

Análisis teórico de las variables que influyen en la impregnación con preservantes hidrosolubles de tablas de dimensiones comerciales

Theoretical analysis of the variables influencing impregnation waterborne preservatives of tables of commercial sizes

Wottiz C. A.¹

Recibido en septiembre de 2006; aceptado en octubre de 2009

RESUMEN

La impregnación de la madera con diferentes productos es especialmente importante en los tratamientos de preservación. La masa de las sustancias preservantes activas retenidas y el tiempo que dura el proceso depende de: las condiciones del tratamiento, la forma, dimensiones, la densidad, permeabilidad de la madera a tratar y de la viscosidad de las soluciones preservantes.

El objetivo de este trabajo es analizar teóricamente la influencia de las propiedades de la madera, las condiciones del proceso y concentración de la solución preservante en la impregnación con preservantes hidrosolubles de tablas de dimensiones comerciales.

La estimación del tiempo necesario para lograr la máxima penetración de la solución preservante dentro de la madera es más realista si se asumen que los gases internos de la madera no se disuelven en la solución. El tiempo total para que la solución preservante penetre totalmente en la madera es muy dependiente de la permeabilidad longitudinal. Para que el tiempo total no supere las cuatro horas de tratamiento, se debe cumplir la condición que la permeabilidad no puede ser inferior a $k = 0,1$ darcy. La retención máxima de preservante es directamente proporcional a la concentración de CCA de la solución preservante y disminuye cuando la densidad de la madera aumenta. Los factores presión y tiempo aumentan en forma aditiva sobre la retención.

Palabras clave: Análisis teórico; Impregnación; Variables; Tablas; Dimensiones comerciales.

ABSTRACT

Impregnation of wood with different products is particularly important in treatments for preservation. The mass of its active substances preservative retained and the duration of the process depends on the conditions of treatment, the shape, size, density, permeability of the wood treating and viscosity of the preservative solutions.

The aim of this paper is to analyze theoretically the influence of the properties of wood, the process conditions and concentration of the preservative solution in the impregnation with waterborne preservatives table size business.

Estimating the time required to achieve maximum penetration of the solution in preserving timber is more realistic if we assume that the gas inside the timber will not dissolve in the solution. The total time for the preservative solution to penetrate completely into the wood is very dependent on the longitudinal permeability. For the total time not exceeding four hours of treatment, must meet the condition that the permeability can not be below $k = 0.1$ darcy. The maximum retention of preservative is directly proportional to the concentration of the CCA preservative solution and decreases when the density of wood increases. The factors pressure and time increases in additive on retention.

Keywords: Theoretical analysis; Impregnation; Variables; Tables; Commercial Sizes.

¹ Departamento de Física y Química. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías. Universidad Nacional de Santiago. del Estero. Av. Belgrano 1912 (s) Santiago del Estero. E-mail: agosto.wottitz@gmail.com

1. INTRODUCCION

La introducción de fluidos a presión dentro de la madera tiene aplicaciones importantes en la preservación contra agentes naturales, con polímeros y en la industria celulósica. (Siau, 1984, Malkov, 2000)

La impregnación de la madera con diferentes productos es especialmente importante en los tratamientos de preservación ya que la mayoría de las especies comerciales son vulnerables al ataque de hongos e insectos cuando se exponen a condiciones de alta temperatura y alta humedad relativa durante un tiempo prolongado. (Idach, 1999)

Está demostrado que la penetración y retención de los productos preservantes depende de la densidad y la permeabilidad de la madera. La masa total de solución que puede ingresar a la madera depende de la densidad y la facilidad con que fluye un fluido dentro de la misma. (Foog y Choong, 1989).

Según Flynn, 1995, la permeabilidad es altamente dependiente de la dirección en que se mide y presenta una gran variabilidad aún para la misma especie, ya que no sólo depende del tamaño de los poros, sino también del grado de comunicación entre vasos en las latifoliadas o entre las traqueidas en las coníferas.

Otaño *et al.*, 1999 determinaron los niveles de absorción de preservantes hidrosolubles en maderas de *Pinus radiata* D. Don, *P. pinaster* Ait., *P. pinea* L. y *P. halepensis* Mill., aplicados por el método Bethell con dos tiempos de presión y su relación con las características físicas y anatómicas. Los resultados indicaron que un mayor tiempo de presión produjo mayores niveles de absorción. Los niveles de absorción de mayor a menor se dieron en el siguiente orden: *P. halepensis*, *P. pinaster*, *P. pinea* y *P. radiata*, asociados inversamente con la densidad anhidra. La presencia de altos contenidos de resinas explicarían las menores absorciones en la madera de *P. radiata*.

Según Malkov, 2002, los factores que influyen en la penetración de líquidos en la madera se pueden clasificar en tres grupos: a) Los factores relacionados con la madera: contenido de humedad, densidad, permeabilidad y la composición química; b) Los factores relacionados con el líquido: viscosidad, tensión superficial, la composición química, la solubilidad de gases en el mismo; c) Los factores relacionados con las condiciones del proceso: presión, temperatura y tiempo.

Una observación más rigurosa de permeabilidad de madera revela las siguientes tendencias: la permeabilidad de la muestra real es menor que el valor calculado asumiendo que la muestra de madera es un conjunto de tubos capilares, la permeabilidad de la muestra disminuye en función de la longitud. Al inyectar el fluido en una parte de la superficie externa, sólo los poros conectados actúan para la migración líquida, pero entre éstos el flujo sólo es eficaz en pocos de ellos. (Perrè, 2003)

Banks, 1981 y Costanza y Miyara, 2000 proponen sendos modelos matemáticos para intentar predecir la masa de un fluido en función del tiempo para diferentes propiedades de la madera y condiciones de tratamiento.

En el ámbito industrial de la impregnación de madera para preservación contra agentes naturales, sería importante contar con modelos matemáticos robustos que permitan relacionar la penetración del fluido dentro de la madera como la masa retenida de preservantes en función del tiempo de tratamiento, para distintas especies y condiciones de trabajo.

El objetivo de este trabajo es analizar teóricamente la influencia de las propiedades de la madera, las condiciones del proceso y la concentración de la solución preservante en la impregnación con preservantes hidrosolubles de tablas de grandes dimensiones.

2. MATERIALES Y METODOS:

Modelos matemáticos

La retención se define como la masa de un preservante retenida por unidad volumen luego de finalizar el proceso de impregnación. Cuando se trata de preservantes óleosolubles (Idach, 1999):

$$R = \frac{m_{sp}}{V_W} \quad (1)$$

Donde:

R es la retención del preservante; m_{sp} es la masa total de solución preservante que ingresa a la madera; V_W es el volumen nominal de la pieza

Cuando se trata de preservantes hidrosolubles, por ejemplo soluciones de ACC (*acid copper chromate*), ACA (*ammoniacal copper arsenate*); ACZA (*ammoniacal zinc arsenate*), y CCA (*chromated copper arsenate*). (Idach, 1999).

$$R = \frac{m_{sp}}{V_W} \cdot C_{sp} = \frac{V_{sp} \cdot \rho_{sp}}{V_W} \cdot C_{sp} \quad (2)$$

Donde:

V_{sp} volumen total de la solución preservante que ingresa a la madera, ρ_{sp} es la densidad de la solución preservante; C_{sp} es la concentración de la solución preservante.

En la figura 1 se representa una pieza de madera de sección cuadrangular (tablas y/o tablonés), en la cual el volumen total de solución preservante que ingresa está dado por:

$$V_{sp} = V_{spl} + V_{spr} + V_{spt} \quad (3)$$

Donde:

V_{spl} y V_{spr} , y V_{spt} es el volumen la solución preservante que ingresa en el sentido longitudinal, radial y tangencial respectivamente.

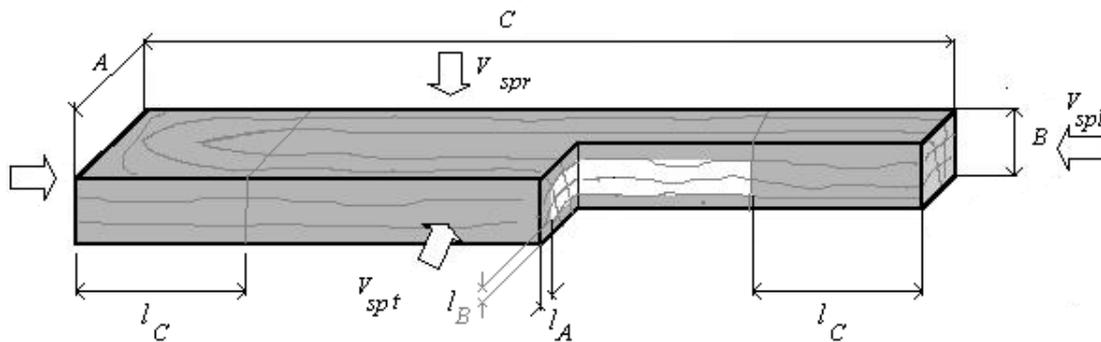


Figura 1. Esquema de un pieza de madera grande de sección cuadrangular

La solución preservante que ingresa se ubica dentro del volumen vacío disponible al iniciar el proceso de impregnación. El volumen vacío está relacionado con el volumen nominal según la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_W = \frac{V_0}{V_W} = 1 - \frac{\rho_W}{\rho_{pc}} \quad (4)$$

Donde:

ε_W es la porosidad al contenido de humedad al inicial el proceso de impregnación; V_0 es el volumen vacío disponible para el ingreso de la solución preservante, ρ_W es la densidad aparente de la madera, la cual depende a su vez del contenido de humedad y $\rho_{pc} = 1500 \text{ kg.m}^{-3}$ es la densidad de la pared celular.

El volumen de solución preservante según los distintos sentidos depende a su vez del área normal al flujo y de la penetración, según las ecuaciones siguientes:

$$V_{spl} = 2 \cdot (A - 2 \cdot l_A) \cdot (B - 2 \cdot l_B) \cdot l_C \cdot \varepsilon_W \quad (5)$$

$$V_{spr} = 2 \cdot (A - 2 \cdot l_A) \cdot (C - 2 \cdot l_C) \cdot l_B \cdot \varepsilon_W \quad (6)$$

$$V_{spt} = 2 \cdot (B - 2 \cdot l_B) \cdot (C - 2 \cdot l_C) \cdot l_A \cdot \varepsilon_W \quad (7)$$

La retención en términos de las ecuaciones 5, 6 y 7 será entonces:

$$R = (V_{spl} + V_{spr} + V_{spt}) \cdot \frac{C_{sp} \cdot \rho_{sp}}{V_W} = 2 \cdot \varepsilon_W \left[\frac{(A - 2 \cdot l_A) \cdot (B - 2 \cdot l_B) \cdot l_C + (A - 2 \cdot l_A) \cdot (C - 2 \cdot l_C) \cdot l_B + (B - 2 \cdot l_B) \cdot (C - 2 \cdot l_C) \cdot l_A}{(B - 2 \cdot l_B) \cdot (C - 2 \cdot l_C) \cdot l_A} \right] \cdot \frac{C_{sp} \cdot \rho_{sp}}{V_W} \quad (8)$$

El flujo de fluidos dentro de la madera está regido como en cualquier medio poroso por la ley de Darcy, asumiendo que: el flujo es laminar, la densidad de flujo es directamente proporcional a la diferencia de presión aplicada, el flujo es homogéneo e incompresible, no hay interacción entre el fluido y el sólido por donde pasa y la permeabilidad es independiente de la longitud de la muestra, (Siau, 1984):

$$Q_{spl} = \frac{dV_{spl}}{dt} = 2 \cdot (A - 2 \cdot l_A) \cdot (B - 2 \cdot l_B) \cdot \frac{\kappa_{wl}}{\mu_{sp}} \cdot \left(\frac{dp}{dl} \right)_l \quad (9)$$

$$Q_{spr} = \frac{dV_{spr}}{dt} = 2 \cdot (A - 2 \cdot l_A) \cdot (C - 2 \cdot l_C) \cdot \frac{\kappa_{wr}}{\mu_{sp}} \cdot \left(\frac{dp}{dl} \right)_r \quad (10)$$

$$Q_{spt} = \frac{dV_{spt}}{dt} = 2 \cdot (B - 2 \cdot l_B) \cdot (C - 2 \cdot l_C) \cdot \frac{\kappa_{wt}}{\mu_{sp}} \cdot \left(\frac{dp}{dl} \right)_t \quad (11)$$

Donde:

Q_{spl} , Q_{spr} , Q_{spt} es el caudal volumétrico de solución preservante que ingresa a la madera en el sentido longitudinal, radial y tangencial respectivamente; κ_{wl} , κ_{wr} , κ_{wt} es la permeabilidad específica de la madera en el sentido longitudinal, radial y tangencial respectivamente, μ_{sp} es la viscosidad de la solución preservante y (dp/dl) es el gradiente de presión en el sentido de ingreso del flujo.

Dado que experimentalmente se demuestra que $\kappa_{wl} \gg \kappa_{wr}$ y $\kappa_{wl} \gg \kappa_{wt}$ y que la sección normal al flujo disminuye a medida que avanza el frente de fluido en el sentido longitudinal, es razonable asumir que $A \gg 2 \cdot l_A$ y $B \gg 2 \cdot l_B$ y en consecuencia $Q_{spl} \gg Q_{spl} + Q_{spr}$, por lo que la ecuación 8 se puede simplificar a:

$$R = V_{spl} \cdot \frac{C_{sp} \cdot \rho_{sp}}{V_W} = 2 \cdot \varepsilon_W \cdot C_{sp} \cdot \rho_{sp} \cdot \frac{l_C}{C} \quad (12)$$

El gradiente de presión en el sentido longitudinal (Ec. 9) será:

$$\left(\frac{dp}{dl} \right)_l = \frac{P_{ext} - P_{int}}{l_C} \quad (13)$$

Donde:

P_{ext} es la presión externa de la solución preservante, P_{int} es la presión interna de los gases confinados dentro de pieza de madera.

Reemplazando la ec. 11 en la ec. 8 y operando se obtiene el diferencial volumen de solución preservante que ingresa en el sentido longitudinal, resulta:

$$dV_{spl} = 2 \cdot A \cdot B \cdot \frac{\kappa_{wl}}{\mu_{sp}} \cdot \left(\frac{P_{ext} - P_{int}}{l_C} \right) \cdot dt \quad (14)$$

Por otro lado, diferenciando la ec. 5

$$dV_{spl} = 2 \cdot A \cdot B \cdot \varepsilon_W \cdot dl_C \quad (15)$$

Igualando las ecuaciones 12 y 13 resulta:

$$dV_{spl} = 2 \cdot A \cdot B \cdot \frac{\kappa_{wl}}{\mu_{sp}} \cdot \left(\frac{P_{ext} - P_{int}}{l_C} \right) \cdot dt = 2 \cdot A \cdot B \cdot \varepsilon_W \cdot dl_C \quad (16)$$

Operando la ec. 14, el diferencial de tiempo se expresa en función de l_C :

$$\frac{dV_{spl}}{2 \cdot A \cdot B} = \frac{\kappa_{wl}}{\mu_{sp}} \cdot \left(\frac{P_{ext} - P_{int}}{l_C} \right) \cdot dt = \varepsilon_W \cdot dl_C \Rightarrow dt = \left(\frac{\varepsilon_W \cdot \mu_{sp}}{\kappa_{wl}} \right) \cdot \left(\frac{l_C}{P_{ext} - P_{int}} \right) \cdot dl_C \quad (17)$$

Banks, 1981 propone que todos los gases contenidos en la madera se disuelven en la solución preservante, en consecuencia ΔP es constante,

$$\Delta P = P_{ext} - P_{int0} \quad (18)$$

Integrando la ec. 17 resulta:

$$t = \left(\frac{\varepsilon_W \cdot \mu_{sp}}{\kappa_{wl}} \right) \cdot \left(\frac{1}{P_{ext} - P_{int0}} \right) \int l_C \cdot dl_C \Rightarrow t = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\varepsilon_W \cdot \mu_{sp}}{\kappa_{wl}} \right) \cdot \left(\frac{1}{P_{ext} - P_{int0}} \right) \cdot l_C^2; 0 \leq l_C \leq \frac{C}{2} \quad (19)$$

Con esta ecuación se puede estimar el tiempo necesario en función de retención buscada del preservante, teniendo en cuenta las propiedades la densidad, permeabilidad, presión del tratamiento y dimensiones de las piezas a tratar.

Costanza y Miyara, 2000 asumen que los gases contenidos en la madera no se disuelven en la solución preservante sino que aumentan su presión interna conforme avanza el proceso, por lo que el gradiente de presión (Ec. 11) varía con la presión interna de los gases, según la ley de los gases ideales

$$P_{int} V_{int} = P_{int0} V_0 = nRT \quad (20)$$

Donde:

V_{int} es el volumen interno de los gases confinados a la presión interna P_{int} , P_{int0} es la presión interna inicial de los gases confinados dentro de los huecos de la madera, V_0 es el volumen vacío disponible para el ingreso de la solución preservante, n es el número de moles de gases confinados y T la temperatura.

Reemplazando P_{int} y la ec. 4 y 19 en la ec. 16 resulta:

$$\Delta P = P_{ext} - P_{int} = P_{ext} - \frac{P_{int0} \cdot \varepsilon_W \cdot V_W}{V_{int}} \quad (21)$$

El V_{int} se puede escribir como:

$$V_{int} = (V_W - 2 \cdot A \cdot B \cdot l_C) \cdot \varepsilon_W \quad (22)$$

Reemplazando la ec. 21 en la ec. 20:

$$\Delta P = P_{ext} - P_{int0} \cdot \frac{V_W}{(V_W - 2 \cdot A \cdot B \cdot l_C)} \quad (23)$$

Ahora reemplazando la ecuación 22 en la ecuación 15, resulta:

$$\frac{dV_{spl}}{2 \cdot A \cdot B} = \frac{\kappa_{W0l}}{\mu_{sp}} \cdot \left(\frac{P_{ext} - \frac{P_{int0} \cdot V_W}{(V_W - 2 \cdot A \cdot B \cdot l_C)}}{l_C} \right) \cdot dt = \varepsilon_W \cdot dl_C \Rightarrow dt = \left(\frac{\varepsilon_W \cdot \mu_{sp}}{\kappa_{W0l}} \right) \cdot \left(\frac{l_C}{P_{ext} - \frac{P_{int0} \cdot V_W}{(V_W - 2 \cdot A \cdot B \cdot l_C)}} \right) \cdot dl_C \quad (24)$$

Integrando la ec. 24, resulta:

$$t = \left(\frac{\varepsilon_W \cdot \mu_{sp}}{\kappa_{W0l}} \right) \cdot \int \left(\frac{l_C}{P_{ext} - \frac{P_{int0} \cdot V_W}{(V_W - 2 \cdot A \cdot B \cdot l_C)}} \right) \cdot dl_C \Rightarrow$$

$$t = \left(\frac{\varepsilon_W \cdot \mu_{sp}}{\kappa_{W0l}} \right) \cdot \frac{1}{(2 \cdot A \cdot B)^2} \cdot \left\{ \left[\frac{1}{2 \cdot P_{ext}^3} \cdot \left[(P_{ext} \cdot (V_W - 2 \cdot A \cdot B \cdot l_C) - P_{int0} \cdot V_W)^2 \right] - \left(\frac{V_W}{P_{ext}^2} - \frac{2 \cdot P_{int0} \cdot V_W}{P_{ext}^3} \right) \cdot [P_{ext} \cdot (V_W - 2 \cdot A \cdot B \cdot l_C) - P_{int0} \cdot V_W] - \left(\frac{P_{int0} \cdot V_W^2}{P_{ext}^2} - \frac{(P_{int0} \cdot V_W)^2}{P_{ext}^3} \right) \cdot \ln[(V_W - 2 \cdot A \cdot B \cdot l_C) - P_{int0} \cdot V_W] \right] - K \right\}; \quad (25)$$

$$0 \leq l_C \leq \frac{C}{2} \cdot \left(1 - \frac{P_{int0}}{P_{ext}} \right)$$

Donde la constante de integración K

$$K = \frac{1}{2 \cdot P_{ext}^3} \cdot (P_{ext} \cdot V_W - P_{int0} \cdot V_W)^2 - \left(\frac{V_W}{P_{ext}^2} - \frac{2 \cdot P_{int0} \cdot V_W}{P_{ext}^3} \right) \cdot (P_{ext} \cdot V_W - P_{int0} \cdot V_W) - \left(\frac{P_{int0} \cdot V_W^2}{P_{ext}^2} - \frac{(P_{int0} \cdot V_W)^2}{P_{ext}^3} \right) \cdot \ln(P_{ext} \cdot V_W - P_{int0} \cdot V_W) \quad (26)$$

Una ecuación empírica para tener la disminución de la permeabilidad con la longitud es la siguiente (Siau, 1984)

$$\kappa_{Wl} = \kappa_{W0l} \cdot e^{-bl_C} \quad (27)$$

Donde:

κ_{W0} es la permeabilidad teórica a la longitud cero en el sentido que se mida, b un factor que se debe determinar experimentalmente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ejemplos de aplicación

Asumiendo una pieza de madera de sección rectangular, como la que se representa en la figura 1 de dimensiones $C = 400$ cm, $A = 25$ cm y $B = 5$ cm se analizan distintos ejemplos.

Ejemplo 1: Estimar el tiempo necesario en función de la longitud en el sentido axial, para que una solución preservante penetre en la madera, según los modelos de a) Banks, 1981 (Ec. 19) y

b) Costanza y Miyara, 2000 (Ec. 25). Se asume que las propiedades de la madera son las siguientes: $\rho_w = 500 \text{ kg.m}^{-3}$, $CH = 12 \%$; $k_{wo1} = 1,0 \text{ darcy}$, constante en función de la longitud de la pieza ($b = 0,00$); las propiedades de la solución: $\rho_{sp} = 1,00 \text{ g.cm}^{-3}$; $\mu_{sp} = 0,01 \text{ poise}$, $C_{sp} = 2 \%$ y las condiciones de tratamiento: $P_{ext} = 10,0 \text{ kgf/cm}^2$ y $P_{int0} = 1,00 \text{ kgf/cm}^2$.

En la Figura 2 se observa que los tiempos calculados según ambos modelos son iguales hasta $l_c < 1,20 \text{ m}$. A partir de $l_c \geq 1,20 \text{ m}$ la diferencia entre ambos aumenta en función de la longitud. La diferencia máxima entre los tiempos predichos por ambos modelos es 24 min.

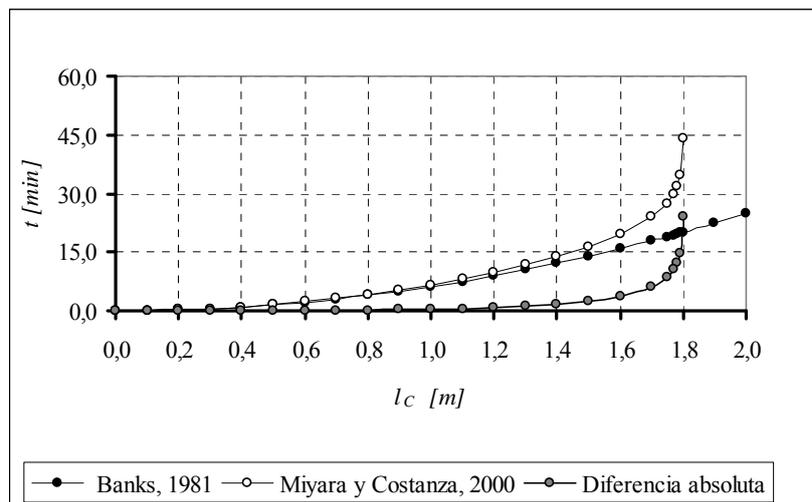


Figura 2. Tiempo en función de la penetración según los modelos Banks, 1981 y Miyara y Costanza, 2000.

El modelo de Banks, 1981 prevé que el fluido ingresa a la madera llenando completamente los poros de la madera, al asumir que los gases contenidos en la madera se disuelven totalmente en la solución preservante, los mismos no oponen resistencia al avance del fluido dentro de la madera, en consecuencia cubre totalmente la distancia $C/2$ (la mitad de la longitud de la pieza).

Al asumir el modelo de Costanza y Miyara, 2000 que los gases contenidos en el interior de la madera no se disuelven en la solución, los mismos oponen resistencia creciente al avance de la solución dentro de la madera, en consecuencia existe una penetración máxima menor que $C/2$, llegando a un límite $l_{C \text{ Max}} = 1,80 \text{ m}$. Para otras condiciones y propiedades de la madera, la situación es similar. Como consecuencia este modelo es mas sensible a las propiedades de la madera y a las condiciones del proceso en consistencia con Malkov, 2002.

Ejemplo 2: Estimar el tiempo necesario en función de la longitud en el sentido axial, para que una solución preservante penetre en la madera, según el modelo de Costanza y Miyara, 2000 (Ec. 25), para maderas de distinta permeabilidad específica en los extremos de la pieza de madera y considerando la influencia de la longitud de la pieza. Se asume que las propiedades de la madera son las siguientes: $\rho_w = 500 \text{ kg.m}^{-3}$, $CH = 12 \%$; las propiedades de la solución: $\rho_{sp} = 1,00 \text{ g.cm}^{-3}$; $\mu_{sp} = 0,01 \text{ poise}$, $C_{sp} = 2 \%$ y las condiciones de tratamiento: $P_{ext} = 10,0 \text{ kgf/cm}^2$ y $P_{int0} = 1,00 \text{ kgf/cm}^2$, considerando las situaciones siguientes: a) $k_{wo} = 0,50 \text{ darcy}$, $b = 0,00$; b) $k_{wo} = 0,50 \text{ darcy}$, $b = 0,40$; c) $k_{wo} = 0,10 \text{ darcy}$, $b = 0,00$; d) $k_{wo} = 0,10 \text{ darcy}$, $b = 0,40$; e) $k_{wo} = 0,05 \text{ darcy}$, $b = 0,00$; f) $k_{wo} = 0,05 \text{ darcy}$ $b = 0,40$

En la figura 3 se observa se observa que los tiempos calculados aumentan mas rápidamente a cuanto menor es la permeabilidad, en consistencia con Foog y Choong, 1989; Flynn, 1995, Malkov, 2002 y Perrè, 2003.

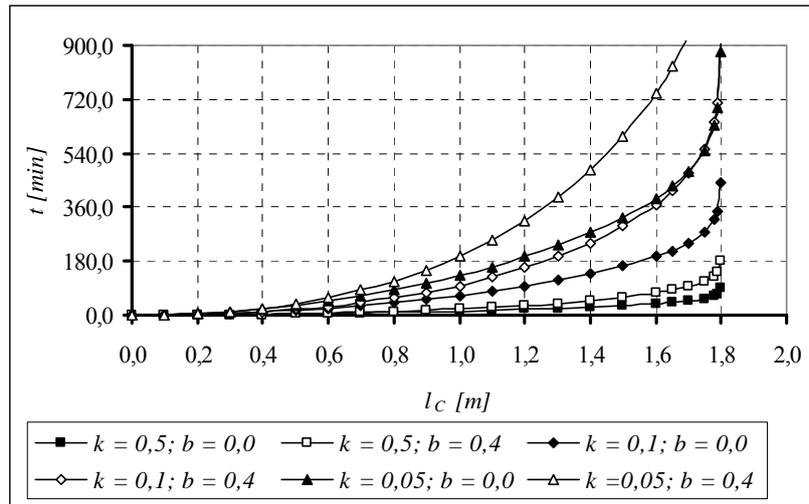


Figura 3. Tiempo en función de la penetración según el modelo de Costanza y Miyara, 2000 para maderas de distinta permeabilidad longitudinal.

Para este ejemplo, el tiempo máximo para alcanzar $l_C = 1,80$ m cuando la permeabilidad es constante en función de la longitud de la pieza ($b = 0,0$) y cuando disminuye ($b = 0,40$), se puede estimar respectivamente según:

$$b = 0,00 \Rightarrow t[\text{min}] = \frac{43,94}{\kappa_{W0l}[\text{darcy}]} \quad (28)$$

$$b = 0,40 \Rightarrow t[\text{min}] = \frac{90,50}{\kappa_{W0l}[\text{darcy}]}$$

Ejemplo 3: Estimar la retención en función del tiempo, según el modelo de Costanza y Miyara, 2000 (Ec. 25) asumiendo que las propiedades de la madera son $CH(\%) = 12$ %; $k_{wl} = 0,5$ darcy; en los extremos de la pieza de madera y que crece en función de la longitud de la pieza (Ec. 27) ($b = 0,4$); las propiedades físicas del fluido: $\rho_{sp} = 1,00$ $g \cdot cm^{-3}$; $\mu_{sp} = 0,01$ poise, y condiciones de tratamiento: $P_{ext} = 10,0$ kg_f/cm^2 y $P_{int0} = 1,00$ kg_f/cm^2 considerando las situaciones siguientes: a) $C_{sp} = 2,0$ %, $\rho_W = 500$ $kg \cdot m^{-3}$; b) $C_{sp} = 2,0$ %, $\rho_W = 700$ $kg \cdot m^{-3}$; c) $C_{sp} = 3,5$ %, $\rho_W = 500$ $kg \cdot m^{-3}$; d) $C_{sp} = 3,5$ %, $\rho_W = 700$ $kg \cdot m^{-3}$; e) $C_{sp} = 5,0$ %, $\rho_W = 500$ $kg \cdot m^{-3}$; d) $C_{sp} = 5,0$ %, $\rho_W = 700$ $kg \cdot m^{-3}$.

En la Figura 4 se observa en general que cuanto mayor es la concentración de la solución preservante, mayor es la retención máxima, y que por cada valor de concentración cuanto mayor es la densidad de la madera menor es la retención.

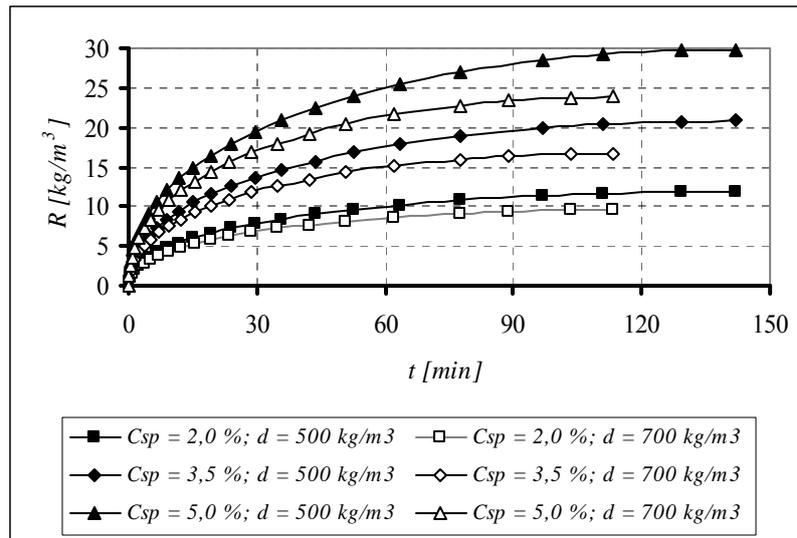


Figura 4. Retención en función del tiempo según el modelo de Costanza y Miyara, 2000 para maderas de distinta densidad a diferentes concentraciones.

Para este ejemplo, a $C_{sp} = 2,0 \%$, $\rho_W = 500 \text{ kg.m}^{-3}$ la retención máxima estimada es $R_{max} = 11,9 \text{ kg(CCA).m}^{-3}$; a $C_{sp} = 2,0 \%$, $\rho_W = 700 \text{ kg.m}^{-3}$ es $R_{max} = 9,6 \text{ kg(CCA).m}^{-3}$; a $C_{sp} = 3,5 \%$, $\rho_W = 500 \text{ kg.m}^{-3}$ es $R_{max} = 20,9 \text{ kg(CCA).m}^{-3}$; a $C_{sp} = 3,5 \%$, $\rho_W = 700 \text{ kg.m}^{-3}$ es $R_{max} = 16,7 \text{ kg(CCA).m}^{-3}$; a $C_{sp} = 5,0 \%$, $\rho_W = 500 \text{ kg.m}^{-3}$ es $R_{max} = 29,8 \text{ kg(CCA).m}^{-3}$; a $C_{sp} = 5,0 \%$, $\rho_W = 700 \text{ kg.m}^{-3}$ es $R_{max} = 23,9 \text{ kg(CCA).m}^{-3}$. A $\rho_W = 500 \text{ kg.m}^{-3}$, se alcanza la máxima retención para todas las concentraciones a 142 min, mientras que cuando la $\rho_W = 700 \text{ kg.m}^{-3}$, se alcanza la máxima retención para todas las concentraciones a 113,5 min, en consistencia con Foog y Choong, 1989 y Otaño *et al.*, 1999.

Para este ejemplo la retención máxima en función de la concentración de CCA de la solución se puede estimar según:

$$\begin{aligned} \rho_W = 500 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] &\Rightarrow R_{\max} \left[\frac{\text{kg(CCA)}}{\text{m}^3} \right] = 5,96 \cdot C_{sp} \\ \rho_W = 700 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] &\Rightarrow R_{\max} \left[\frac{\text{kg(CCA)}}{\text{m}^3} \right] = 4,78 \cdot C_{sp} \end{aligned} \quad (29)$$

Ejemplo 4: Estimar la retención en función de la presión y del tiempo, según el modelo de Costanza y Miyara, 2000 (Ec. 25), para el rango de $P_{ext} = 1,1$ a $10,0 \text{ kg/cm}^2$ y $P_{int0} = 1,00 \text{ kg/cm}^2$ y para el rango de tiempo en el rango de 15 a 180 min, asumiendo que las propiedades de la madera son $\rho_W = 650 \text{ kg.m}^{-3}$ $CH(\%) = 12 \%$; las propiedades físicas del fluido: $\rho_{sp} = 1,00 \text{ g.cm}^{-3}$; $\mu_{sp} = 0,01 \text{ poise}$, concentración de la solución: $C_{sp} = 3,5 \%$ y considerando las situaciones siguientes a) $k_{w10} = 0,1 \text{ darcy}$, $b = 0,0$; b) $k_{w10} = 0,1 \text{ darcy}$, $b = 0,5$.

En la Figura 5 se observa para una madera de permeabilidad. $k = 0,1$ constante en función de la longitud ($b = 0,0$) la retención aumenta con la mayor presión y el tiempo de exposición. A $P = 10 \text{ kg/cm}^2$ y $t = 180 \text{ min}$ la retención máxima es $R = 16,3 \text{ kg.m}^{-3}$.

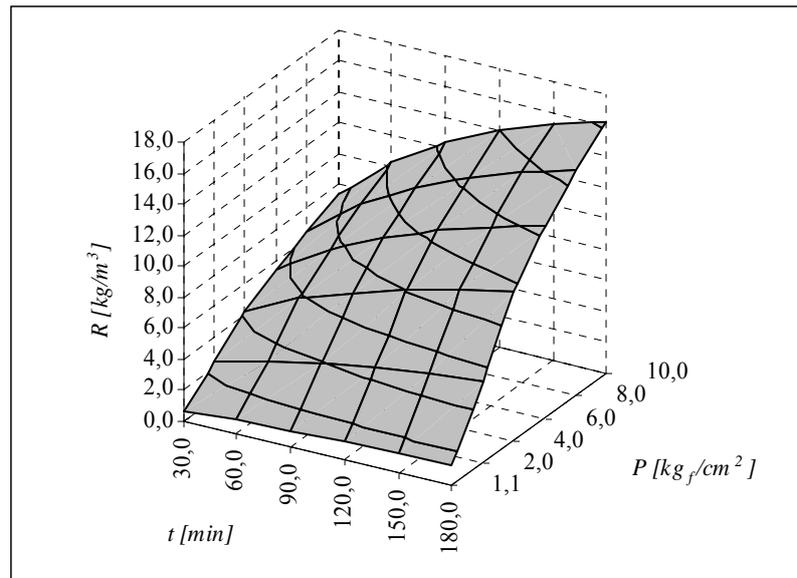


Figura 5. Retención en función de la presión y del tiempo según el modelo de Costanza y Miyara, 2000 para maderas de permeabilidad. $k = 0,1$ constante en función de la longitud ($b = 0,0$)

En la Figura 6 se observa para una madera de permeabilidad. $k = 0,1$ y aumenta en función de la longitud ($b = 0,5$) la retención aumenta con la mayor presión y el tiempo de exposición. A $P = 10 \text{ kg}_f\text{cm}^{-2}$ y $t = 180 \text{ min}$ la retención máxima es $R = 12,7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, lo cual evidencia que hace falta mayor tiempo de tratamiento para que se alcance mayor retención.

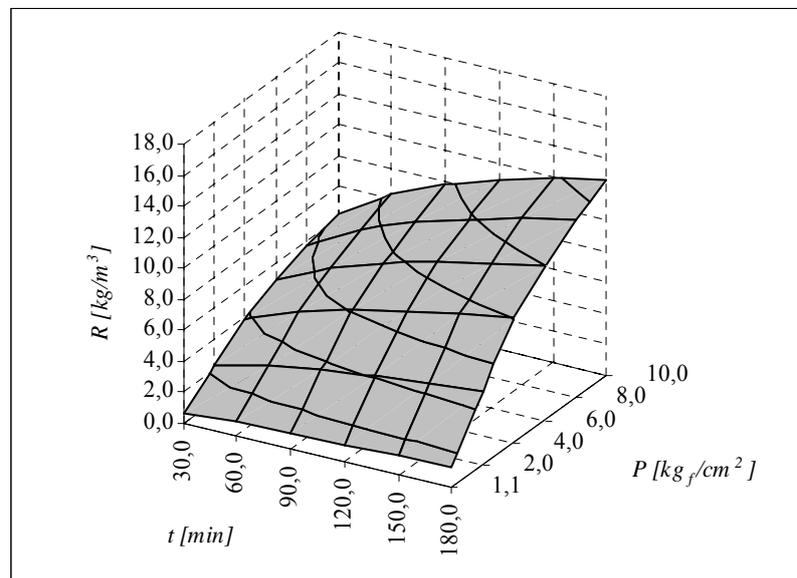


Figura 6. Retención en función de la presión y del tiempo según el modelo de Costanza y Miyara, 2000 para maderas de permeabilidad. $k = 0,1$ constante en función de la longitud ($b = 0,5$)

4. CONCLUSIONES

La estimación del tiempo necesario para lograr la máxima penetración de la solución preservante dentro de la madera es más realista si se asumen que los gases internos de la madera no se disuelven en la solución.

El tiempo total para que la solución preservante penetre totalmente en la madera es muy dependiente de la permeabilidad longitudinal.

Para que el tiempo total no supere las cuatro horas de tratamiento, se debe cumplir la condición que la permeabilidad no puede ser inferior a $k = 0,1 \text{ darcy}$ a lo largo de la tabla.

La retención máxima de preservante es directamente proporcional a la concentración de CCA de la solución preservante y disminuye cuando la densidad de la madera aumenta.

Los factores presión y tiempo aumentan en forma aditiva sobre la retención.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Banks, W. B. 1981. "Addressing the problem of non-steady state liquid flow in wood". Wood Sci. Technol.. 15: 171-177.
- Costanza, V. y A. J. Miyara. 2000. "Dynamics of hardwood impregnation". Holzforschung. Vol. 54. N°2. 183-188
- Flynn, K. A. 1995. "A review of the permeability, fluid flow, and anatomy of spruce (*Picea spp.*)". Wood and Fiber Science. 27 (3): 278-284.
- Idach, R. E. 1999. "Wood Preservation" Chap. 14. Wood handbook. Wood as an engineering material. Forest Products Laboratory. Madison. (U.S.A.)
- Otaño, M. E.; G. D. Keil, M. L. Luna; B. Díaz. y R. M. Marlatz. 1999. "Impregnación de maderas de *Pinus radiata*, *P. pinaster*, *P. pinea* y *P. halepensis*: relación entre la absorción de preservantes hidrosolubles y sus características físicas y anatómicas". Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata 104 (1), pp 75-84
- Perré, P. 2003. "The Role of Wood Anatomy in The Drying of Wood: Great Oaks From Little Acorns Grow". Pp 15-25. 8th International IUFRO Wood Drying Conference., Brasov, Romania, 24-29 August 2003.
- Malkov, S. 2002. "Studies on liquid penetration into softwood chips. Experiments, Models and Applications". Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology to be presented with due permission of the Department of Forest Products Technology, Helsinki University of Technology for public examination and debate in Council Room at Helsinki University of Technology (Espoo, Finland) on the 22nd of November, at 12 noon. 76 p
- Siau, J. 1984. "Transport Processes in Wood". Springer-Verlag. Berlin. 244 p.

