

# Propiedades eléctricas de la madera:

## Conductividad, Comportamiento Dieléctrico y Piezoelectricidad

Por: José Javier Fernández-Golfín Seco

Profesor titular de la Cátedra de Electrotecnia  
de la ETS de Ingenieros de Montes

### LA CONDUCTIVIDAD DE LA MADERA. FACTORES INCIDENTES

#### La Madera como Receptor

El estudio del comportamiento de la madera como elemento pasivo de un circuito eléctrico, resulta muy interesante por permitir su consideración como cuerpo aislante, moderadamente conductor o bien como conductor.

Es un hecho admitido que la madera se comporta en general como cuerpo aislante, pero frente a esta creencia más o menos universal se deben matizar algunos aspectos, analizando los factores que inciden especialmente en ese comportamiento.

A lo largo del presente siglo numerosos científicos de todo el mundo han estudiado este tema, permitiendo relacionar la conductividad o resistividad de la madera con factores incidentes en ella, como humedad, temperatura, contenido en sales, ... etc.

Recordando que la resistencia que al paso de la corriente ofrece un receptor, se puede sintetizar en la fórmula

$$R = r \frac{l}{s}$$

siendo:

R = Resistencia eléctrica (ohmios)  
r = Resistividad del material (ohmios x cm)  
l = Longitud del elemento resistor (cm)  
s = Sección del elemento resistor (cm<sup>2</sup>)

se puede apreciar que estudiar la resistividad que presenta la madera supone estudiar la resistencia misma y en suma su comportamiento como elemento pasivo de un circuito eléctrico.

La resistividad r, o su inversa la conductividad, en productos minerales homogéneos y estables como el cobre o el aluminio se puede considerar prácticamente constante a excepción de grandes variaciones de temperatura.

El hecho de que la madera sea un producto directo de la naturaleza y no sujeto al control de ningún proceso de elaboración industrial configura unas respuestas variables como receptor que dependerán de su estado de presentación.

#### INFLUENCIA DE LA HUMEDAD

La humedad de la madera es el factor que más influye en su resistividad.

Fruto de numerosas experiencias, Stamm en 1929, llega a una relación entre h, grado de humedad, y r resistividad.

$$\log \cdot r = c - a \cdot h$$

o bien,

$$r = D \cdot e^{-bh}$$

siendo, c, a, D y b constantes.

Stamm, realiza las experiencias sobre sequoia sempervirens, sometida a grados de humedad entre el 8% y el 170%, encontrando la fórmula anterior como válida para humedades inferiores al punto de saturación de la fibra (p. s. f.) (30%).

Nusser, confirma los trabajos de Stamm, y en 1938, concreta los coeficientes, expresando la relación

$$r = 1,78 \times 10^{13} e^{-0,736 \cdot h}$$

válida sin grandes errores, en un intervalo de humedad comprendido entre el 8 - 18%.

Entre tanto, Suits y Dunlap, en 1931, dan una relación con un campo de aplicación más amplio, hasta un 28% de humedad.

$\log\left(\log\frac{1}{r}\right) = c \times h$  siendo c una constante

Denominador común de todas estas experiencias es el hecho de que en humedades comprendidas desde 0 al 30% (p. s. f.) la conductividad se multiplica aproximadamente por  $10^6$ . A partir del p. s. f. el incremento de humedad produce muy poco incremento de la conductividad.

El funcionamiento de los xilohigrómetros de resistencia está apoyado sobre la fórmula de Nusser, que se considera suficientemente fiable en humedades del 8% al 18%.

### INFLUENCIA DEL CONTENIDO IONICO

Hearle, en 1953, formuló su teoría según la cual la conductividad de la madera se debe más bien a la existencia de iones que la estructura electrónica.

Brown, en 1963, y Lin, en 1965, dan una relación apoyándose en las teorías de Hearle, que liga resistividad y humedad.

$$\log r = G + \frac{L}{f(h)}$$

siendo,

$$f(h) = 3,93 \times 10^{0,0242h} \quad \text{y } G \text{ y } L \text{ constantes}$$

Esta relación también se muestra válida en un entorno de humedad de 0 a 15%.

Continuando estas experiencias se ha llegado a determinar que contenidos altos de sales solubles cuando el grado de humedad supera los 10-12% incrementan notablemente la conductividad.

Este tema es importante pues los postes de madera utilizados para tendido eléctrico, que deberán ser tratados con diferentes sustancias conservantes, no lo podrán ser con aquéllas que incorporen sales solubles, pues se estará aumentando la conductividad.

### INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

También la temperatura influye en el comportamiento resistivo de la madera.

En experiencias realizadas por Clark y Williams (1933), llegó a probarse que un incremento de la temperatura aumenta la conductividad, y que

ambas guardan una relación lineal dada por la fórmula

$$r = 10\left(0,8 + \frac{5000}{T}\right)$$

siendo,

T la temperatura absoluta en grados Kelvin.

Se puede afirmar que prácticamente la conductividad eléctrica se dobla cada  $10^{\circ}C$  de incremento de temperatura.

### INFLUENCIA DE LA DIRECCION DE LA CORRIENTE

La madera, por la peculiaridad de su estructura, no presenta las mismas propiedades en sus tres direcciones clásicas: longitudinal, radial y tangencial.

Ya en 1915, Hiruma, sacó esta conclusión que fue ratificada en 1927 por Stamm.

Stamm, viene a afirmar que la resistividad en la dirección tangencial viene a ser el doble que en la dirección longitudinal.

Por otra parte, la resistividad en la dirección radial es aproximadamente un 10% inferior que en la dirección tangencial.

De acuerdo con los estudios, de Stamm, puede darse la siguiente tabla:

Especie	Humedad %	Resistividad en $M \Omega \times cm$		
		$r_l$	$r_t$	$r_r$
Thuja plicata.....	14	9	24	22
Picea sitchensis .....	15,7	10	20	18
Pseudotsuga faxifolia	15,3	11	23	21

### OTROS FACTORES INCIDENTES

Podría pensarse en otros factores incidentes, como por ejemplo, especie y densidad pero es un hecho probado que no tienen una importancia digna de mención.

El hecho fundamental es el comportamiento de un producto, la madera, mayoritariamente compuesto por celulosa con independencia de densidad y especie.

Frente a la incidencia de la humedad o la temperatura, la especie no tiene relevancia.

### CONSECUENCIA DEL ESTUDIO DE LA CONDUCTIVIDAD

Del estudio de la conductividad de la madera, se derivan las posibilidades que puede ofrecer en

aplicaciones de diversa índole, que tenga que ver con la electricidad.

El saber hasta qué punto y en qué condiciones la madera se comporta como aislante, delimita su ámbito de utilización.

Por otra parte, sobre el estudio de la resistividad, que presenta la madera con respecto a la humedad, se apoya el principio de funcionamiento de los xilohigrómetros, aparatos diseñados para medir humedades.

Conocida la curva de evolución de la resistividad y la humedad, bastará medir resistividades para poder conocer humedades.

Los xilohigrómetros suelen actuar con corrientes continuas, del orden de 30 V de tensión.

No se ha hecho mención a las resistividades ante la corriente alterna, que son mucho menores. En este sentido, Skaar, en 1948, comprobó que con C. A. de alta frecuencia (2 megaciclos por segundo) la conductividad registrada, a igualdad de otros factores era  $10^{12}$  veces menor que con C. C.

La conductividad ante la C. A. depende, por otra parte, en menor medida de la humedad, y tiene particular interés en el comportamiento dieléctrico de la madera.

## EL COMPORTAMIENTO DIELECTRICO DE LA MADERA Y SU APLICACION AL SECADO POR RADIOFRECUENCIA

### La Madera como Dieléctrico

La madera puede ser sometida al campo eléctrico de dos electrodos de distinta polaridad. En este caso se habría formado un condensador con la madera como dieléctrico.

Es importante el estudio del comportamiento de la madera como dieléctrico, pues de él se derivan una serie de aplicaciones y consecuencias de indudable interés tecnológico.

El comportamiento dieléctrico de la madera podemos cifrarlo en su constante dieléctrica  $\epsilon_m$ . Esta constante dieléctrica será la relación entre la capacidad que tendría un condensador de una determinada geometría que tuviera por dieléctrico madera y la capacidad de ese mismo condensador que tuviera aire ( $\epsilon \approx 1$ ) como dieléctrico.

Si se comparan las dos capacidades de ese condensador (plano)

$$C_m = \frac{\epsilon_m \epsilon_0 S}{d} \quad C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$
$$\frac{C_m}{C} = \epsilon_m$$

siendo, S = Superficie de las armaduras  
d = Distancia entre ellas

Los cuerpos dieléctricos cuando son atravesados por un campo eléctrico experimentan transformaciones en su interior, que dan lugar a que las leyes que son válidas en el vacío necesiten un factor de corrección, cuando se aplican en un medio dieléctrico.

En un cuerpo dieléctrico las cargas eléctricas no pueden moverse libremente y ante la acción de dos armaduras de distinto signo, es decir, situado en el seno de un campo eléctrico, el cuerpo dieléctrico sufre un fenómeno llamado polarización, consistente en la orientación de los centros de gravedad eléctricos (positivo: núcleo de los átomos) y (negativo: corteza electrónica) de las moléculas que lo constituyen.

Las moléculas del cuerpo dieléctrico se comportan, son de hecho, dipolos eléctricos.

Las cargas que constituyen el dipolo no son libres como ocurre en los cuerpos conductores, sino que sólo se orientan cuando el cuerpo dieléctrico se polariza por la acción de un campo eléctrico.

En la madera son las cadenas moleculares de celulosa las que tienen estructura polar y se orientan en cuanto se las somete a un campo eléctrico.

La constante dieléctrica  $\epsilon_m$  viene a concretar la facilidad de polarización, siendo más alta cuanto mayor sea ésta.

Evidentemente, la condición de un cuerpo de dieléctrico lleva aparejada su condición de aislante, aunque no sean términos equivalentes.

### FACTORES INCIDENTES EN LA CONSTANTE DIELECTRICA

La madera que no es un producto sujeto al control de ningún proceso de elaboración industrial, presenta una constante dieléctrica que depende de factores variables.

a) Peso específico:

Estudios realizados por Skaar, en 1948, pusieron de manifiesto que la constante dieléctrica es proporcional al peso específico  $p_0$ , estando la razón comprendida entre 1,8 y 3 cuando la dirección del campo es radial con respecto a los anillos de crecimiento.

Asimismo, también se deben a Skaar las experiencias que determinan los distintos valores de  $\epsilon_m$ , dependiendo de la dirección del campo con respecto a la de las fibras.

Así,  $\epsilon_{mr} \approx \epsilon_{mt} \approx$  de 1,3 a 1,6  $\epsilon_{ml}$

### b) Humedad

También se ha determinado la relación entre la  $\epsilon_m$  y la humedad que tiene la madera.

En el límite podría considerarse para maderas ligeras saturadas de agua una constante dieléctrica similar a la propia del agua.

Kröner, en 1944, trabajando con tensiones alternas de gran frecuencia ( $10^6 - 10^9$  ciclos por segundo) estableció que para grados de humedad (h) menores del 12% la relación entre  $\epsilon_m$  y h era lineal y seguía la siguiente ley:

$$\log \cdot \epsilon_m = (1 - h') \log \epsilon_s + h' \log \epsilon_{\text{agua}}$$

siendo,

- $\epsilon_m$  = Constante dieléctrica de la madera
- $\epsilon_s$  = Constante dieléctrica de la madera seca
- $\epsilon_{\text{agua}}$  = Constante dieléctrica del agua
- h = Contenido de humedad sobre peso seco
- h' = Contenido de humedad sobre peso húmedo
- $P_h$  = Peso de la madera húmeda
- $P_s$  = Peso de la madera seca

relación que puede escribirse,

$$\log \epsilon_m = \frac{1}{1+h} \log \epsilon_s + \frac{h}{1+h} \log \epsilon_{\text{agua}}$$

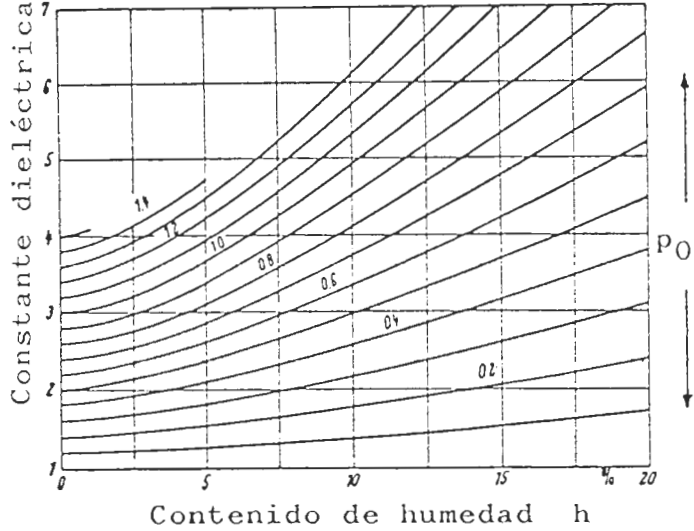
siendo,

$$h = \frac{P_h - P_s}{P_s} \text{ y } h' = \frac{P_h - P_s}{P_h}$$

La formulación de Kröner se cumple con exactitud hasta un 12 % de humedad, aunque puede darse por válida hasta  $h = 16$  %. Para grados de humedad comprendidos entre 16 % y 30 % (punto de saturación de la fibra) no se sabe con rigor qué función siguen la  $\epsilon_m$  y la h, en cambio si se conoce que a partir del p. s. f. la relación vuelve a ser lineal.

### c) Peso específico y humedad

Como resultado de las variaciones de  $\epsilon_m$  con el peso específico y con la humedad, Skaar, evaluó una variación conjunta plasmándola en las curvas que aparecen a continuación:



### COMPORTAMIENTO EN EL CIRCUITO

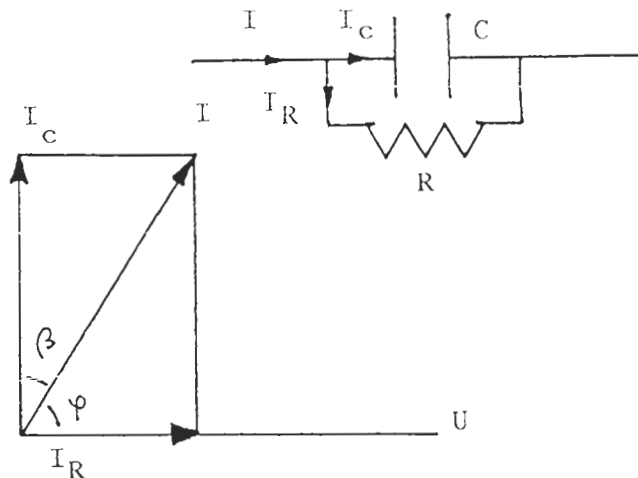
El condensador formado por dos electrodos de distinta polaridad separados por un dieléctrico de madera al someterlo a una corriente alterna presenta el comportamiento característico de una impedancia.

Por una parte está el hecho de que como tal condensador presenta una capacitancia.

Por otra parte, sucede que, como la tensión es alterna, el campo en el interior del dieléctrico es alternativo y la polarización que sufren las cadenas moleculares de celulosa también lo es. Esta continua polarización alternativa, realizada a alta frecuencia se traduce en una continua reorientación de los dipolos que sufren una vibración generadora de calor.

El hecho de que se disipe calor, permite establecer un circuito equivalente y estudiar el comportamiento del condensador.

El circuito equivalente, será:



$$\cos \varphi = \frac{I_R}{I} ; I = \sqrt{I_C^2 + I_R^2}$$

Ahora bien, debido a la resistencia R, la  $I_R$  será muy pequeña en comparación con  $I_C$  y se puede admitir  $I \approx I_C$  sin error apreciable.

$$\text{En este caso, } \cos \varphi = \frac{I_R}{I_C} = \text{tg } \beta = \frac{X_C}{R}$$

$$\text{dado que, } I_R = \frac{U}{R} ; I_C = \frac{U}{X_C}$$

$$\text{siendo } X_C = \frac{1}{\omega C} \text{ y } \omega = 2 \pi f$$

$$\text{por lo que, } \cos \varphi = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{2 \pi f C}$$

$$\text{pero, } C = \frac{\epsilon_m \epsilon_o S}{d}$$

$$\text{por lo que, } \cos \varphi = \frac{1}{R} \cdot \frac{d}{2 \pi f \epsilon_m \epsilon_o S}$$

$$\text{sabido que, } R = r \frac{d}{s} ; \frac{1}{R} = \frac{s}{r d}$$

$$\cos \varphi = \frac{s}{r d} \cdot \frac{d}{2 \pi f \epsilon_m \epsilon_o S} = \frac{1}{2 \pi f \epsilon_m \epsilon_o r}$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{2 \pi f \epsilon_m \epsilon_o r}$$

Relación interesante que da la variación de la constante dieléctrica en función del factor de potencia para una frecuencia y resistividad sabidas de antemano. (Obviamente la resistividad habrá de ser considerada bajo corriente alterna).

Si se quiere calcular la potencia disipada en la resistencia R se debe plantear,

$$P = \frac{U^2}{R} = U^2 \frac{1}{R}$$

$$\text{pero } \frac{1}{R} = \frac{\text{tg} \cdot \beta}{X_C} = 2 \pi f C \text{tg} \cdot \beta$$

$$\text{y si se admite que } \text{tg} \cdot \beta \approx \cos \varphi$$

$$P = U^2 2 \pi f C \cos \varphi = U^2 2 \pi f \frac{\epsilon_m \epsilon_o S}{d} \cos \varphi$$

$$P = U^2 2 \pi f \frac{\epsilon_m \epsilon_o S}{d} \cos \varphi$$

si se expresara por  $\text{cm}^3$  ( $S = 1 \text{ cm}^2$  y  $d = 1 \text{ cm}$ )

$$P = U^2 2 \pi f \epsilon_m \epsilon_o \cos \varphi$$

El factor de potencia y la potencia misma tienen un interés muy grande debido a que van a permitir evaluar el calentamiento que se dispararía en el condensador.

Se ha visto que el f. d. p. de una madera es variable con la dirección del campo, llegando a ser en el sentido longitudinal doble que en el sentido tangencial, para un grado de humedad del 7 %. Por otra parte, el f. d. p. aumenta con la humedad.

En experiencias realizadas por Skaar, en 1948, se pudo apreciar que el f. d. p. es alto para altas frecuencias (del orden de 15 Megaciclos por segundo) y humedades por debajo del 16 %.

Los resultados obtenidos por distintos investigadores fueron similares, viéndose que la especie no tenía importancia y que, en cambio, lo sustancial era, como formuló Kröner en 1944, el contenido de celulosa, lignina y resina.

#### APLICACION AL SECADO, POR RADIOFRECUENCIA

Directa aplicación del comportamiento dieléctrico de la madera, es el aprovechamiento del calor disipado al someterla a campos alternantes de alta frecuencia.

Como ya se expuso, la continua polarización alternante, que sufren las cadenas moleculares de celulosa, produce en ellas un estado de vibración que genera calor.

Si la frecuencia es convenientemente alta, el f. d. p. también será alto, así como la potencia disipada en forma de calor.

Este calor será capaz de secar la madera reduciendo su grado de humedad.

La ventaja del secado por radiofrecuencia es que seca la pieza en todos los puntos por igual, rebajando uniformemente el grado de humedad en todo su volumen.

Esto es interesante fundamentalmente en el secado o fraguado de colas, de piezas de madera gruesa.

En piezas de gran grosor, si se procede a la aplicación de una fuente calorífica superficial, el calor va propagándose hacia el interior en forma de onda, y tal vez, cuando llegue a la línea media la zona superficial haya estado excesivo tiempo en contacto con la fuente, pudiéndose quemar en consecuencia.

La aplicación de radiofrecuencia evita esta

posibilidad, pues no hay tal onda de calor, sino total uniformidad en el secado o fraguado.

No obstante, con ser una solución técnicamente viable, puede no ser económicamente aconsejable, y el técnico deberá calibrar cuidadosamente los costos antes de optar por una solución u otra.

## LA PIEZOELECTRICIDAD DE LA MADERA

La piezoelectricidad, o el efecto piezoeléctrico, es una propiedad eléctrica más que la madera presenta, si bien, no es demasiado conocida.

Su descubrimiento tuvo lugar en 1940, por un científico ruso, Shubnikov, cuyos estudios fueron posteriormente ampliados en los años 50 y 60 por distintos equipos rusos, estadounidenses y japoneses.

Dos, son las formas en que vieron que puede estudiarse el efecto piezoeléctrico.

—Como la polarización eléctrica, ocasionada por la aplicación de un esfuerzo mecánico.

—Como las tensiones mecánicas que introduce un estado de polarización eléctrica.

Por la propia naturaleza del efecto piezoeléctrico, se admitió desde los comienzos de su estudio que la particular estructura de la madera era el factor fundamental, y así, en un principio se atribuyeron las propiedades piezoeléctricas a la estructura cristalina de las moléculas de celulosa.

Esta afirmación rigurosa fue matizada en posteriores estudios, al comprobar la diferencia existente entre la estructura de la madera y la de materiales cristalinos inorgánicos. Se precisó que el comportamiento de la madera, con estar fuertemente condicionado por la estructura molecular de la celulosa, también depende de su estructura macroscópica y microscópica, de la estructura de la pared celular y de sus constituyentes básicos, aspectos todos ellos que conjuntamente ofrecen una respuesta integrada.

La línea de trabajo que, en el estudio de la piezoelectricidad de la madera, se ha seguido, obedece al primer planteamiento expuesto, es decir, a analizar la polarización eléctrica ocasionada por aplicación de esfuerzos mecánicos.

A continuación se pasará revista a las experiencias realizadas.

### EXPERIENCIAS REALIZADAS

Bazhenov, en 1961, realizó experimentos sometiendo la madera a ensayos de compresión

con los que llegó a establecer a través del análisis vectorial unas relaciones entre la polarización producida y las tensiones aplicadas.

Estas tensiones productoras de piezoelectricidad son ocasionadas por la cizalladura de las fibras.

Las relaciones halladas fueron:

$$P_x = d_{11}f_x + d_{12}f_y + d_{13}f_z + d_{14}t_{yz} + d_{15}t_{zx} + d_{16}t_{xy}$$

$$P_y = d_{21}f_x + d_{22}f_y + d_{23}f_z + d_{24}t_{yz} + d_{25}t_{zx} + d_{26}t_{xy}$$

$$P_z = d_{31}f_x + d_{32}f_y + d_{33}f_z + d_{34}t_{yz} + d_{35}t_{zx} + d_{36}t_{xy}$$

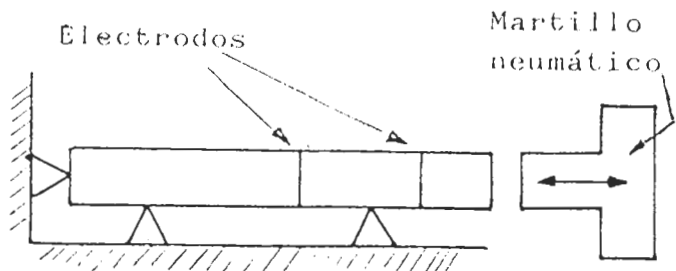
Siendo,  $P_x$ ,  $P_y$  y  $P_z$ , las componentes de la polarización  $P$ ,  $f_x$ ,  $f_y$  y  $f_z$ , las fuerzas de compresión aplicadas, y  $t_{yz}$ ,  $t_{zx}$  y  $t_{xy}$ , las tensiones de cizalladura según los planos  $yz$ ,  $zx$  y  $xy$ . Los coeficientes que relacionan estas magnitudes se llaman módulos piezoeléctricos.

En la medida en que el comportamiento ante los esfuerzos se asemeje más al de una estructura cristalina así aparecerán simetrías que anularán determinados coeficientes.

Para Bazhenov, la intensidad de la piezoelectricidad en la madera depende del grado de cristalinidad y del ángulo de orientación de los cristalitos.

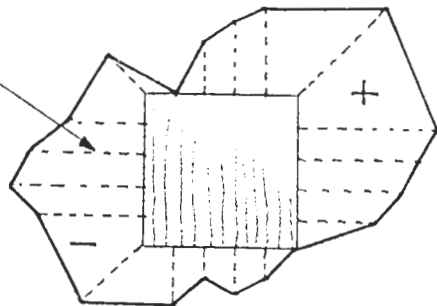
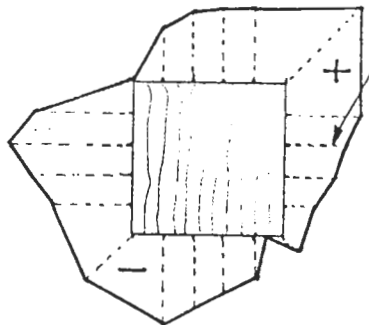
Otro científico, Galligan, en 1963, realizó estudios de la piezoelectricidad de la madera, en los que la sometió a ensayos de compresión, por medio de un martillo neumático, midiendo los voltajes piezoeléctricos en diferentes secciones de la probeta.

Un esquema simplificado, sería:



A lo largo de las secciones a y b los electrodos detectan unos voltajes cuya distribución será positiva y negativa, según la zona.

Voltajes en mV



Galligan introdujo un parámetro definitorio de la piezoelectricidad, que fue la media de las medias de los voltajes positivos registrados en cada sección. Este factor se vio que es directamente proporcional a la densidad de la madera, pero no se encontró en cambio relación alguna con el ancho de los anillos de crecimiento anuales.

También se demostró una relación lineal entre este factor piezoeléctrico y el módulo estático de elasticidad.

Bazhenov, por su parte, había visto que un incremento de los esfuerzos piezoeléctricos se correspondía con un incremento en el módulo de elasticidad.

Por otro lado, en Japón, Koara, en 1958, investigó, apoyándose en la piezoelectricidad, la evolución en el tiempo de la resistencia a compresión de determinadas maderas muy utilizadas en construcción.

En estos estudios se llegaron a relacionar con la edad de la madera tres factores característicos:

- El módulo dinámico de Young
- El módulo piezoeléctrico  $d_{25}$
- Las fuerzas de compresión

Para Koara, el comportamiento de la madera sometida a esfuerzos de compresión, es variable en el tiempo, y viene a ser el óptimo a los 350 años, decreciendo en forma lineal por encima de esa edad.

La causa de estos efectos se atribuyó a los cambios que el tiempo opera en la cristalinidad de la celulosa.

## CONCLUSIONES

Los estudios de la piezoelectricidad que se han venido citando relacionan siempre la polarización producida con las fuerzas aplicadas, analizando la incidencia de diversos factores cuales son: densidad, módulos de elasticidad, e incluso edad. Una evaluación de todos ellos permite concluir que la piezoelectricidad se revela como una herramienta útil para la realización de ensayos no destructivos, encaminados a conocer cual será la respuesta de la madera frente a la aplicación de cargas.

La particular conformación de la estructura de una madera con su densidad, nudos, edad, contenido de celulosa, etc., propiciará una respuesta específica que podrá ser evaluable a través del conocimiento de su piezoelectricidad.