

CAPÍTULO II. SECADO

Rubén A. Ananías, UBB

En el contexto de otorgar mayor valor agregado a la madera de pino ponderosa, el proceso de secado en cámara es fundamental. Los mejores programas de secado a nivel industrial son aquellos que optimizan el costo del proceso y la calidad final de la madera.

La madera sometida a un determinado programa de secado es evaluada en base a una serie de parámetros, los que deben ser mantenidos bajo ciertos límites para reducir los problemas de procesamiento posterior o puesta en servicio.

2.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar en forma experimental programas de secado convencional para madera aserrada de pino ponderosa.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Ejecutar ensayos a escala de laboratorio con madera aserrada de 25 y 50 mm de espesor.

Cuantificar los defectos del secado: Grietas, tensiones, cambios de color y alabeos.

Proponer programas de secado para cada espesor.

Validar programas de secado a escala industrial para cada espesor.

2.3. MATERIAL Y MÉTODO

2.3.1. Procedencia de la Madera

En los ensayos piloto se utilizó madera proveniente de la Reserva Nacional Coyhaique, Región de Aysén. Antecedentes prediales, dasométricos y de manejo del rodal desde donde se seleccionaron los árboles se presentan en las Tablas N° 1 y N° 2 (Capítulo I).

2.3.2. Ensayos a Escala piloto

Treinta y seis trozas de pino ponderosa con diámetros entre 20 y 29 cm y 2,4 m de largo fueron aserradas a espesores de 25 y 50 mm, privilegiando la madera lateral y cortes tangenciales. La madera aserrada fue almacenada bajo agua y dimensionada a 1 metro de largo para los ensayos de secado.

Se utilizó un horno de secado convencional a escala de laboratorio de 0,3 m³ de capacidad. En cada carga se secaron 104 y 72 piezas de 25 y 50 mm, respectivamente. La metodología consideró 6 ensayos de secado a escala piloto e incluyó como variables el espesor (25, 50 mm) y el tipo de programa (convencional, convencional acelerado). Se midió la contracción, heterogeneidad de la humedad final, gradiente de humedad, tensiones de secado, grietas, alabeos y cambios de color en 24 piezas.

La evaluación de la calidad de la madera se basó en adaptaciones recogidas de estandarizaciones europeas presentadas en las tablas N° 12 y N° 13 (Welling, 1994; Álvarez y Fernández, 1992). En particular, para evaluar los cambios de color la superficie de la madera fue cepillada, cada 0,5 mm, hasta eliminar completamente la coloración.

Tabla N° 12. Especificaciones de Calidad

| Calidad | CHF (%) | GH (%) | TFS (mm) |
|-----------|---------|--------|----------|
| Estándar | 7-13 | 4 | 3 |
| Secado | 8-12 | 3 | 2 |
| Exclusiva | 9-11 | 2 | 1 |

CHF: Contenido humedad final. GH: Gradiente humedad
TFS: Tensiones final secado

Tabla N° 13. Intensidad de las Grietas y Cambios de Color

| Intensidad | GI (%) | GS (mm) | GE (cm) | CC (mm) |
|------------|--------|---------|---------|---------|
| Severa | >10 | >5 | >20 | >3 |
| Moderada | 2-10 | 2-5 | 5-20 | 2-3 |
| Leve | <2 | <2 | <5 | <2 |

GI: Grietas internas GS : Grietas superficiales
GE: Grietas extremos CC: Cambios color

Los alabeos fueron cuantificados según magnitudes que se registran en la Tabla N° 14, adaptadas de NCh 993.

Tabla N° 14. Alabeos Admisibles, para 1 m de Largo

| Alabeo | Espesor (mm) | Sin Alabeo (mm) | Leve (mm) | Moderado (mm) | Intenso (mm) |
|-------------|--------------|-----------------|-----------|---------------|--------------|
| Acanaladura | 25 | 0 | 1-3 | 3-5 | >5 |
| | 50 | 0 | 1-3 | 3-5 | >5 |
| Arqueadura | 25 | 0 | 1-3 | 3-6 | >6 |
| | 50 | 0 | 1-2 | 2-4 | >4 |
| Encorvadura | 25 | 0 | 1-2 | 2-3 | >3 |
| | 50 | 0 | 1-2 | 2-3 | >3 |
| Torcedura | 25 | 0 | 1-2 | 2-7 | >7 |
| | 50 | 0 | 1-2 | 2-7 | >7 |

La humedad de la madera durante el secado fue recogida mediante pesadas de 8 muestras testigos. Inicialmente se determinó su humedad a través de probetas que fueron secadas en estufa por 24 horas, a una temperatura de 103 °C, hasta obtener peso constante. Posteriormente se calculó la masa anhidra de las muestras testigo con el objetivo de obtener, a través de pesadas, la humedad durante el proceso de secado.

2.3.3. Ensayos a Escala Industrial

Se utilizó madera proveniente del mismo rodal que para los ensayos a escala piloto. La madera en trozas fue aserrada en espesores de 25 y 50 mm y 3,1 m de largo. Los ensayos se realizaron en un horno de secado convencional de 10 m³ de capacidad en el Centro de Formación Técnica Lota Arauco.

Se efectuaron 2 ensayos de secado industrial, uno para cada espesor. Un total de 900 y 500 piezas fueron secadas en los ensayos de 25 y 50 mm de espesor, respectivamente.

Se midió la contracción, la heterogeneidad de la humedad final, los gradientes de humedad, las tensiones de secado, las grietas y los cambios de color, en base a las mismas adaptaciones presentadas anteriormente para los ensayos a escala piloto (Tablas N° 12 y N° 13).

Los alabeos se evaluaron según las especificaciones en la Tabla N° 15 (NCh 993). Para estas evaluaciones se utilizaron 55 y 40 piezas de 25 y 50 mm de espesor, respectivamente.

Tabla N° 15. Alabeos Admisibles para 3,1 m de Largo

| Alabeo | Espesor (mm) | Sin Alabeo (mm) | Leve (mm) | Moderado (mm) | Intenso (mm) |
|-------------|--------------|-----------------|-----------|---------------|--------------|
| Acanaladura | 25 | 0 | 1-3 | 3-6 | >6 |
| | 50 | 0 | 1-3 | 3-6 | >6 |
| Arqueadura | 25 | 0 | 1-30 | 30-60 | >60 |
| | 50 | 0 | 1-15 | 15-30 | >30 |
| Encorvadura | 25 | 0 | 1-6 | 6-12 | >12 |
| | 50 | 0 | 1-6 | 6-12 | >12 |
| Torcedura | 25 | 0 | 1-6 | 6-10 | >10 |
| | 50 | 0 | 1-6 | 6-10 | >10 |

La humedad de la madera durante el secado industrial fue recogida con el mismo método aplicado en los ensayos a escala piloto.

2.4. RESULTADOS

2.4.1. Secado a Escala de Laboratorio

Los programas de secado tentativos para el pino ponderosa fueron adaptados de la literatura (Boone *et al.*, 1988). Se aplicaron programas de secado convencional y acelerado a madera de 25 y 50 mm de espesor (Tabla N° 16).

El programa de secado convencional fue considerado para reducir los problemas de coloración café. El programa acelerado, en tanto, buscaba optimizar el tiempo de secado. En ambos programas se utilizó una velocidad del aire de 3 m/s.

Tabla N° 16. Programas de Secado para 25 y 50 mm de Espesor

| CH (%) | Convencional (SC) | | Convencional Acelerado (SCA) | |
|---------------|-------------------|------------------------|------------------------------|------------------------|
| | T (°C) | T _H (°C) | T (°C) | T _H (°C) |
| Calentamiento | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Verde-10 | 70 | 60 | 90 | 60 |
| 10 | 60 | 60 | 60 | 60 |

CH: Contenido de humedad T: Temperatura del bulbo seco

T_H: Temperatura bulbo húmedo

La evolución del contenido de humedad y las condiciones de secado de la madera aserrada de 25 mm se registran en las Figuras N° 13 y N° 14.

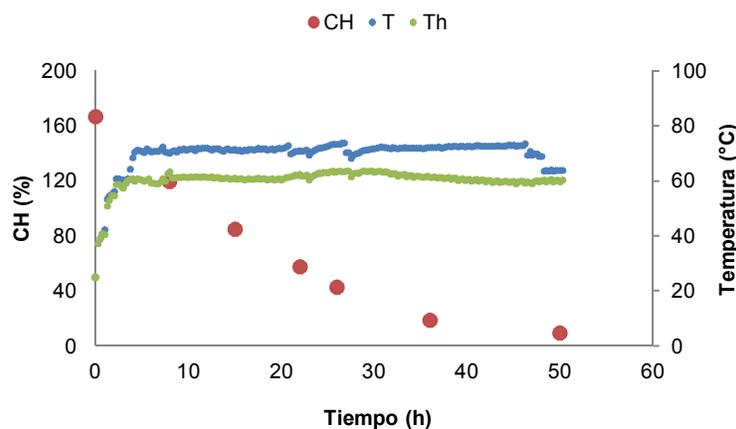


Figura N° 13. Curva de Secado Convencional, 25 mm

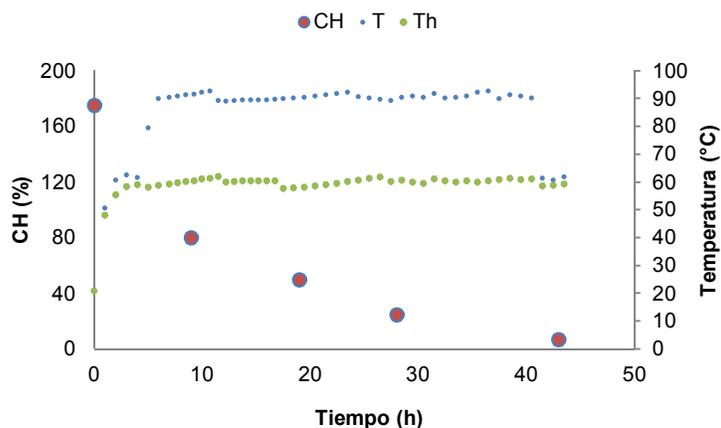


Figura N° 14. Curva de Secado Acelerado, 25 mm

La variación del contenido de humedad y las condiciones de secado para la madera de 50 mm se registran en las Figuras N° 15 y N° 16.

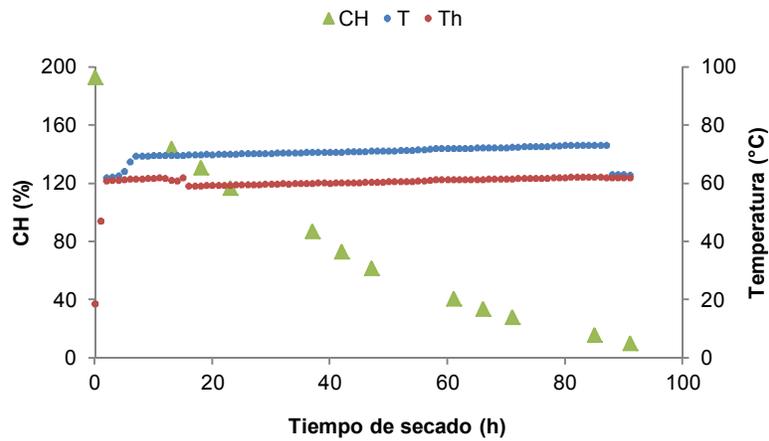


Figura N° 15. Curva de Secado Convencional, 50 mm

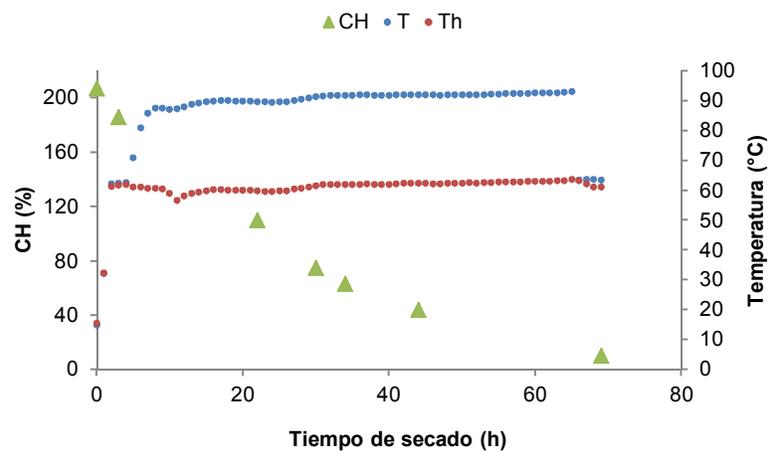


Figura N° 16. Curva de Secado Acelerado, 50 mm

Las curvas de secado a escala piloto muestran que el pino ponderosa de 25 y 50 mm de espesor alcanza rápidamente la temperatura de bulbo húmedo (60°C). Al finalizar la etapa de secado, la madera fue acondicionada por 3 a 4 horas en un ambiente saturado a 60°C.

La duración del secado para la madera de 25 mm de espesor fue 45 horas para el programa acelerado y 50 horas para el programa convencional. En 50 mm, la duración fue 69 y 91 horas para los programas acelerado y convencional, respectivamente. En este último programa se utilizó madera fresca recién aserrada, lo que explica la duración del secado.

De acuerdo a los resultados de los primeros 4 ensayos a escala de laboratorio, se repitieron los programas de secado acelerado para 25 mm (Figura N° 17) y convencional para 50 mm (Figura N° 18). En ambos ensayos se utilizó una velocidad del aire de 3 m/s y se aplicó un acondicionamiento final de 4 horas en un ambiente saturado a 90°C.

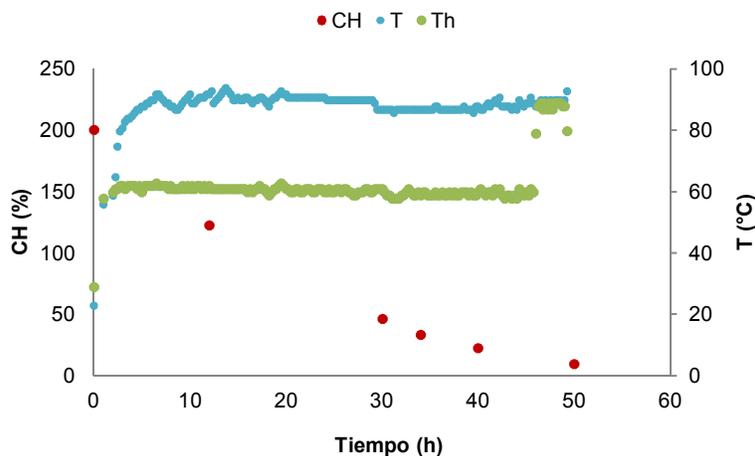


Figura N° 17. Curva de Secado Acelerado, Repetición 25 mm

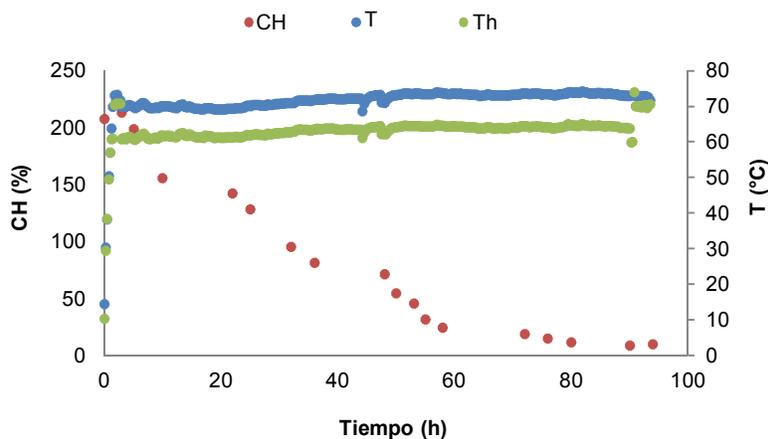


Figura N° 13. Curva de Secado Convencional, Repetición 50 mm

Los tiempos de secado en los programas de repetición a nivel experimental fueron de 50 y 95 horas para la madera de 25 y 50 mm, respectivamente.

2.4.2. Secado a Escala Industrial

A escala industrial, para madera de 25 mm, se ensayó un secado convencional acelerado 90/60 °C/°C, considerando una velocidad del aire de 5 m/s, que buscaba optimizar el tiempo de secado.

En madera de 50 mm se ensayó un secado convencional 70/60 °C/°C, con una velocidad de aire de 3 m/s, que buscaba minimizar la coloración café.

En los 2 ensayos se aplicó un acondicionamiento de 4 horas en un ambiente saturado a 70°C.

Las curvas de secado de los ensayos industriales se registran en las Figuras N° 19 y N° 20.

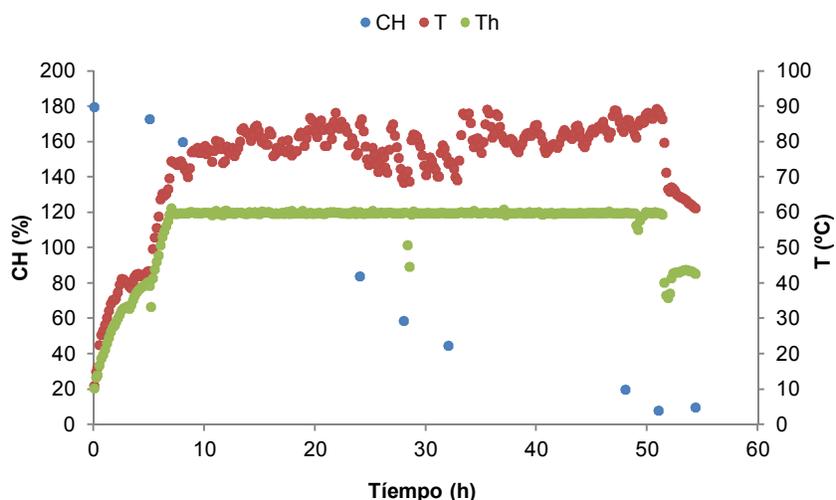


Figura N° 19. Curva de Secado Industrial Acelerado, 25 mm

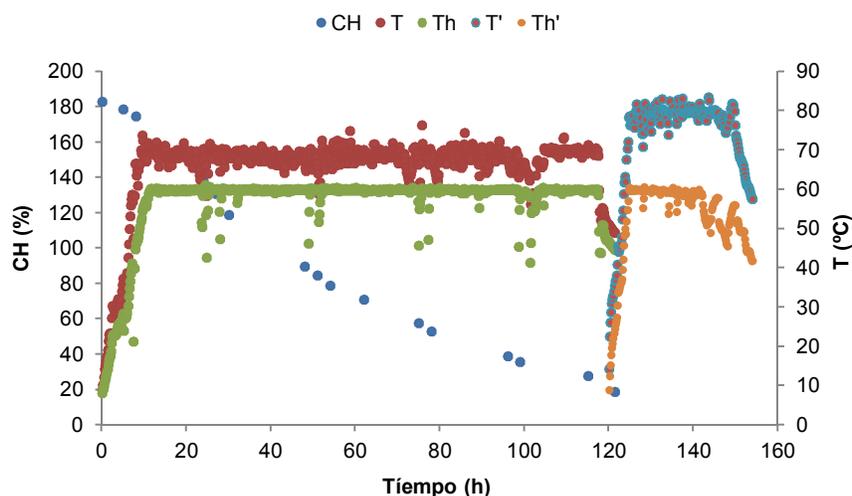


Figura N° 20. Curva de Secado Industrial Convencional, 50 mm

A escala industrial, con madera de 25 mm, bajo un secado convencional acelerado, el proceso demandó 55 horas, extendiéndose por 5 horas más que el secado piloto de repetición. Con madera de 50 mm, bajo condiciones de secado convencional, el proceso fue más lento, prolongándose por 150 horas, 55 horas adicionales respecto del secado de repetición a escala piloto.

No obstante lo anterior, el proceso de secado se encuentra en el rango de tiempo de hasta 6 días (144 horas) sugerido en la literatura para el secado convencional de pino ponderosa de 50 mm de espesor (Simpson 2001).

De la misma forma, Wagner *et al.*, (2008) proponen un programa a temperatura convencional para minimizar la coloración café en pino ponderosa de 38 mm que dura 5 días (128 horas).

2.4.3. Contracción al Final del Secado

La magnitud de la contracción al final del secado se indica en la Tabla N° 17.

A escala piloto, en el secado convencional para madera de 25 mm la contracción radial fue 2,8% y la tangencial de 4,0%. En 50 mm, secado convencional (inicial y repetición), la contracción radial varió entre 3,0% y 3,5% y la contracción tangencial entre 5,2% y 4,9%. En el secado acelerado de repetición, la madera de 25 mm presentó contracciones de 3,3% y 4,6% en las direcciones radial y tangencial, respectivamente. En 50 mm, bajo condiciones de secado acelerado, la contracción radial fue 3,5% y la tangencial de 5,4%. El secado acelerado sube levemente los niveles de contracción.

A escala industrial los niveles de contracción fueron similares a los observados en el laboratorio. Para madera de 25 mm se registraron contracciones radiales y tangenciales de 3,1% y 4,5%, respectivamente. En el caso de 50 mm las contracciones fueron de 3,4% y 5,6% en las direcciones radial y tangencial, respectivamente. Estos valores son comparables a los reportados en la literatura (Cockrell y Howard 1968, Simpson 2001, Ross 2010). Los resultados confirmaron que los cambios dimensionales en el pino ponderosa son bajos, lo que la hace estable dimensionalmente.

Tabla N° 17. Magnitud de la Contracción

| Espesor (mm) | Ensayo | Contracción (%) | |
|--------------|--------|-----------------|------------|
| | | Radial | Tangencial |
| 25 | SC | 2,8 (0,8) | 4,0 (0,7) |
| | SCA | 3,0 (0,8) | 4,4 (0,6) |
| | SCA-R | 3,3 (0,7) | 4,6 (0,5) |
| | SCA-I | 3,1 (0,5) | 4,5 (0,6) |
| 50 | SCA | 3,5 (0,8) | 5,4 (0,7) |
| | SC | 3,0 (0,6) | 5,2 (0,7) |
| | SC-R | 3,5 (0,7) | 4,9 (0,5) |
| | SC-I | 3,4 (0,9) | 5,6 (0,7) |

Desviación estándar entre paréntesis

SC-R: Secado convencional repetición

SC-I: Secado convencional industrial

SCA-R: Secado convencional acelerado repetición

SCA-I: Secado convencional acelerado industrial

2.4.4. Evaluación de la Calidad del Secado

Respecto de los 4 primeros ensayos de secado a escala de laboratorio, es decir, convencional y convencional acelerado, para 25 y 50 mm de espesor:

- La homogeneidad de la humedad final fue relativamente uniforme en ambos espesores y condiciones de secado (Tabla N° 18).
- El gradiente de humedad más bajo se registró con el programa de secado convencional, tanto para madera de 25 y 50 mm.

- Las menores tensiones de secado se obtuvieron con el programa convencional acelerado y convencional, para 25 y 50 mm, respectivamente

En los ensayos de repetición a escala de laboratorio, para madera de 25 mm de espesor, secada con un programa convencional acelerado, el contenido de humedad se concentró en la calidad "secado", mientras que el gradiente de humedad y las tensiones de secado se agruparon en la calidad "exclusiva". En el ensayo convencional para 50 mm, el contenido de humedad se concentró en la calidad "exclusiva", el gradiente de humedad presentó la mitad de las piezas en la calidad "secado" y el porcentaje restante en la calidad "exclusiva". Las tensiones de secado presentaron el mismo comportamiento que la madera de 25 mm.

A escala industrial, los mejores indicadores de calidad se registraron en el secado convencional acelerado, espesor 25 mm, específicamente en el contenido y gradiente de humedad. El comportamiento de las tensiones de secado fue mejor en el secado convencional, espesor 50 mm.

Con el objetivo de mejorar la calidad de las tensiones de secado, en ambos ensayos industriales se aplicaron acondicionados finales de 4 horas de duración. Para 25 y 50 mm se consideraron ambientes saturados de 70 y 90°C, respectivamente.

Tabla N° 18. Evaluación de Humedad, Gradiente y Tensiones

| Espesor (mm) | Ensayo | CH (%) | | | GH (%) | | | TFS (%) | | |
|--------------|--------|--------|-----|-----|--------|-----|-----|---------|-----|-----|
| | | Est | Sec | Exc | Est | Sec | Exc | Est | Sec | Exc |
| 25 | SC | 0 | 6 | 94 | 0 | 13 | 87 | 25 | 69 | 6 |
| | SCA | 0 | 20 | 80 | 0 | 33 | 67 | 68 | 32 | 0 |
| | SCA-R | 4 | 71 | 25 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 |
| | SCA-I | 0 | 50 | 50 | 0 | 0 | 100 | 62 | 38 | 0 |
| 50 | SCA | 2 | 14 | 84 | 0 | 25 | 75 | 38 | 56 | 6 |
| | SC | 0 | 2 | 98 | 0 | 0 | 100 | 6 | 81 | 13 |
| | SC-R | 22 | 38 | 40 | 0 | 50 | 50 | 0 | 0 | 100 |
| | SC-I | 30 | 20 | 50 | 30 | 10 | 60 | 20 | 60 | 20 |

Exc: Calidad exclusiva Sec: Calidad secado Est: Calidad estándar

En los ensayos a escala piloto e industrial, las grietas internas, superficiales y en los extremos fueron prácticamente imperceptibles (Tabla N° 19). Las referencias bibliográficas dan cuenta de la escasa propensión a las grietas de esta especie (Knauss 1957). No obstante lo anterior, se observó una tendencia a las grietas en los nudos.

La tendencia a los cambios de color durante el secado se destaca en la Tabla N° 19. Si bien a escala de laboratorio no se observó claramente que la coloración café se intensificara con la temperatura de secado, según la literatura un aumento de ella incrementaría la coloración café durante el secado (Wagner *et al.*, 2008). Entonces, reducir el impacto de la temperatura sobre los cambios de color durante el secado fue una de las razones que promovió la utilización de un programa de secado convencional en madera de 50 mm.

El ensayo industrial con 50 mm (convencional) no registró piezas con coloración café. Por el contrario, el secado industrial con 25 mm (convencional acelerado) registró todas las piezas de evaluación con la calidad "intenso".

Tabla N° 19. Evaluación de Grietas y Cambios de Color

| Espesor (mm) | Ensayo | GI | | | | GS | | | | GE | | | | CC | | | |
|--------------|--------|-----|---|---|---|-----|---|---|---|-----|---|---|---|-----|----|----|-----|
| | | s/d | L | M | I | s/d | L | M | I | s/d | L | M | I | s/d | L | M | I |
| 25 | SC | 100 | 0 | 0 | 0 | 99 | 0 | 0 | 1 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25 | 38 | 37 |
| | SCA | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 37 | 38 | 25 |
| | SCA-R | 100 | 0 | 0 | 0 | 96 | 4 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 38 | 25 | 37 |
| | SCA-I | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 50 | SC | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 | 25 | 62 |
| | SCA | 100 | 0 | 0 | 0 | 99 | 0 | 0 | 1 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 37 | 0 | 63 |
| | SC-R | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25 | 75 | 0 |
| | SC-I | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 |

s/d: Sin defecto; L: Leve; M: Moderado; I: Intenso

Respecto de los alabeos (Tabla N° 20), considerando los 6 ensayos a escala piloto:

- Se mantuvo la tendencia para la torcedura. En 25 mm se registraron calidades “leve” y “moderado”, con predominio de las primeras. En 50 mm las calidades se concentraron en “leve”, “moderado” e “intenso”, con distribuciones similares para las últimas dos.
- La encorvadura y la arqueadura fueron de menor magnitud, en consideración al largo de la madera ensayada. Tal como lo reporta la literatura, este defecto es limitado durante el secado de pino ponderosa y no degrada de manera importante la calidad de la madera (Knauss y Clarke 1961).
- El comportamiento de la acanaladura frente al secado fue consistente con la relativamente baja contracción tangencial (1,5 – 2,0 veces la contracción radial) observada durante el secado.

En el ensayo industrial con 25 mm no se registró acanaladura. La arqueadura y la torcedura afectaron levemente la calidad de la madera y la encorvadura fue algo más intensa.

En 50 mm, la acanaladura predomina en la calidad “sin defecto”. La arqueadura y encorvadura fueron similares, con predominio de las calidades “sin defecto”, “leve” y “moderado”. La torcedura fue el alabeo más intenso.

Tabla N° 20. Evaluación de Alabeos

| Espesor (mm) | Ensayo | Acanaladura | | | | Arqueadura | | | | Encorvadura | | | | Torcedura | | | |
|--------------|--------|-------------|-----|----|---|------------|-----|----|---|-------------|-----|----|---|-----------|-----|----|----|
| | | s/d | L | M | I | s/d | L | M | I | s/d | L | M | I | s/d | L | M | I |
| 25 | SC | 0 | 88 | 12 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 95 | 5 | 0 | 0 | 63 | 37 | 0 |
| | SCA | 0 | 17 | 77 | 6 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 4 | 75 | 17 | 4 |
| | SCA-R | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 83 | 13 | 4 |
| | SCA-II | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 89 | 11 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 |
| 50 | SC | 0 | 92 | 8 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 75 | 25 | 0 | 0 | 58 | 17 | 25 |
| | SCA | 0 | 46 | 50 | 4 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 92 | 8 | 0 | 0 | 54 | 33 | 13 |
| | SC-R | 58 | 42 | 0 | 0 | 0 | 71 | 21 | 8 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 58 | 17 | 25 |
| | SC-I | 97 | 3 | 0 | 0 | 25 | 65 | 10 | 0 | 23 | 55 | 22 | 0 | 33 | 36 | 18 | 13 |

2.5. CONCLUSIONES

El pino ponderosa de 25 y 50 mm de espesor se deja secar satisfactoriamente con programas de secado convencional acelerado y convencional, respectivamente.

El secado convencional reduce los problemas de cambio de color, pero extiende la duración del proceso, por lo que se debe encontrar un buen compromiso entre ambas variables para no prolongar demasiado la duración del programa a baja temperatura, y tampoco degradar excesivamente la madera por el secado rápido.

La contracción transversal del pino ponderosa es relativamente baja (1,5% a 2,0%), lo que favorece la estabilidad dimensional y la escasa propensión a la acanaladura de la madera aserrada durante el secado.

Las grietas internas, superficiales y en los extremos, no afectan la calidad del pino ponderosa sometido a programas de secado convencional y acelerado.

2.6. REFERENCIAS

Álvarez, H. y Fernández, J., 1992. Fundamentos Teóricos del Secado de la Madera. Monografía INIA N° 82.

Boone, R. S.; Kozlik, C. J.; Bois, P. J.; and Wengert, E. M., 1988. Dry Kiln Schedules for Commercial Woods. Temperate and tropical. USDA, FPL-GTR-57.

Cockrell, R. and Howard, R., 1968. Specific Gravity and Shrinkage of Open Grown Ponderosa Pine. Wood Science Technology 2:292-298.

Knauss, A., 1957. Seasoning Degrade in Kiln-Drying Ponderosa Pine in South Central Oregon. PNW Research Note No. 136, 11p.

Knauss, A. and Clarke, E., 1961. Seasoning and Surfacing Degrade in Kiln-Drying Ponderosa Pine in Eastern Washington. PNW Research Note No. 205, 12p

Ross, R. J., 2010. Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. USDA Forest Service., Forest Products Laboratory. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL- GTR-190, 509 p.

Simpson, W., 2001. Dry Kiln Operator's Manual. USDA Agricultural Handbook AH-188. 274p.

Wagner, F.; Smith, N. and McDonald, A., 2008. Initial High-Temperature Schedule to Reduce Drying Time and Control Kiln Brown Stain in Ponderosa Pine Shop Lumber. Forest Prod J 58(12):29-32.

Welling, J., 1994. Drying Quality Assessment and Specification. A Challenge for the Future. 4th IWDC: 297-304.