

ESTUDIO DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE DISTINTOS PAPELES DE IMPRESIÓN Y ESCRITURA

STUDY OF THE ELECTRICAL RESISTIVITY OF DIFFERENT PAPERS FOR PRINTING AND WRITING

Manrique, E*.; Gómez, N.**; Molleda, C.*; Rey, J.*

*Departamento de Ciencias Básicas Aplicadas a la Ingeniería Forestal; EUIT Forestal, Universidad Politécnica de Madrid. Ramiro de Maeztu s/n, 28040 – Madrid.

Teléfono: (34) 91 3367656/7 Fax: (34) 91 5446025, e-mail: emilio.manrique@upm.es
cristina.molleda@upm.es

**Laboratorios de Celulosa y Papel CIFOR-INIA. Ctra. de La Coruña Km 7,5. 28040-Madrid
Teléfono: (34) 91 3476781 Fax: (34) 91 3476767, e-mail: nuria@inia.es

RESUMEN

Las propiedades eléctricas del papel tienen gran interés debido al amplio espectro de sus aplicaciones. En este trabajo se han utilizado varios tipos de papel, de fibra virgen y fibra reciclada, con el fin de comprobar si las propiedades eléctricas dependen de la composición fibrosa y el tratamiento al que se ha les ha sometido.

La resistencia eléctrica se ha medido utilizando un dispositivo que consta de dos electros de geometría circular, entre los que se coloca el papel. A continuación se establece una diferencia de potencial y se determina directamente la resistencia eléctrica en distintas condiciones de humedad relativa. Se ha validado el método de medida utilizando papel de impresión de 80 g/m², comprobándose que los valores obtenidos están dentro de los rangos que se indican en la bibliografía. Una vez que se conocen la resistencia eléctrica, el espesor del papel y la sección de los electrodos, se puede determinar la resistividad de los papeles. A partir de estos resultados se ha buscado una relación entre la resistividad y el contenido de humedad, utilizando diversos modelos de regresión cuya validez se analiza en el trabajo.

Se ha analizado también la influencia de varias propiedades del papel, como la densidad aparente o el contenido de cenizas, discutiéndose la influencia de estas propiedades en la resistividad.

Palabras clave: resistencia, resistividad, propiedades eléctricas del papel

ABSTRACT

The knowledge of the electrical properties of paper is very important due to the great variety of its applications. In this work several types of paper have been used, formed by virgin fibers or recycled fibers, with the purpose of verifying if the electrical properties depend on fiber composition and finishing.

The electrical resistance has been measured using a device that consists of two electrodes of circular geometry with the paper placed between them. When a potential difference is established, the electrical resistance in different conditions of relative humidity is determined directly. The measurement method has been validated using paper of 80 g/m², to confirm that the obtained values are within the limits that are indicated in bibliography.

Once the electrical resistance, the thickness of the paper and the section of the electrodes are known, the resistivity of the papers can be determined. From these results the relationships between resistivity and humidity has been studied, using several regression models and discussing their reliability.

Furthermore, the influence of several properties of the paper has been analyzed, as density or ash content, discussing the influence of these properties in resistivity.

Keywords: Resistance, resistivity, electrical properties of paper

INTRODUCCIÓN

El consumo de papel se ha incrementado notablemente en los últimos tiempos. El comercio electrónico y el correo electrónico tienen en el papel su mejor aliado: es impensable tener un PC sin impresora y los productos llegan al domicilio convenientemente embalados en papel y cartón. Como material, el papel presenta toda una serie de ventajas: renovable, reciclable, con excelentes posibilidades de impresión, ligero y resistente, versátil, etc. Las múltiples variedades de papel existentes son buena prueba de su utilidad como materia prima.

Por las razones antes expuestas es importante conocer las propiedades físicas y químicas del papel y, en particular, sus propiedades eléctricas. El papel se puede usar como dieléctrico en condensadores o como aislante en cables eléctricos. En este sentido se requieren condiciones específicas de conductividad, que se consiguen con pasta muy limpia, libre de electrolitos. Sin embargo, otras aplicaciones requieren el uso de carbón activo o el tratamiento del papel con resinas conductoras (Meinander, 2000).

La resistencia y la resistividad son propiedades esenciales en electricidad. La resistencia, junto con la capacidad, tiene relación con la constante de tiempo que rige los fenómenos de descarga desde la superficie del papel. La carga acumulada tiene efectos indeseables, como la adhesión entre sí de las hojas o problemas con la transferencia de tinta si el signo de las cargas de ésta coinciden con las del papel (Oittinen, 1998) (Tabazeon, 1995).

El paso de corriente eléctrica a través del papel está basado en un mecanismo de tipo iónico. Los iones portadores de carga son cationes que se mueven a través de grupos hidroxilos asociados con moléculas de agua (Murphy, 1960). La concentración de cationes y la humedad del papel son esenciales en la conducción eléctrica a través del mismo (Laskelä and Simula, 1998).

En los párrafos anteriores se ha puesto de manifiesto la importancia de la resistencia eléctrica del papel y su relación con su contenido de humedad; el análisis de esta dependencia y su relación con otras propiedades del papel ha sido el objetivo más importante de este trabajo. El estudio se ha llevado a cabo utilizando distintos tipos de papel, con el fin de comprobar si las propiedades eléctricas varían con la composición fibrosa y/o el tratamiento superficial. Se ha tratado de obtener una serie suficiente de valores para poder analizar la variación de la resistencia eléctrica y de la resistividad con la humedad del papel, en papeles de fibra virgen y de fibra reciclada. Se ha estudiado también la influencia que tiene la composición del papel en la resistividad.

METODOLOGÍA

Se seleccionaron varios tipos de papeles para hacer las pruebas de laboratorio, siendo el principal criterio de selección la composición fibrosa y teniendo en cuenta también el tratamiento superficial recibido. Los papeles seleccionados se pueden clasificar en procedentes de fibra virgen y en procedentes de fibra reciclada:

- Procedentes de fibra virgen:
 - LWCTMP: papel estucado procedente de pasta termo-mecánica.
 - PSCGWQ: papel super-calandrado procedente de pasta mecánica de muela y pasta química.
 - PPMTMP: papel prensa mejorado en blancura procedente de pasta termo-mecánica.
- Procedentes de fibra reciclada:
 - PPDIP: papel prensa procedente de pasta destintada.
 - PPMDIP: papel prensa mejorado en blancura procedente de pasta destintada.
 - PPDIPTMP: papel prensa procedente de pasta destintada. y pasta termo-mecánica.

Para cada papel se determinó el gramaje según la norma UNE-EN ISO 536, el espesor, el volumen específico y la densidad aparente de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 534 y el contenido de materia mineral (cenizas a 900 °C) de acuerdo a la norma UNE 57050.

Para realizar la medida de la resistencia eléctrica se ha empleado el aparato Hochohm Meßserät HM307, fabricado por Fetronic, al que se conectan los electrodos: uno plano que sirve de base y otros dos contenidos en un cilindro (uno circular interior y otro anular exterior) que se colocan encima. Los electrodos así conectados crean un circuito eléctrico como se indica en la figura 1. De esta forma se mide la resistencia de la muestra colocada entre los electrodos superior e inferior, de acuerdo con la ley de Ohm, dividiendo el voltaje aplicado entre la intensidad. Se ha validado el método de medida utilizando papel de impresión de 80 g/m², comprobándose que los valores obtenidos están dentro de los rangos que se indican en la bibliografía (Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard, 1984)

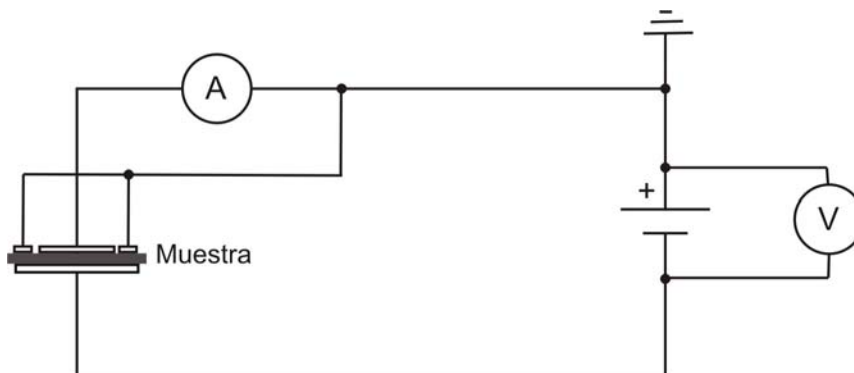


Figura 1: Esquema del circuito eléctrico que corresponde al dispositivo experimental

La resistencia y la resistividad eléctricas de los papeles se ha determinado en cinco condiciones ambientales diferentes:

- Seco (ρ_{seco}): las muestras se introdujeron en una estufa a una temperatura de 105 ± 2 °C, durante un tiempo de 24 a 48 horas, hasta alcanzar su peso constante. Tras sacarlas de la estufa se introdujeron en un desecador con cloruro cálcico escamiforme y las medidas se realizaron cuando las muestras se enfriaron.
- Ambiente (ρ_{ambiente}): se estimó la humedad relativa del aire en el laboratorio en un 30%.
- 50% humedad relativa ($\rho_{50\%}$): las muestras de los diferentes papeles se introdujeron en una cámara climática a 50% de humedad relativa y a 23 °C de temperatura. Permanecieron en dicha cámara durante 48 horas. Después de acondicionadas, las muestras se introdujeron en un desecador con una disolución saturada de sulfato de magnesio heptahidratado, que mantiene las condiciones del aire en el interior del mismo a la humedad requerida.
- 90% de humedad relativa ($\rho_{90\%}$): las muestras se acondicionaron también en cámara climática y en este caso las condiciones ambientales fueron 90% de humedad relativa y 20 °C de temperatura. Se empleó una disolución acuosa saturada de cromato potásico para mantener las condiciones de humedad.
- Papel saturado (ρ_{saturado}): para conseguir un contenido mayor de humedad en el papel se utilizó un humidificador, que expulsa un chorro de vapor frío que se pone en contacto con la muestra, consiguiendo que la humedad del papel supere el 15%.

Para cada tipo de papel se han realizado 12 determinaciones de la resistividad en cada una de las condiciones ambientales indicadas y la humedad se determinó inmediatamente después de cada medida.

La resistividad se ha calculado a partir de la expresión: $\rho = R(A/L)$, donde R es la resistencia eléctrica (Ω), A la sección del electrodo (m^2) y L la distancia entre electrodos (m), que coincide con el espesor de la muestra. Se han calculado las incertidumbres, tanto las debidas a los aparatos utilizados como las debidas a la

aleatoriedad de los datos, a fin de estimar adecuadamente los errores de las magnitudes calculadas. De esta forma se puede afirmar que la mayor parte de las incertidumbres está en torno al 5%.

RESULTADOS

Las propiedades más importantes de cada uno de los papeles son, en valor medio:

Propiedad	Unidades	PPDIP	PPDIPTMP	PPMDIP	PPMTMP	PSCGWQ	LWCTMP
Gramaje	g/m ²	45,9	44,7	48,7	48,4	59,7	65,0
Espesor	mm	0,068	0,070	0,069	0,075	0,049	0,057
Volumen específico	cm ³ /g	1,48	1,56	1,42	1,55	0,82	0,88
Densidad aparente	g/cm ³	0,67	0,64	0,71	0,64	1,22	1,13
Cenizas 900 °C	%	8,34	6,67	8,62	2,40	34,82	26,70

Tabla 1: Características de los distintos tipos de papel

Para cada tipo de papel se obtuvo la resistencia y posteriormente se calculó la resistividad para las cinco situaciones de acondicionamiento que se indicaron anteriormente. En las siguientes tablas se indican los valores de la resistividad de cada tipo de papel y su humedad en cada una de las situaciones indicadas.

Papel	Resistividad				
	ρ_{seco}	ρ_{ambiente}	$\rho_{50\%}$	$\rho_{90\%}$	ρ_{saturado}
LWCTMP	$1,133 \times 10^{17}$	$5,533 \times 10^{14}$	$1,397 \times 10^{14}$	$9,807 \times 10^{11}$	$3,160 \times 10^8$
PSCGWQ	$7,904 \times 10^{16}$	$4,767 \times 10^{14}$	$3,886 \times 10^{14}$	$8,952 \times 10^{12}$	$4,123 \times 10^8$
PPMTMP	$1,807 \times 10^{16}$	$7,833 \times 10^{13}$	$8,997 \times 10^{13}$	$1,885 \times 10^{12}$	$4,089 \times 10^8$
PPDIP	$6,408 \times 10^{16}$	$1,168 \times 10^{15}$	$2,098 \times 10^{14}$	$9,711 \times 10^{11}$	$4,503 \times 10^{11}$
PPMDIP	$7,175 \times 10^{16}$	$1,656 \times 10^{14}$	$1,040 \times 10^{14}$	$9,278 \times 10^{12}$	$4,240 \times 10^8$
PPDIPTMP	$1,401 \times 10^{17}$	$2,356 \times 10^{14}$	$2,814 \times 10^{14}$	$2,032 \times 10^{12}$	$4,076 \times 10^8$

Tabla 2: Valores de la resistividad (Ωm) para los distintos tipos de papeles en las distintas situaciones de acondicionamiento.

Papel	Acondicionado				
	Seco	Ambiente	50% Hr	90% Hr	Saturado
LWCTMP	0	2,37	4,00	7,37	16,45
PSCGWQ	0	2,75	5,41	7,48	15,43
PPMTMP	0	4,39	5,13	10,61	20,37
PPDIP	0	2,54	6,09	10,57	16,84
PPMDIP	0	3,00	5,21	6,57	18,85
PPDIPTMP	0	3,80	6,23	10,47	20,71

Tabla 3: Valores de la humedad (%) de los distintos tipos de papeles en las distintas situaciones de acondicionado.

Tomando los valores de la resistividad ρ como variable dependiente y los valores de humedad del papel h como variable independiente, se buscó la curva que mejor se ajustara a la nube de puntos. Como la resistividad tiene valores muy altos en comparación con la humedad, se planteó transformar la variable resistividad en su logaritmo en base 10. De este modo, se realizó el ajuste lineal por el método de los mínimos cuadrados, con el cambio de variable indicado, de forma que $\rho' = ah + b$, siendo $\rho' = \log \rho$. La ecuación en función de las variables originales sería: $\rho = 10^{(a \cdot h + b)}$

El resumen de los ajustes para cada tipo de papel se muestra en la siguiente tabla, junto con el coeficiente de correlación obtenido en cada caso. El signo negativo de la pendiente a y del coeficiente de correlación ponen de manifiesto la lógica disminución de la resistividad al aumentar la humedad. Todos los modelos lineales son significativos al 95%.

Papel	Ajuste lineal		
	a	b	r
LWCTMP	-0,4990	16,2898	-0,9848
PSCGWQ	-0,5209	16,7865	-0,9882
PPMTMP	-0,3599	15,9137	-0,9944
PPDIP	-0,3068	16,1788	-0,9501
PPMDIP	-0,4079	16,0811	-0,9824
PPDIPTMP	-0,3945	16,6286	-0,9877

Tabla 4: Parámetros de los ajustes lineales $\rho' = ah + b$, ($\rho' = \log \rho$). a y b son números adimensionales y r es el coeficiente de correlación.

El ajuste para el papel con mayor valor absoluto del coeficiente de correlación, PPMTMP, se muestra en la figura:

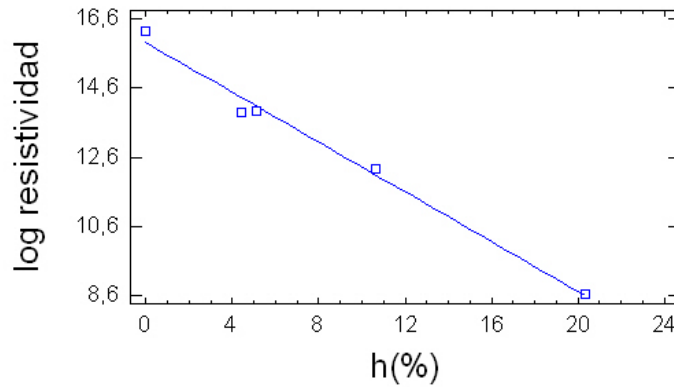


Figura 2: Ajuste lineal de $\log \rho$ frente a h del papel PPMTMP. El coeficiente de correlación es $r = -0,9944$

DISCUSIÓN

Comparación entre los distintos papeles

Si se repren todos los ajustes lineales en un solo gráfico, donde el eje de ordenadas es el logaritmo de la resistividad ($\log \rho$) y el de abscisas la humedad del papel (h) se obtiene la figura 3, donde se observa un comportamiento lineal al igual que los resultados obtenido por Hoover y Carr (1968) para papeles fabricados con pasta química y con estucados plásticos.

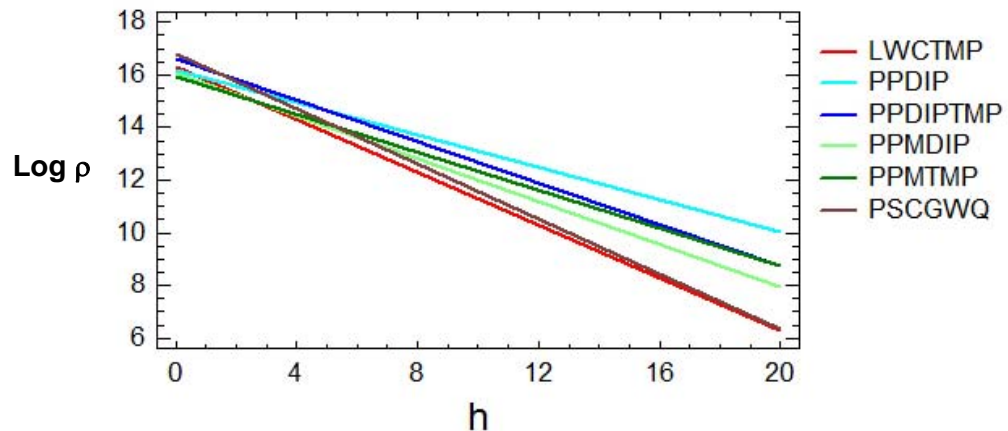


Figura 3: Representación gráfica de $\log \rho$ frente a h para todos los ajustes lineales juntos

En la figura se ha representado un rango de valores de $h\%$ que varía entre 0% y 20%, aunque las humedades de saturación varían según los distintos papeles. El papel con mayor pendiente y por tanto mayor variación con la humedad es el PSCGWQ y el de menor pendiente es el PPDIP. También se observa que no hay diferencias significativas en el valor de la resistividad en función de la composición fibrosa, puesto que no hay una clara diferencia entre papeles semejantes fabricados con fibra virgen (PPMTMP) y fibras destintadas (PPMDIP).

En rangos de humedad por debajo del 4 % se observa que no hay diferencias importantes en el valor de $\log \rho$, lo que quiere decir que hasta que no se supera un contenido crítico de agua en el papel la resistividad es similar para todo tipo de papeles. En un primer momento las moléculas de agua esta asociadas a los grupos hidróxilos de los hidratos de carbono, pero no mediante enlace; cuando la humedad del papel aumenta, se produce una rotura de los enlaces por puente de hidrogeno interfibrilares, provocando la aparición de un número mayor de grupos polares lo que contribuye a la polarización del papel (Tsuge and Wada, 1962)

En rangos de humedad por encima del 4%, se empieza a observar una diferencia de comportamiento entre los papeles en función del tipo de acabado al que han sido sometidos en máquina de papel. El papel estucado (LWCTMP) y el papel supercalandrado (PSCGWQ) presentan para valores de humedad entre el 8 % y 12 unos valores de resistividad inferiores que los papeles que no tienen tratamiento superficial. Esto significa que los papeles tratados superficialmente tienen menor capacidad de generar cargas electrostáticas durante el proceso de impresión, provocando menos problemas en la alimentación de las rotativas, ya que un papel puede alcanzar fácilmente un 8 % de humedad en un taller de impresión climatizado.

Comparación de los ajustes según la densidad y el contenido de cenizas

Si se quiere observar como evolucionan los diferentes papeles en función de su densidad y contenido de materia mineral (cenizas a 900 °C) será necesario considerar también estas variables. Los resultados, ordenados en función de densidad creciente, que coincide con el sentido del porcentaje de materia mineral creciente, son los siguientes:

Papel	%cenizas	Densidad	Ajuste	
			a	b
PPMTMP	2,40	0,64	-0,3599	15,9137
PPDIPTMP	6,67	0,64	-0,3945	16,6286
PPDIP	8,34	0,67	-0,3068	16,1788
PPMDIP	8,62	0,71	-0,4079	16,0811
LWCTMP	26,70	1,13	-0,4990	16,2898
PSCGWQ	34,82	1,22	-0,5209	16,7865

Tabla 5: Parámetros del ajuste lineal $\rho' = a + bh$ ($\rho' = \log \rho$), junto con la densidad (g/cm^3) y el contenido de cenizas (%) de cada papel.

Los papeles estucados y calandrados ocupan las últimas posiciones de la tabla, por tener más densidad y mayor contenido de materia mineral.

La variabilidad de la resistividad con la humedad viene dada por la pendiente a , siendo b la ordenada en el origen, es decir, $\log \rho$ cuando $h = 0\%$. Se pueden establecer correlaciones entre estos parámetros a y b con las variables densidad y % de cenizas. Las correlaciones de la ordenada en el origen no dan resultados significativos, aunque es cierto que el papel menos denso (PPMTMP) tiene el valor de b más bajo (15,9137) y el papel más denso (PSCGWQ) tiene el valor más alto (16,7856).

Sin embargo las correlaciones de la pendiente ' a ' con cualquiera de las variables densidad o porcentaje de materia mineral sí muestra resultados significativos al 99%; la recta de ajuste es la siguiente:

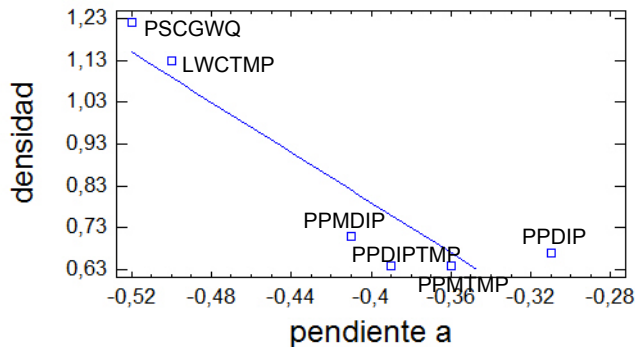


Figura 4: Ajuste lineal de la densidad frente a la pendiente ' a '

En la figura se observan perfectamente los dos grupos que se han formado: los papeles estucados y calandrados, en la parte de la izquierda, con mayor densidad y mayor valor absoluto de la pendiente y el resto en la parte derecha de la gráfica.

CONCLUSIONES

En los experimentos realizados se observa que la resistencia eléctrica de las muestras tiene una estrecha relación con el contenido de humedad, aunque hay otros factores que influyen en el comportamiento eléctrico de los papeles. En el presente trabajo se han considerado la densidad y el contenido de cenizas.

Se ha ajustado linealmente el logaritmo de la resistividad $\rho' = \log \rho$ frente a la humedad del papel h , obteniéndose siempre, como cabía esperar, signos negativos de la pendiente a y del coeficiente de correlación, al disminuir la resistividad con el contenido de humedad. Los ajustes tienen siempre buena significación estadística.

En rangos de humedad por debajo del 4 % no hay diferencias importantes en el valor de $\log \rho$, lo que quiere decir que hasta que no se supera un contenido crítico de agua en el papel la resistividad es similar para todos los papeles.

Cuando se consideran las variables densidad y contenido de cenizas a 900°C, los papeles estucados y calandrados, con mayores valores de estos parámetros, tienen también mayores pendientes en valor absoluto y por tanto mayor variabilidad de la resistividad con la humedad. De hecho, los ajustes lineales realizados separan claramente las muestras en dos grupos en función de estas propiedades.

BIBLIOGRAFÍA

Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard (1984) Volume 2. Ed. By R. E. Mark. New York: Marcel Dekker. ISBN 0-8247-7052-8

Hoover, M. F.; Carr, H.E. (1968) Performance-structure relationships of electroconductive polymers. Tappi 51 (12), p. 552-559.

Leskelä, M.; Simula, S. (1998). Transport Phenomena. In: Paper Physics. Ed. by K. Niskanen. Helsinki: Fapet Oy, p. 285-317. ISBN 952-5216-16-0

Meinander, P.O. (2000). Specialty papers. In: Paper and Board Grade. Ed. by H. Paulapuro. Helsinki: Fapet Oy, p. 101-130. ISBN 952-5216-18-7

Murphy, E.J. J. (1960) The dependence of conductivity of cellulose, silk, and wool on their water content. Phys. Chem. Solids, 16:115.

Printing (1998). Ed. by P. Oittinen and H. Saarelma. Helsinki: Fapet Oy, ISBN 952-5216-13-6

Tabazeon, R. (1995) Electrical Phenomena of Dielectric Materials. In: Handbook of Electrostatic Processes. Ed. by A.J.Kelly and J.M. Crowley. New York: Marcel Dekker, p. 51-82.

Tsuge, K.; Wada, Y. (1962) Effect of sorbed water on dielectric dispersion of cellulose at low frequencies. J. Phys. Soc. (Japan) 17 (1), 156-164.