la relación entre los esfuerzos de tracción y de compresión para la madera vaporizada,

$$P = B R \int \frac{r+h}{R} - 1 \quad f(e) \text{ de} \quad \frac{r}{R} - 1 \quad (10)$$

siendo
P: presión total

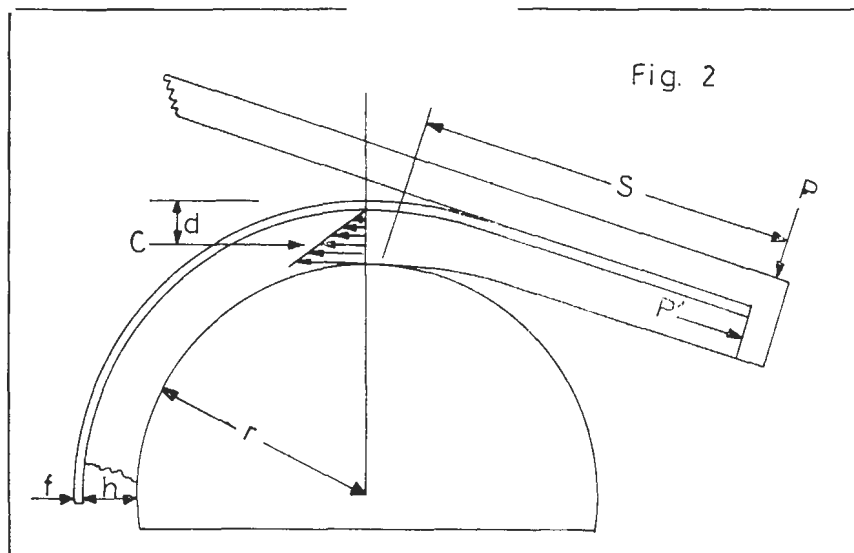


- B: anchura de la pieza
- R: radio de la línea neutra en la pieza curvada
- f(e): función que relaciona tracción y compresión
- e: tracción
- r: radio de la matriz
- h: grosor de la pieza

Si se conoce el esfuerzo de rotura por compresión de la madera plastificada (por vaporizado), no es necesario calcular la presión total mediante la ecuación (10). Los valores de compresibilidad axial pueden ser índices de la calidad del curvado de una madera. Mediante estos valores se puede obtener el radio de curvatura que puede alcanzarse con cada especie de

madera, plastificándola convenientemente. La probabilidad de éxito en esta operación será del 50 por 100.

En el Laboratorio de Productos Forestales se realizaron ensayos de compresibilidad axial con probetas de 2×2 y 2×3 pulgadas ($50,8 \times 50,8$ y $50,8 \times 76,2$ mm.) vaporizadas a la presión atmosférica durante 40 minutos hasta alcanzar una humedad del 30 al 40 por 100. Las probetas se colocaron entre los platos de una prensa hidráulica, comprimiéndolas hasta que se rompieron. La tensión de compresión se midió mediante un dinamómetro colocado en el centro de las probetas. De acuerdo



con este ensayo se obtuvieron los siguientes valores:

Especiales	Compre- sibilidad axial me- dia (pul- gada/pul- gada)
Roble rojo americano (Wisconsin)	0,354
Abedul americano	0,287
Roble blanco america- no (overcup)	0,258
Olmo corcho	0,251
Roble blanco america- no (white, Ohio y Kentucky)	0,250
Roble blanco america- no (white, Wiscon- sin)	0,246
Abedul amarillo	0,246
Liquidámbar	0,172
Sauce negro	0,101
Eucalipto (Chile)	0,071
Coigüe (Chile)	0,057
Picea de Sitka	0,015

Esta tabla indica que la madera de especies con valores iguales o mayores que el del roble blanco de Wisconsin son adecuados para obtener curvaturas muy cerradas. El liquidámbar y el sauce negro resisten un curvado moderado y el eucalipto y el coigüe deformaciones ligeras. La picea de Sitka no es apta para el curvado.

Los valores medios de compresibilidad axial se pueden usar en la siguiente fórmula para estimar el radio mínimo que se puede alcanzar sin riesgo de rotura en un 50 por 100 de las piezas

$$r = \frac{h (1 - e_c)}{e_t + e_c} \quad (11)$$

en donde

r: radio de la matriz

h: grosor de la pieza

e_c : tensión de compresión antes de la rotura

e_t : tensión de tracción asociada con e_c .

Con un sistema adecuado de mordazas y bloques de testa, e_t puede considerarse nula.