

# CONVERSION DE DENSIDADES DE LA MADERA

Aldo Cisternas P. (\*)

## RESUMEN

*El peso de la madera por unidad de volumen, es decir la densidad de ésta, es afectado por el contenido de humedad y este varía entre más de 100% en madera recién cortada y 0% al estado anhidro. Esta situación conduce a que existan diversas formas de determinar la densidad de este material según el objeto de esta determinación. Para los efectos de un flete, por ejemplo, interesaría el peso por unidad de volumen al contenido de humedad del momento. En el caso de la madera en servicio, en tanto, será de importancia el peso por unidad de volumen a la humedad de equilibrio con el ambiente.*

*En el presente trabajo se derivan relaciones entre diferentes formas de expresar la densidad de la madera, se las comprueba experimentalmente y se las compara con los resultados obtenidos aplicando la norma NCH 176/2 Of86 y con los que entrega la relación basada en la densidad del agua higroscópica.*

## ABSTRACT

*The weight of wood per unit of volume, that is, its density, is affected by de content of humidity, and this varies in more than 100% in wood just and 0% in oven-dry state. This situation implies that there are two different ways to assess the density of this material according to the objective of this determination. In the case of a freight, it is important to determinate the weight per unit of volume of the amount of humidity in the moment. In the case of the wood in service it is important to determinate the weight per unit of volume at the equilibrium moisture content.*

*In the present study there are convincing relations between different forms to express the density of the wood with the ones compared experimentally, and they are compared with the results obtained applying the norm NCH 176/2 Of86, and with the ones which give the relation based on the density of the hygroscopy water*

---

(\*) Ingeniero Forestal. Departamento Tecnología de la Madera, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales Universidad de Chile. Casilla 9206 Santiago, Chile.

## INTRODUCCION

La densidad básica, una de las propiedades físicas más importantes de la madera, expresa la cantidad de sustancia leñosa seca presente en un volumen dado de madera, cuando esta se encuentra a un contenido de humedad igual o mayor al punto de saturación de las fibras (psf). Prácticamente todas las propiedades mecánicas están relacionadas con esta variable, por lo que es utilizada como predictora de la resistencia del material. Otras definiciones de densidad, asociadas con diferentes contenidos de humedad son utilizadas en situaciones particulares. Resulta por lo tanto de utilidad poder convertir un valor de densidad obtenido bajo una definición en otro equivalente bajo otra definición.

Las conversiones entre densidades se hacen actualmente a base de un desarrollo teórico-práctico realizado principalmente en Estados Unidos, basadas en el cambio de densidad que experimenta el agua higroscópica de la madera cuando esta se seca y en las relaciones entregadas por la norma chilena NCh 176/2, que se fundamentan en el concepto de hinchamiento, pero utilizan coeficientes de contracción volumétricos, lo que es contradictorio.

## OBJETIVOS

El propósito de este trabajo es derivar relaciones útiles entre diferentes expresiones de la densidad de la madera, basadas en el concepto de contracción volumétrica; comprobar experimentalmente las relaciones encontradas y comparar los resultados con los obtenidos aplicando la norma NCh 176/2 Of86 y con los que entrega la relación basada en la densidad del agua higroscópica.

## METODOLOGIA

### Definiciones de Densidad

Las definiciones para la densidad usadas normalmente se expresan en  $\text{Kg/m}^3$  y son las siguientes:

**Densidad Básica (Db):** Es la definición más usada y representa el peso seco de la sustancia madera encerrado en un volumen invariante, como es el volumen existente cuando las paredes celulares están saturadas de agua. Para la mayoría de las especies las paredes se encuentran saturadas cuando el contenido de humedad ( CH ) está en torno al 30%. El utilizar un volumen invariante permite hacer comparaciones de propiedades mecánicas sobre la base de una definición común de densidad.

$$Db = \text{Peso Seco} / \text{Volumen Verde}$$

**Densidad Nominal (Do,x):** Es la densidad medida en una condición distinta a la de condición verde. No es posible medir la densidad básica directamente sobre madera secada a un CH menor al punto de saturación de las fibras (psf), debido a que no se puede medir el volumen verde. La densidad nominal siempre debe estar asociada al CH al cual se obtuvo.

$$Do,x = \text{Peso Seco} / \text{Volumen a CH} = x \%$$

**Densidad de Ensayo (Dx,x):** Es la densidad de la madera al momento del ensayo o uso. Esta es la densidad que deben usar los ingenieros, arquitectos, constructores etc., en la estimación de las cargas para diseño, y debe tener asignado un CH.

$$Dx,x = \text{Peso a CH} = x \% / \text{Volumen a CH} = x \%$$

**Densidad Anhidra (Do,o):** Relaciona peso y volumen sin humedad. Esta densidad también se utiliza para determinar efectos sobre propiedades mecánicas, ya que el peso seco también es invariante. Se utiliza principalmente en investigación.

$$Do,o = \text{Peso Anhidro} / \text{Volumen Anhidro}$$

**Densidad Verde (Dy,y):** Es la densidad de la madera cuando por ejemplo, ha sido recién volteado un árbol. No puede ser predecida a partir de otras densidades debido a que en el peso está incluido un componente variable de agua libre.

$$Dy,y = \text{Peso verde a CH} = y \% / \text{Volumen verde a CH} = y \%$$

**Densidad Seca al Aire (Dz,z):** Es la densidad a un contenido de humedad en equilibrio con una atmósfera estándar de 20 ° C y una humedad relativa de 65%. Esta atmósfera da un contenido de humedad de equilibrio para la madera de 12%. Debido a esta razón también se conoce a esta densidad como densidad al 12% de CH..

$$Dz,z = \text{Peso a CH} = 12 \% / \text{Volumen a CH} = 12 \%$$

## Derivación de las Conversiones de Densidad

La conversión de las distintas expresiones de densidad está basada en la variación volumétrica que experimenta la madera cuando se seca bajo el psf. El valor de la contracción volumétrica total permite calcular el volumen de madera a cualquier CH, siendo esto la base de la metodología propuesta.

La madera recién cortada tiene un CH aproximado de 100 a 120%. Si un trozo de madera recién cortado pierde humedad, respecto de su volumen no pasa nada al comienzo, ni en las etapas posteriores hasta alcanzar el CH en el cual las paredes celulares están aún saturadas de agua (aprox. 30%, según la especie). A partir de este CH, si la madera continúa perdiendo humedad, se va a manifestar una disminución de sus dimensiones, fenómeno que se conoce como contracción. Este fenómeno dura hasta llegar a la condición anhidra, condición en la que se alcanza la mayor contracción respecto del volumen verde.

Para determinar la contracción volumétrica se utiliza la conocida relación:

$$CTV = 100 * \frac{(V.v - V.o)}{V.v}$$

CTV = Contracción total volumétrica (%)

V.v = Volumen verde (cm<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>)

V.o = Volumen anhidro (cm<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>)

El desarrollo de la contracción volumétrica es aproximadamente lineal desde el psf hasta la condición anhidra. Esto se puede representar en la Figura N° 1.

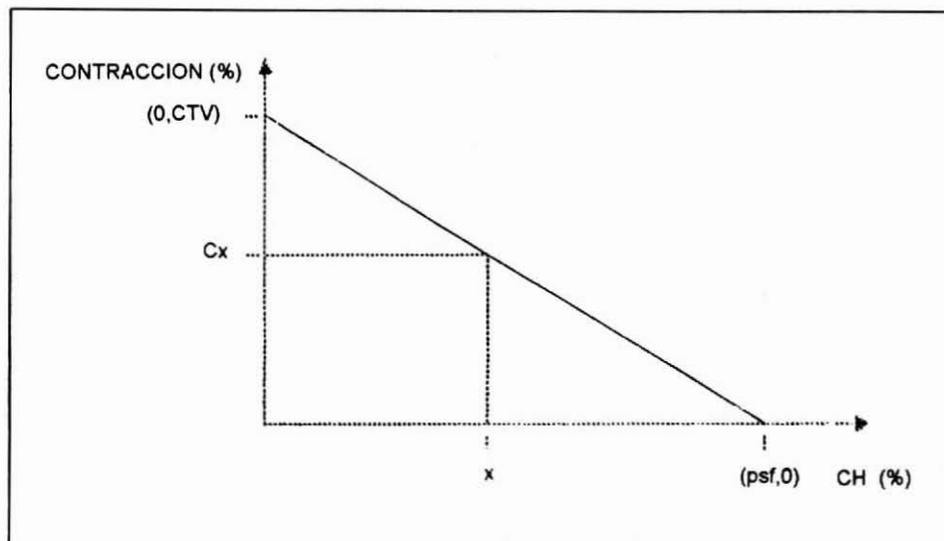


Figura N° 1. DESARROLLO DE LA CONTRACCION VOLUMETRICA

Para obtener la contracción a un  $CH = x$ , se hace uso de la razón de triángulos, la que se expresa como:

$$CTV / psf = Cx / (psf - x)$$

Haciendo  $CTV/psf = k$  y despejando  $Cx$  se tiene:

$$Cx = k \cdot (psf - x)$$

Donde:

$Cx$  = Contracción hasta un  $CH = x$  %. ( % )

$psf$  = Contenido de humedad al punto de saturación de las fibras (30% aprox.). ( % )

$x$  = Contenido de humedad. ( % )

$k$  = Coeficiente de contracción volumétrica. Expresa la contracción lineal para una variación unitaria del contenido de humedad (pendiente de la recta).

Se puede también expresar  $C_x$  bajo la definición clásica, esto es:

$$C_x = 100 * \frac{(V.v - V.x)}{V.v}$$

En la cual, si se reemplaza  $C_x$  por la relación encontrada anteriormente, se tiene:

$$k*(psf - x) = 100*(V.v - V.x) / V.v$$

En esta se despeja  $V.x$  y se tiene:

$$V.x = V.v * [ 1 - k * (psf - x)/100 ]$$

Donde:

$V.x$  = Volumen a CH =  $x$  (  $m^3$ ,  $cm^3$  )

$V.v$  = Volumen verde CH = psf o mayor (  $m^3$ ,  $cm^3$  )

$k$  = Coeficiente de contracción volumétrica.

$x$  = Contenido de humedad actual ( % )

psf = CH = psf ( % )

Esta última relación permite obtener el volumen a cualquier CH bajo el psf, lo que posibilita relacionar las expresiones de densidad entre sí, a partir de un valor de densidad cualquiera.

- Obtener  $D_{o,x}$  a partir de  $D_{x,x}$

$$D_{x,x} = P_x / V_x \quad y \quad D_{o,x} = P_o / V_x$$

El contenido de humedad de la madera se expresa como:

$$x = 100 * \frac{(P_x - P_o)}{P_o}$$

Por lo tanto  $P_x = P_o * (1 + x/100)$ . De esta manera:

$$D_{x,x} = P_o * (1 + x/100) / V_x$$

$$D_{x,x} = D_{o,x} * (1 + x/100)$$

$$D_{o,x} = D_{x,x} / (1 + x/100)$$

- Obtener  $D_b$  a partir de  $D_{x,x}$

$$D_b = P_o / V_v \quad \text{y} \quad D_{o,x} = P_o / V_x, \text{ pero}$$

$$V_x = V_v * [1 - k * (psf - x)/100], \text{ por lo tanto}$$

$$D_{o,x} = P_o / \{ V_v * [1 - k * (psf - x)/100] \}$$

$$D_{o,x} = D_b / [1 - k * (psf - x)/100]$$

$$D_{x,x} / (1 + x/100) = D_b / [1 - k * (psf - x)/100]$$

$$D_b = D_{x,x} * [1 - k * (psf - x)/100] / (1 + x/100)$$

- Obtener  $D_{o,o}$  a partir de  $D_{x,x}$

$$D_{o,o} = P_o / V_o \quad \text{y} \quad D_{o,x} = P_o / V_x$$

$$V_o = V_x * [1 - k * (x - 0)/100]$$

$$D_{o,o} = P_o / [V_x * (1 - k * x / 100)]$$

$$D_{o,o} = D_{o,x} / (1 - k * x / 100)$$

$$D_{o,o} = D_{x,x} / [(1 - k * x / 100) * (1 + x/100)]$$

- Obtener  $D_{o,o}$  a partir de  $D_b$

$$D_{o,o} = P_o / V_o \quad \text{y} \quad D_b = P_o / V_v$$

$$V_o = V_v * [1 - k * (psf - 0)/100]$$

$$D_{o,0} = P_o / [ V_v * ( 1 - k * p_{sf} / 100 ) ]$$

$$D_{o,0} = D_b / ( 1 - k * p_{sf} / 100 )$$

Todas estas fórmulas se pueden usar para relacionar densidades. Sin embargo, si se analiza la recta de contracción volumétrica se puede obtener una sola relación que sirva para cualquier transformación de densidad en todo el rango higroscópico, incluyendo los extremos (0 y p<sub>sf</sub>).

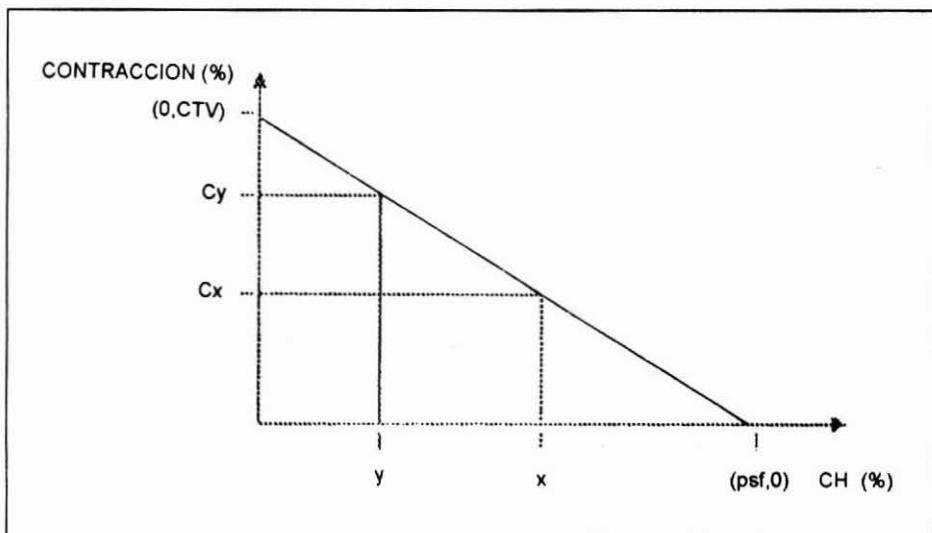


Figura N° 2. CONVERSION DE DENSIDADES PARA CUALQUIER CH

Si se consideran dos CH  $x$  e  $y$  ( $x \geq y$ ) y se sigue el mismo razonamiento antes delineado, se tiene:

$$D_{o,x} = P_o / V_x \quad D_{o,y} = P_o / V_y$$

$$V_y = V_x * [ 1 - k * (x/100 - y/100) ]$$

$$D_{o,y} = P_o / \{ V_x * [ 1 - k * (x/100 - y/100) ] \}$$

$$D_{o,y} = \frac{D_{o,x}}{[1 - k * (x / 100 - y / 100)]}$$

En esta última relación los puntos extremos están considerados, es decir se puede calcular  $D_{o,0}$  a partir de  $D_b$  ya que esta última corresponde a  $D_{o,psf}$ , la cual es invariante a partir de este CH.

## Diseño Experimental

Para determinar el comportamiento de esta última relación entre densidades, junto con las entregadas por la NCh 176/2 Of86 y las basadas en la densidad del agua higroscópica, se contó con una muestra de 300 piezas de madera de pino (*Pinus radiata*) de 2 x 8" y 4 metros de largo.

De cada pieza se extrajeron cuatro probetas de 1 x 1" y 41 cm de largo (probeta de flexión estática, método secundario-ASTM), a las cuales se les determinó su densidad (verde y seco). En las dos probetas en verde se determinó la  $D_b$  real, y a aquellas en estado seco se les determinó la densidad al CH de ensayo  $D_{x,x}$ .

Las 600 probetas destinadas a determinar la  $D_b$  real fueron sumergidas en agua durante 2 meses. Las otras 600 probetas fueron acondicionadas a una  $t^\circ$  de 20 °C y una HR de 60%, lo que corresponde a un CH de equilibrio para la madera de un 12% + - 1%.

El volumen de las 1200 probetas se determinó usando pie de metro de 0,02 mm de precisión, con tres mediciones para cada sentido transversal (tangencial y radial) y una para el longitudinal.

Las probetas acondicionadas fueron pesadas con balanza de 0,01 g de precisión y las probetas saturadas se colocaron en estufa para determinar peso seco.

## RESULTADOS

Para la muestra considerada se encontró que la Db estimada en base a la contracción volumétrica fue exactamente igual a la Db real encontrada. La Db estimada en base a la norma chilena NCh 176/2 Of86, resultó un 0.98 % superior a la Db real, y la Db estimada en base a la densidad del agua higroscópica, un 1.7% superior a la Db real. Estas diferencias en términos prácticos son nulas.

Esta concordancia entre los valores reales y estimados indica que es posible utilizar transformaciones de densidad para distintas situaciones, siempre que la contracción de la especie esté bien estudiada. Si esto no se cumple se recurre al desarrollo basado en la densidad del agua higroscópica.

Cuadro N° 1

## DENSIDAD BASICA REAL Y ESTIMADA PARA PINO RADIATA(N=593)

DENSIDAD BASICA	PROMEDIO (Kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)
Db real	409	11
Db estimada en base a contracción volumétrica	409	11
Db estimada en base a la densidad del agua higroscópica	416	10
Db estimada en base a la norma chilena NCh 176/2 Of86	413	11

-CH. promedio de las probetas acondicionadas	=	12.8 %
-Coeficiente de variación para CH. de las probetas acondicionadas	=	7.7 %
-psf Pino radiata (NCh 176/2 Of86)	=	28.0 %
-k Pino radiata (NCh 176/2 Of86)	=	0.49
-Densidad promedio a CH = 12.8%	=	499 Kg/m <sup>3</sup>

La relación entre la Db y la contracción volumétrica podría incluirse en las fórmulas, lo que les daría mayor exactitud para muestras pequeñas. Como la contracción volumétrica aumenta con el aumento de la densidad de la madera, esta relación, al ser incluida en forma de modelo lineal simple  $CTV = a + b \cdot Db$ , podría representar mejor el comportamiento de algunas muestras cuya densidad esté muy alejada del promedio.

El comportamiento de las relaciones determinadas no se pudo probar sobre madera aserrada en escuadría real, pero los datos bibliográficos (Collins, M.J., 1983) indican un comportamiento similar al de probetas pequeñas.

## CONCLUSIONES

La estimación de densidades usando fórmulas de transformación se muestra satisfactoria, por lo menos para la estimación de la densidad básica en pino radiata usando otra densidad dada en el rango higroscópico.

La estimación de la densidad básica resulta exacta utilizando las fórmulas de transformación basadas en la contracción dadas en este trabajo. La utilización de las fórmulas de la norma chilena Nch 176/2, las cuales están basadas en el hinchamiento, pero utilizando el coeficiente de contracción volumétrica (lo que es contradictorio), da estimaciones adecuadas y en la práctica no hay diferencias. Lo mismo es válido para la fórmula desarrollada en base a la densidad del agua higroscópica.

Es recomendable el estudio de la relación entre la densidad básica y la contracción. Esto sería útil para permitir estimaciones en muestras muy pequeñas y cuyos valores de densidad estén muy alejados del promedio para la especie.

## BIBLIOGRAFIA

Collins, M.J., 1983. Density Conversions for Radiata Pine. Fri Bulletin N° 49. Forest Research Institute. New Zealand Forest Service. Private Bag. Rotorua. New Zealand.

Instituto Forestal, 1990.. Calculo de Construcciones en Madera. Manual N° 13 Vol. 1.

Instituto Nacional de Normalizacion, 1984. NCh 176/1. Of 84. Madera - Parte 1: Determinacion de la Humedad.

**Instituto Nacional de Normalizacion, 1988.** NCh 176/2 Of 86 Mod. 88 Madera - Parte 2: Determinacion de la Densidad.

**Instituto Nacional de Normalizacion, 1984.** NCh 176/3 Of 84. Madera - Parte 3: Determinacion de la Contraccion Radial y Tangencial.

## ANEXO

## RELACIONES DE CONVERSION SEGUN NCh 176/2. Of86

Se basa en las siguientes fórmulas:

$$1. \quad D_{y,y} = D_{o,o} * (100 + y) / (100 + k*y) \quad y \leq \text{psf}$$

$$2. \quad D_{u,u} = D_b * (100 + u) / 100 \quad u \geq \text{psf}$$

Para encontrar  $D_b$  en función de  $D_{y,y}$ :

1º: Obtener  $D_{o,o}$  de la fórmula 1.

2º: Obtener  $D_{\text{psf,psf}}$  usando  $D_{o,o}$  en la fórmula 1.

3º: Despejar  $D_b$  en la fórmula 2.

## RELACIONES DE CONVERSION SEGUN LA DENSIDAD DEL AGUA HIGROSCOPICA

Se basa en las siguientes fórmulas:

$$1. \quad RO.H_2O.hig = 1.296,8 - 11,1*CH + 0,168*CH^2$$

$$RO.H_2O.hig = \text{Densidad del agua higroscópica a } ch=CH \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

$$CH = \text{Contenido de humedad (\%)}$$

$$2. \quad D_{o,y} = \frac{D_{o,x}}{\left\{1 - D_{o,x} \cdot \left[ \frac{x}{100 \cdot RO.x} - \frac{y}{100 \cdot RO.y} \right] \right\}}$$

$$y \leq x \leq psf$$

La densidad básica es  $D_{o,x}$  cuando  $x = psf$ . Por lo tanto:

$$D_b = \frac{100 \cdot D_{y,y}}{(100 + y) \cdot \left[ 1 + \frac{D_{y,y}}{(100 + y)} \cdot (psf / RO.psf - y / RO.y) \right]}$$

## RELACION DE CONVERSION SEGUN CONTRACCION

Se basa en la fórmula derivada en el texto principal de este trabajo:

$$D_{o,y} = \frac{D_{o,x}}{\left[ 1 - k \cdot \left( \frac{x}{100} - \frac{y}{100} \right) \right]} \quad y \geq x \geq psf$$

Como  $D_b = D_{o,x}$  con  $x = psf$ :

$$D_b = \frac{D_{y,y}}{(100 + y)} \cdot [100 - k \cdot (psf - y)]$$

$y$  = ch de ensayo (%)  $\leq psf$

$u$  = ch de ensayo (%)  $\geq psf$

$psf$  = 28%

---

k	=	0,49 (Coeficiente de contracción volumétrica-pino radiata)
Dy,y	=	Densidad de ensayo (Kg/m <sup>3</sup> )
Db	=	Densidad básica (Kg/m <sup>3</sup> )
RO.psf	=	Densidad del agua ligada al psf (Kg/m <sup>3</sup> )
RO.x	=	Densidad del agua ligada a ch=x(%) (Kg/m <sup>3</sup> )
RO.y	=	Densidad del agua ligada a ch=y(%) (Kg/m <sup>3</sup> )