

ESTUDIO DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LA CELULOSA. RELACIÓN CON OTROS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

C. Molleda Clara, N. Gómez Hernández, E. Manrique Menéndez, J. Santalla Rodríguez, A. González de la Aleja Tejera y J.D. Barco Martín

Departamento de Ciencias Básicas Aplicadas a la Ingeniería Forestal; E.U.I.T. Forestal; Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Ramiro de Maeztu s/n; 28040 Madrid. Teléfono: 91 3367656; Fax: 91 5446025

e-mail: molleda@forestales.upm.es

Resumen

Las propiedades térmicas del papel son fundamentales en su fabricación y en algunas de sus aplicaciones finales; por ejemplo, en algunos procesos de impresión o en el envasado de alimentos. Existen distintos factores que determinan la conductividad térmica del papel, como la temperatura, el contenido de humedad, la composición de la pasta, etc. Muchas de estas relaciones han sido ya analizadas en diversos trabajos. Sin embargo, no es tan bien conocida la relación entre la conductividad térmica y otros parámetros físico-químicos que pueden condicionar las aplicaciones del papel. Entre estas propiedades cabe destacar el grado Shopper-Riegler y la permeabilidad, propiedades importantes para la impresión y el envasado de alimentos. El objetivo de este trabajo ha sido estudiar la conductividad térmica de dos tipos de pasta (Kraft de pino cruda y blanqueada a tres grados de refino distintos y mecánica de pino) y establecer posibles relaciones entre ésta y diversos parámetros físico-químicos relevantes.

Palabras clave: Transferencia de calor; pasta de celulosa; propiedades físicas del papel; grado de refino.

INTRODUCCIÓN

Cuando existe una diferencia de temperatura entre las partes de un sistema se produce un flujo de calor entre la región más caliente y la más fría, que tiende a igualar las temperaturas. Los procesos de transmisión de calor se realizan mediante tres mecanismos básicos, que se pueden simultanear. Se denominan conducción, convección y radiación térmica.

La conducción es el paso directo de calor entre dos porciones de materia puestas en contacto; se trata de un transporte de energía, no de materia. La propagación de calor por conducción en el interior de un medio material tiene lugar siguiendo el gradiente de temperaturas, en el sentido de mayor a menor temperatura, según la ley de Fourier:

$$\vec{J} = -\lambda \vec{\text{grad}} T$$

donde J es la densidad de flujo de calor ϕ , T es la temperatura y λ es el coeficiente de conductividad térmica.

La conductividad térmica es un importante parámetro en el secado del papel. Las propiedades térmicas son importantes porque van a determinar la rapidez con la que alcanza el papel el equilibrio térmico con el medio y cuanta energía necesita para ello. También son importantes en los procesos de calandrado, que consiste en el alisado del papel mediante la aplicación conjunta de presión y calor, y en algunos procesos de impresión y aislamiento térmico. (HEIKKILÄ & PALTAKARI, 2000; LESKELÄ & SIMULA, 1998; NAKAGAWA & SHAFIZADEH, 1984).

Este trabajo pretende determinar la conductividad térmica de tres tipos de pasta, mecánica, Kraft cruda y Kraft blanqueada y establecer posibles relaciones con diversas propiedades físico-químicas de la pasta, como contenido de lignina y permeabilidad; en particular, en el caso de la pasta Kraft blanqueada, con el grado Shopper-Riegler, que mide el grado de refino.

El refino es un tratamiento mecánico de la suspensión de pasta, que modifica la estructura morfológica de la fibra que se traduce en un cambio de las propiedades físico mecánicas del papel. La determinación del grado Schopper-Riegler (°SR) es el método empleado para medir el grado de refino de una pasta y está basado en la capacidad de retener agua de la suspensión fibrosa.

MATERIAL Y MÉTODOS

Aparato de medida de la conductividad térmica

El sistema de medida de la conductividad se basa en suministrar una potencia eléctrica a una placa calefactora en contacto con la muestra, hasta alcanzar una determinada temperatura y medir la temperatura en la otra cara de la muestra, en condiciones estacionarias.

La placa calefactora calienta la muestra por la cara inferior y el flujo de calor la atraviesa en sentido ascendente (figura 1). En la parte superior de la probeta se coloca una sonda, que recogerá la temperatura final. La función del aislante inferior es que toda la potencia eléctrica transformada en calor sea suministrada íntegramente a la muestra.

Si se considera que el flujo de calor ϕ es constante en toda la superficie calefactada, de espesor e y superficie S , se puede despejar λ de la ecuación de Fourier:

$$\lambda = \frac{\phi e}{S(T_1 - T_2)}$$

Como el flujo de calor ϕ es precisamente la energía disipada por la muestra, o lo que es lo mismo, la potencia necesaria para mantener una temperatura de placa constante, esto equivale a la potencia eléctrica VI multiplicada por el factor de calentamiento α . Por lo tanto:

$$\lambda = \frac{e \cdot V \cdot I \cdot \alpha}{S \cdot (T_1 - T_2)}$$

donde T_1 es la temperatura a la que fijamos la placa de calentamiento y T_2 es la temperatura exterior, medida con la sonda. La calibración del aparato de medida y su aplicación a diversos productos forestales puede consultarse en BARCO (2001).

Pasta de celulosa

Para la realización del trabajo se han seleccionado tres tipos de pasta:

- Una pasta mecánica, que conserva prácticamente todos los componentes de la madera salvo algún extracto soluble.
- Una pasta química cruda sin refinar. Se utiliza un tratamiento químico que elimina la mayor parte de la lignina, componentes secundarios y parte de las hemicelulosas.
- Una pasta química blanqueada, en la que además se han eliminado los derivados residuales de la lignina responsables del color oscuro de la pasta.

Para determinar la conductividad térmica se prepararán en el laboratorio hojas de pasta del espesor adecuado (1–3 mm) para el aparato de medida; una vez acondicionadas a 50% HR y 23° C, se determinarán los siguientes parámetros: humedad, gramaje, espesor, densidad aparente y permeabilidad Bendtsen.

En todas las pastas, se medirá la conductividad térmica a tres temperaturas, 35, 50 y 70° C. En las hojas de pasta química acondicionadas vamos a estudiar tres grados de refino. Con los resultados obtenidos se tratará de encontrar relaciones entre la conductividad térmica y las variables antes mencionadas.

Metodología

Para medir la conductividad térmica de los tres tipos de pasta mencionadas, se realizó la siguiente secuencia de operaciones:

- Desintegración de la pasta de celulosa.
- En el caso de la pasta Kraft blanqueada, refino en pila Valley hasta el grado Shopper-Riegler establecido, y medida del mismo.
- Elaboración de las hojas en un formador de hojas de laboratorio. La cantidad de pasta de celulosa empleada en la formación de las hojas obedece a unos requerimientos dimensionales y de espesor de la hoja ya que hay un espesor máximo y mínimo para medir en el aparato.
- Acondicionado de las hojas en cámara climática.
- Medida de las propiedades físicas de las hojas de pasta de celulosa (porosidad, espesor, gramaje...).

- Determinación de la conductividad térmica.

Para determinar la relación entre la conductividad y la temperatura se medirá la conductividad térmica a tres temperaturas 35°C, 50°C y 70°C, para ver su evolución,

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dependencia de la conductividad con la temperatura y el grado Shopper-Riegler.

En primer lugar, se exponen los resultados obtenidos para la pasta Kraft banqueada a tres grados de refino. En la tabla 1 se incluyen las principales propiedades físicas y un resumen de los resultados obtenidos para la medida de la conductividad térmica. Cada dato es el resultado de la medida de la conductividad térmica en tres muestras, y en tres puntos de cada muestra (GONZÁLEZ DE LA ALEJA, 2004; SANTALLA, 2004).

Los resultados de la conductividad térmica se trataron estadísticamente con un diseño multifactorial categórico, obteniéndose los siguientes resultados:

a) Dependencia de la conductividad térmica con el grado Shopper-Riegler: Si representamos el gráfico de medias de la conductividad térmica frente al °SR, figura 2, observamos un pequeño margen de solapamiento de los resultados del °SR 13, 8, con los otros datos; a su vez, los valores de los 31,0 y 59,5 °SR, prácticamente se solapan. Estos resultados nos indican que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias.

b) Dependencia de la conductividad térmica con la temperatura: en la figura 3 se representan las medias de la conductividad térmica frente a la temperatura. Con un razonamiento análogo al anterior, se deduce que los resultados obtenidos para la temperatura de 50 °C, presentan diferencia estadísticamente significativa con los obtenidos a las otras temperaturas.

Con los mismos datos, se realizó un estudio de la variación de la conductividad térmica con el °SR a cada temperatura, y de la variación de la conductividad térmica con la temperatura a cada °SR. Los resultados se incluyen en las figuras 4 y 5. Analizando estos gráficos se concluye que la temperatura tiene influencia en la conductividad térmica, ya que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias obtenidas; sin embargo, esta diferencia no se da al estudiar la influencia del °SR, aunque se observa una tendencia a la disminución de la conductividad térmica al progresar el refino.

Dependencia de la conductividad térmica con otros parámetros físicos

La permeabilidad se define como el volumen medio de aire que atraviesa una unidad de superficie por unidad de tiempo y de diferencia de presión, esto significa que esta muy relacionada con el volumen de poros presentes en las hojas, es decir de la capacidad que tienen las fibras para conformarse entre ellas y adaptarse al tamiz formador dejando los menos espacios posibles entre ellas.

En la tabla 1 se observa que la pasta mecánica es la que da lugar a hojas más permeables, esto es debido a que la pasta mecánica se produce empleando medios físicos y las fibras obtenidas son rígidas, ya que conservan prácticamente la totalidad de la lignina presente en la madera, lo cual hace que se conforman mal a la hora de formar la hoja de papel dejando muchos poros entre ellas.

En las pastas químicas se observa una evolución coherente de la variación de la permeabilidad. La mayor permeabilidad la presenta la pasta Kraft cruda, que mantiene todavía un porcentaje residual de lignina; en la pasta química blanqueada la permeabilidad es baja haciéndose aún menor a medida que progresa en refino, ya que las fibras ganan flexibilidad y se generan cortes en las fibras que se denominan finos que se intercalan en la matriz fibrosa cerrando la hoja.

Si representamos la conductividad térmica de las pastas de celulosa en función de permeabilidad (figura 6), se observa que a medida que disminuye la permeabilidad de las hojas de pasta la conductividad térmica disminuye también a todas las temperaturas. Esto se puede explicar por la diferencia de conductividad existente entre el aire y la celulosa (aislante), con lo que, al haber más espacios rellenos de aire, la conductividad aumenta.

No obstante, estas diferencias pueden ser debidas también al contenido de lignina de la pasta (MOLLEDA *et al*, 2004) por que la lignina es un material mucho más conductor que la celulosa. Al estar muy relacionada la permeabilidad de una hoja de papel con el contenido de lignina de la pasta, sería muy interesante en futuros estudios determinar la influencia de cada uno de estos parámetros.

En la figura 6 se observa que el coeficiente de conductividad térmica de la pasta mecánica y la pasta Kraft cruda aumenta progresivamente con la temperatura. Mientras que en las pasta Kraft blanqueada el máximo de conductividad térmica se alcanza en rangos intermedios de temperatura.

CONCLUSIONES

En este estudio se ha comprobado que la pasta mecánica es mejor conductora térmica que la pasta química en todo el rango de temperaturas analizado, entre 35 °C y 70 °C. Por tanto, se puede concluir que el contenido en lignina es importante en el aumento de la conductividad térmica del papel.

Se ha analizado también la dependencia de la conductividad térmica con varios parámetros físico-químicos. Considerando la temperatura, se observa que influye de forma importante en la conductividad. Sin embargo, la influencia del grado Shopper-Riegler no es tan clara, aunque se puede apreciar una tendencia decreciente al progresar el refino. Por último, teniendo en cuenta la permeabilidad Bendtsen, se observa que la conductividad disminuye con este parámetro.

BIBLIOGRAFÍA.

BARCO MARTÍN, J.D.; 2001 *Medida de coeficientes de transmisión de calor en diversos productos forestales*. Trabajo Fin de Carrera de la E.U.I.T. Forestal. Universidad Politécnica de Madrid.

GONZÁLEZ DE LA ALEJA TEJERA, A.; 2004. *Estudio de la conductividad térmica en pasta de celulosa*. Trabajo Fin de Carrera de la E.U.I.T. Forestal. Universidad Politécnica de Madrid.

HEIKKILÄ, P. & PALTAKARI, J.; 2000. Fundamentals of paper drying. En: M. Karlsson (ed.), *Papermaking Science and Technology*, Vol 9 (Papermaking), capítulo 2. Fapet Oy, Jyväskylä, Finlandia.

LESKELÄ, M. & SIMULA, S.; 1998. Transport phenomena. En: K. Niskanen (ed.), *Papermaking Science and Technology*, Vol 16 (Paper Physics), capítulo 9. Fapet Oy, Jyväskylä, Finlandia.

MOLLEDA, C; GÓMEZ, N.; MANRIQUE, E. y GONZÁLEZ DE LA ALEJA, A.; 2004. Estudio de la influencia del contenido de lignina y porcentaje de humedad en la conductividad térmica de la pasta de celulosa. *Actas del Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel*. (en prensa). Córdoba.

NAKAGAWA, S. & SHAFIZADEH, F.; 1984. Thermal properties. En: R.E. Mark (ed.), *Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard*. Vol II. Capítulo 23. Marcel Dekker, NY.

SANTALLA RODRÍGUEZ, J.; 2004. *Estudio sobre las propiedades térmicas de la pasta de papel. Relación con otras propiedades físico-químicas*. Trabajo Fin de Carrera de la E.U.I.T. Forestal. Universidad Politécnica de Madrid.

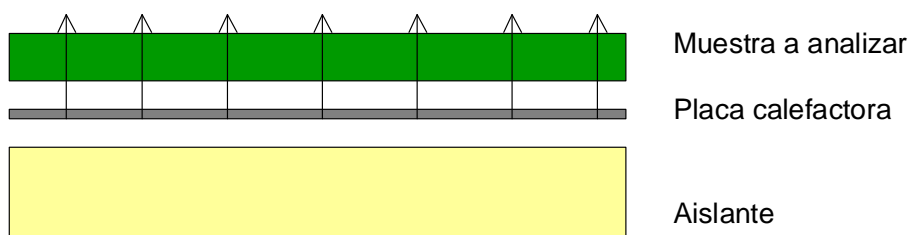


Figura 1: Esquema del banco de ensayos.

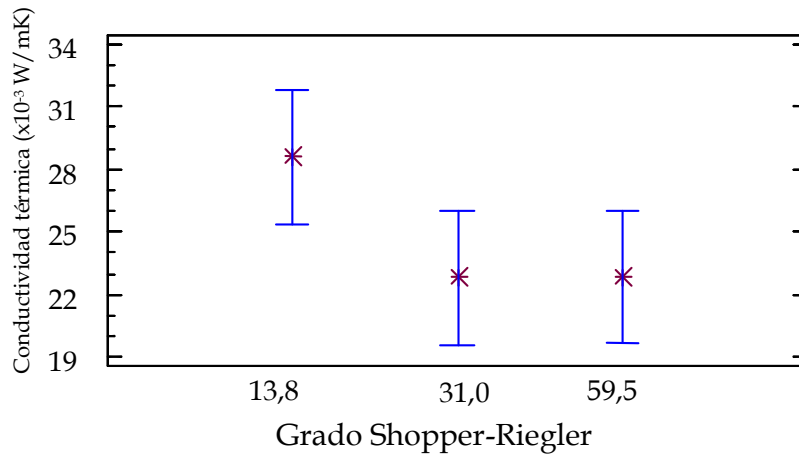


Figura 2: Gráfico de medias de la conductividad térmica según el grado Shopper-Riegler.

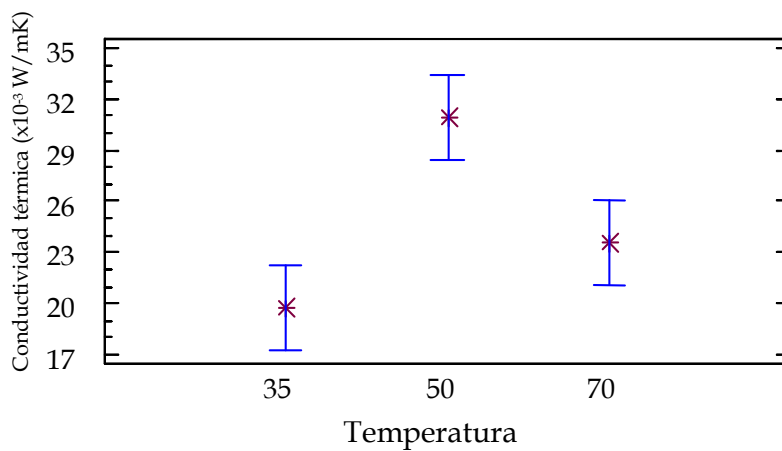


Figura 3: Gráfico de medias de la conductividad térmica según la temperatura.

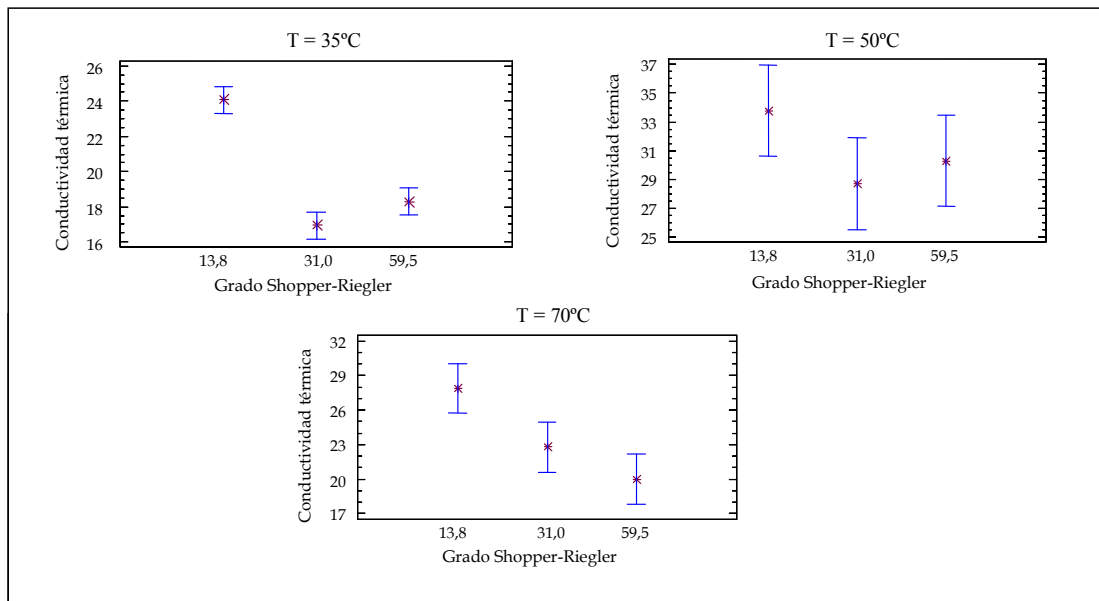


Figura 4: Dependencia entre la conductividad térmica λ ($\times 10^{-3}$ W/mK) y el grado Shopper-Riegler a las diferentes temperaturas de estudio.

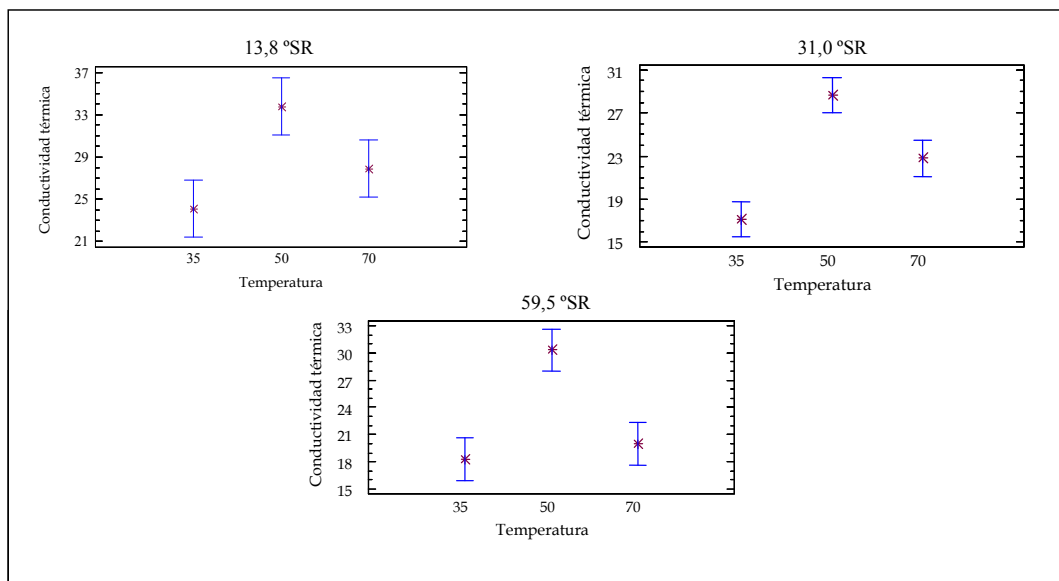


Figura 5: Dependencia entre la conductividad térmica λ ($\times 10^{-3}$ W/mK) y la temperatura a los diferentes grados de refinó.

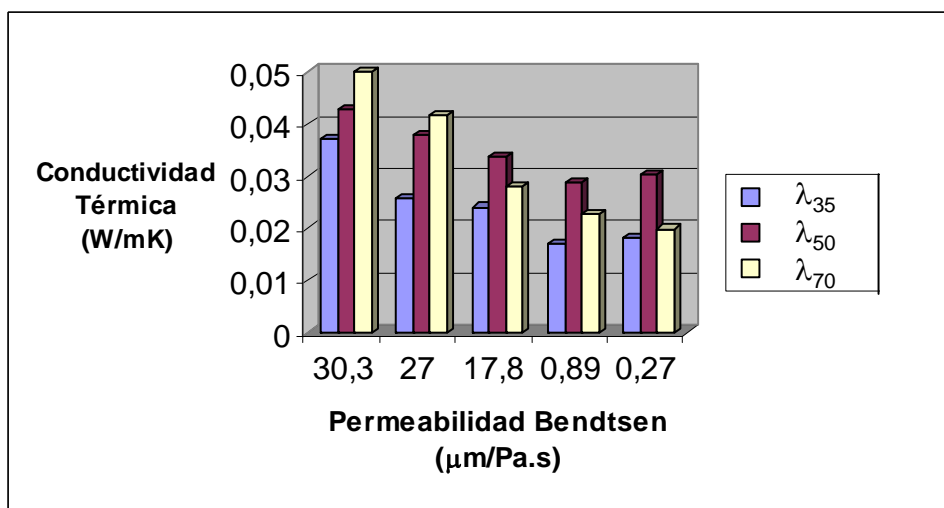


Figura 6: Conductividad térmica λ de la pasta a 35, 50 y 70 °C en función de la permeabilidad Bendtsen.

Tabla 1: Propiedades de las pastas: permeabilidad Bendtsen, conductividad térmica a 35 °C, 50°C y 70°C, densidad aparente y humedad

Propiedad	Permeabilidad Bendtsen (μm/Pa.s)	λ ₃₅ (W/mK)	λ ₅₀ (W/mK)	λ ₇₀ (W/mK)	Densidad aparente (cm ³ /g)	Humedad (%)
Pasta mecánica	30,28	0,03724	0,04270	0,04998	0,27	8,52
Pasta kraft cruda	27,00	0,02581	0,03797	0,04159	0,39	8,01
Pasta kraft blanqueada (13,8 °SR)	17,76	0,02408	0,03378	0,02788	0,49	7,48
Pasta kraft blanqueada (31,0 °SR)	0,89	0,01693	0,02869	0,02278	0,73	7,60
Pasta kraft blanqueada (59,5 °SR)	0,27	0,01828	0,03030	0,01990	0,75	7,78