



Introducción a la conductividad eléctrica en materiales metálicos. Efecto de alear y modificar la microestructura. Método de ensayo

Apellidos, nombre	Rayón Encinas, Emilio (emraen@upvnet.upv.es)
Departamento	Ingeniería Mecánica y de Materiales
Centro	Universitat Politècnica de València

1 Resumen de las ideas clave

Los materiales metálicos suelen presentar buenas propiedades conductoras de calor y electricidad, sin embargo, siempre existe cierta resistencia al paso de corriente eléctrica. Esta restricción de conductividad genera pérdidas energéticas y debe ser considerada por el ingeniero en el diseño de la línea. Con este fin, se suele consultar la hoja de características de un hilo conductor y en raras ocasiones realizar un ensayo experimental para determinar la resistividad real del metal.

Por otro lado, suele ser necesario llegar a un compromiso entre propiedades eléctricas y resistentes, además de otras características propias de un material como la densidad (afecta al peso de la línea). Por desgracia, los ingenieros eléctricos y electrónicos no suelen profundizar en la naturaleza microestructural del material que gobierna las características tanto eléctricas como resistentes del mismo. Estas propiedades pueden modificarse mediante la elección del material, uso de aleantes e incluso, tratamientos mecánicos y térmicos.

Este artículo pretende servir de introducción a la propiedad de conductividad eléctrica de los metales desde el punto de vista de la naturaleza del metal, es decir, relacionaremos la historia térmica y el procesado del cable con sus propiedades conductoras y resistentes. Además, se propondrá un sencillo método experimental para determinar empíricamente la conductividad. El documento será de interés para estudiantes de grado relacionados con las ingenierías y máster en ciencia de materiales, electricidad y electrónica. Es recomendable haber adquirido conocimientos previos a nivel básico sobre, enlace químico y cristalografía, así como conceptos generales sobre tipos de deformación mecánica y metalografía.

2 Objetivos

Una vez finalices la lectura de este documento, habrás alcanzado las siguientes habilidades:

- Adquirir los conceptos necesarios para modelizar el comportamiento eléctrico de un hilo conductor metálico, esto es, comprender el concepto de conductividad y resistividad de un material metálico.
- Descubrirás una configuración experimental muy sencilla que permite determinar empíricamente la conductividad/resistividad eléctrica de un material metálico a temperatura ambiente.
- Sabrás relacionar cómo afecta la historia térmica y mecánica en la microestructura de un cobre y por lo tanto, cómo se comportará desde un punto de vista eléctrico y mecánico.
- Serás capaz de proponer tratamientos para mejorar la conductividad de un metal
- Descubrirás alguna aplicación basada en los mecanismos descritos.

3 Introducción

Los materiales metálicos presentan una elevada conductividad eléctrica al aplicar una fuerza electromotriz (f.e.m.) entre dos puntos del mismo. Esta f.e.m. suele generarse mediante una diferencia de potencial eléctrico (E, volts) o mediante potenciales galvánicos. Bajo este potencial, los electrones deslocalizados o débilmente enlazados, circulan por el seno del material dada su carga negativa, generando lo que comúnmente denominamos, corriente eléctrica. Como curiosidad, citar que esta nube electrónica débilmente enlazada en la estructura cristalina del metal, otorga la capacidad de flujo electrónico, pero también la de elevada conducción térmica, la característica de brillo y elevada sensibilidad a la oxidación de estos materiales.

Sin embargo, la movilidad de las cargas eléctricas en el seno del metal no es ilimitada. Los electrones encuentran obstáculos que dificultan su desplazamiento y esta restricción genera lo que comúnmente denominamos *resistividad eléctrica*. Los electrones pueden desplazarse solo a través de ciertos ‘caminos’, por las capas electrónicas más externas de los átomos. Considerando un modelo atómico como el de la Figura 1, se puede observar que el viaje del electrón se ve interrumpido por la propia estructura electrónica-atómica¹. Esta explicación se basa en un modelo descriptivo muy elemental con el fin de que resulte fácil de visualizar.

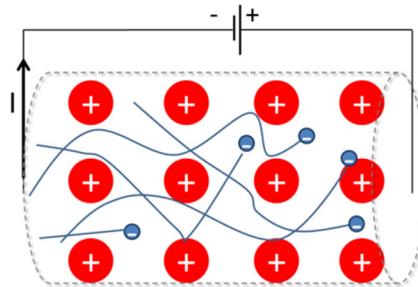


Figura 1. Modelo atómico que representa la movilidad del electrón limitada por las colisiones contra la propia estructura electrónica del material.

Como existe una limitada movilidad de los electrones, la corriente eléctrica (I , Amperios) se ve restringida en función de la resistencia eléctrica que genera el hilo conductor. La resistencia de un determinado conductor se mide en Ohmios (Ω , Ohm). Para medir la resistencia de un elemento conductor se suele utilizar un aparato denominado multímetro, polímetro o téster. Básicamente, consiste en un instrumento con una pequeña batería interna que genera el potencial (V), que fuerza el paso de corriente (I), desde dos puntos concretos de nuestro conductor, Figura 2. Un amperímetro interno A , colocado en serie con el circuito, mide la I que circula por el mismo. Con estos datos, un pequeño procesador calcula la resistencia (Ω) de ese circuito según la ecuación de la ley de Ohm (ecuación 1). Restando la resistencia propia del instrumento (proceso automático), se obtiene la resistencia de nuestro conductor.

$$R = \frac{V}{I} \quad (\Omega, \text{Ohms})$$

Ecuación 1. Ley de Ohm

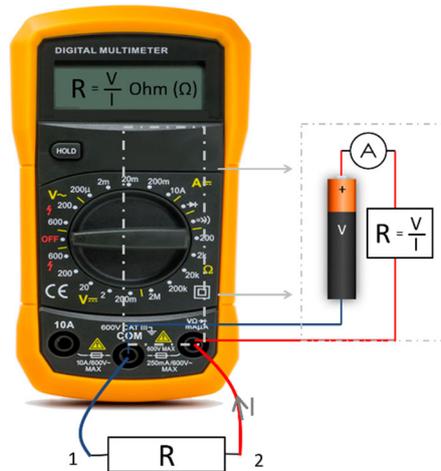


Figura 2. Esquema interno, por el que un multímetro calcula la resistencia de un elemento conductor.

Sin embargo, la resistencia obtenida depende no sólo del material conductor, sino que también de (i) la distancia entre los dos puntos de medida y (ii) de la geometría del conductor. Hay que tener en cuenta que cuanto mayor es la sección de un hilo conductor, menor será la resistencia ofrecida al paso de corriente. Por otro lado, cuanto mayor sea su longitud, mayor la resistencia obtenida. De este modo, la resistencia que estamos obteniendo con un sistema de *dos sondas*, depende de las propiedades geométricas del conductor.

CURIOSIDAD: Muchos de los reguladores que utilizamos a diario, se basan en el cambio de resistencia eléctrica de un componente denominado potenciómetro. Según se muestra en el esquema de la Fig. 3, sobre una pista de elevada resistividad con inicio en A, se desliza una escobilla que cierra el circuito en el contacto B. De este modo, el circuito resulta en un conductor de longitud L_{AB} , según se posicione el regulador.

Como la resistencia del potenciómetro aumenta o disminuye al hacer girar su eje, es posible variar la corriente o tensión eléctrica de un circuito, por ejemplo, para regular el volumen de un equipo de música. Se puede deducir que el circuito resultante entre los contactos B y C, genera la respuesta inversa a la de AB.

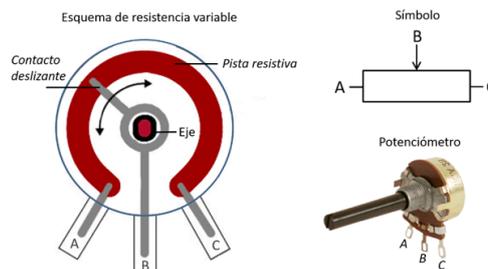


Figura 3. Esquema y símbolo de una resistencia variable. Imagen de un dispositivo potenciómetro.

Llegados a este punto, se hace necesario encontrar una configuración que nos permita determinar la resistencia propia del material independientemente de su forma y tamaño, lo que denominamos *resistividad eléctrica* del material, que a partir de ahora no confundiremos con resistencia. En el siguiente apartado se describirá el método para obtener la resistividad de un material metálico. Solo entonces, se podrá comparar entre la capacidad de conducción eléctrica de diferentes metales.

4 Resistividad y conductividad eléctrica en metales

4.1 Método para determinar la conductividad eléctrica de un material

En el apartado anterior, hemos visto que mediante un sistema de dos sondas podemos determinar la resistencia de un conductor. Con el fin de poder calcular la *resistividad* de un material realizaremos la configuración experimental mostrada en la Figura 4. A diferencia del caso descrito anteriormente, ahora disponemos de 4 sondas. Las muestras deberán ser alargadas y estilizadas de sección constante, de forma que podamos determinar su sección y longitud. Es importante limpiar y eliminar el posible óxido superficial mediante un lijado suave. Los extremos de la pieza metálica los conectaremos mediante dos sondas a una fuente de corriente constante y continua I_{12} , que hará pasar una corriente previamente establecida por nosotros. Entre estos dos electrodos, se conectarán a una distancia cualquiera y conocida L_{34} , otras dos sondas que irán conectadas a un voltímetro de precisión. De esta forma, obtendremos la caída de *potencial eléctrico* entre estos dos puntos del metal, V_{L34} . Es aconsejable utilizar corrientes y distancias moderadas para poder detectar con suficiente precisión valores de V .

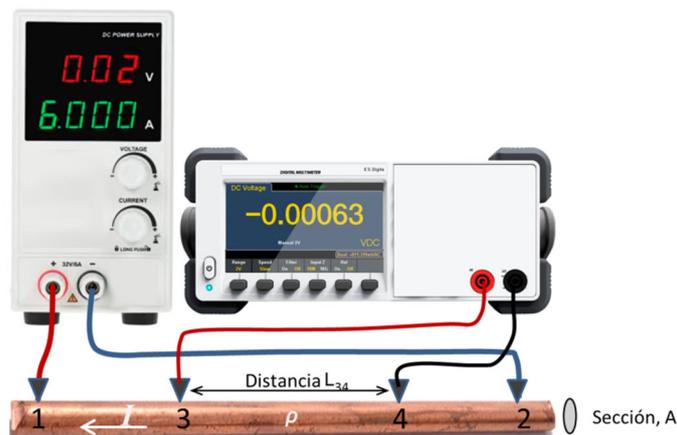


Figura 4. Ensayo de 4 sondas para determinar la resistividad/conductividad de un material. Las uniones U_{12} fuerzan el paso de una corriente, mientras que se mide la caída de potencial o voltaje entre U_{34} .

Con esta configuración disponemos de una intensidad de corriente I , circulando por la sección A de un metal, cuya resistividad ρ genera una caída de potencial V , según la distancia entre sondas L_{34} . Bajo esta premisa, es sencillo describir la resistencia R como un valor proporcional al coeficiente resistivo y la longitud del cable, e inversamente proporcional al área de la sección del conductor, A :

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{Ecuación 2. Ley de Ohm modificada}$$

Igualando la ecuación 1 con la ecuación 2, tendremos todos los datos necesarios para despejar y calcular la resistividad ρ .

$$\frac{V}{I} = \rho \frac{L}{A} \quad \rightarrow \quad \rho = \frac{V \cdot A}{I \cdot L} \quad \text{Ohm} \cdot \text{m} \quad \text{Ecuación 3. Resistividad eléctrica}$$

La constante de resistividad ρ , es propia para cada metal e independiente de su geometría, lo que nos permite por un lado, (i) modelizar la resistencia de cualquier línea, dada una sección y longitud cualquiera o bien (ii), comparar la conductividad entre diferentes metales. De hecho, la constante de conductividad σ , es la inversa de la resistividad y sus unidades son Siemens por metro S/m, $(\Omega \cdot m)^{-1}$ ò $S \cdot m^{-1}$.

$$\sigma = 1/\rho \quad \Omega^{-1} \cdot m^{-1}, \frac{S}{m} \quad \text{Ecuación 4. Conductividad eléctrica}$$

Como hemos visto, mediante un ensayo de 4 sondas (2 para aplicar corriente, 2 para determinar el voltaje), podemos obtener la constante resistiva / conductora de un material. A nivel comercial, existen instrumentos profesionales, robustos y muy sensibles que disponen de un cabezal donde se disponen de estas cuatro sondas. Su uso suele estar dirigido al análisis de materiales semiconductores para los que también interesa determinar la conductividad superficial, corrientes parásitas, etc. Del mismo modo, muchos de los multímetros de precisión de sobremesa, están preparados para realizar de forma automática los ensayos por cuatro sondas.

4.2 Análisis e interpretación de resultados

Cuando nuestros estudiantes realizan el ensayo para determinar la conductividad eléctrica para diferentes metales en los laboratorios de Ciencia de Materiales de la UPV, obtenemos la respuesta mostrada en la Figura 5.

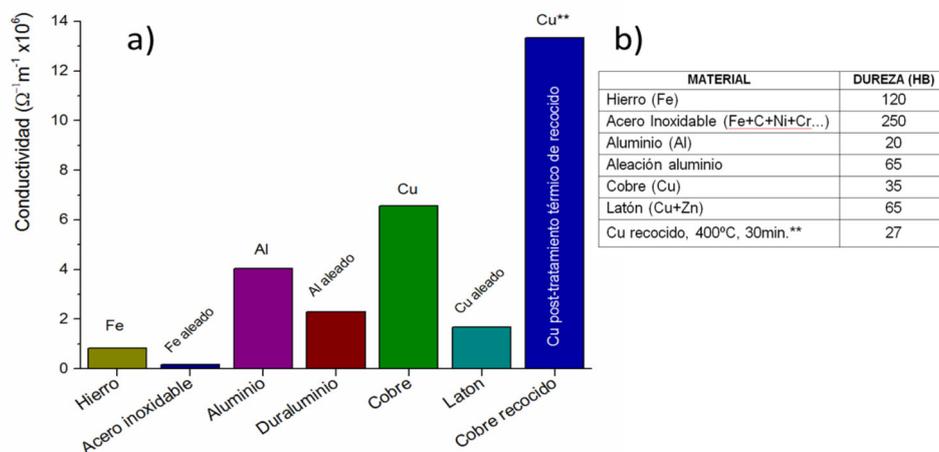


Figura 5. a) Conductividad eléctrica de diferentes metales por método de 4 sondas obtenido en práctica de laboratorio en la UPV. b) Dureza mecánica obtenida por indentador Brinell (Hardness B).

De la respuesta de la Fig. 5a, se puede extraer varias conclusiones. La más evidente es que cada metal posee una conductividad notablemente diferente. Por ejemplo, el aluminio es más resistivo (menos conductor) que el cobre. En este caso, hay que pensar que el primero es mucho más ligero (menos denso) que el segundo, propiedades a tener en cuenta para ciertas aplicaciones como el peso de una línea, además del aspecto económico y la resistencia mecánica.

4.2.1 Efecto de alea un metal en la conductividad

Lo que puede llamarnos la atención es que el mismo aluminio, acero o cobre en su forma aleada, presenta menor conductividad eléctrica. Las aleaciones son ‘combinaciones’ de un metal con otro elemento². A grandes rasgos, el elemento aleante pasa a formar parte de la red cristalina del metal, generando una distorsión de la misma, un nuevo compuesto o una solución sólida³. Mediante el procedimiento de aleado, estamos otorgando al material propiedades diferentes a los de los elementos por separado. Por ejemplo, se puede hacer inoxidable un acero, o más rígido un aluminio (para cuadros de bicicletas, estructuras de aeronaves), etc. Por contra, estamos introduciendo elementos distorsionadores en la red cristalina que restringen la movilidad de los electrones y por tanto, aumenta la resistividad.

Ahora centremos nuestra atención sobre la conductividad del grupo del Cobre Cu , el Cu aleado con cinc, Zn , (*Latón*) y al Cu con un tratamiento de recocido, Fig. 5. Además, adjuntamos el valor de *dureza* de esos mismos metales en Fig. 5b. La dureza puede interpretarse como una medida de la *resistencia mecánica* del material. Del análisis de estas gráficas se desprende que el elemento aleante (Zn , en este caso), provoca una disminución de la conductividad, mientras aumenta el valor de la dureza.

En este caso concreto, los átomos de Cu tienen un tamaño similar al del Zn , y son sustituidos manteniendo las mismas posiciones de la red cúbica centrada en las caras del Cu ³. Este es un ejemplo donde se forma una solución sólida sustitucional³. Apenas distorsionamos la red cristalina al sustituir un átomo metálico por otro de tamaño similar y en la misma posición cristalina pero este efecto, es suficiente para provocar una fuerte restricción a la movilidad de los electrones, que se traduce en un aumento de la resistencia mecánica del material. Si pensamos en otros metales donde los elementos aleantes distorsionan fuertemente la red por tener un tamaño notablemente diferente y/o bien, porque ocupan posiciones diferentes (intersticios de la celdilla unidad), se entenderá que la conductividad eléctrica disminuya notablemente .

CUESTIÓN PARA REFLEXIONAR

Interruptores, conectores, bornes y enchufes se fabrican en latón -aleación de $Cu+Zn$, material con mayor resistividad eléctrica y dureza mecánica que el Cu con el que se fabrican la mayoría de cables, ver figura 5c. Obviando posibles diferencias en coste económico, ¿por qué piensas que es necesario añadir Zn sacrificando en pérdida de conductividad?

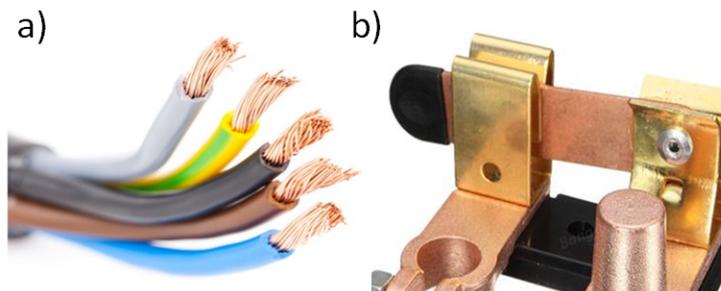


Figura 6. Imagen de a) conductores de cobre y b) un interruptor de $CuZn$, latón.

4.2.2 Efecto de la microestructura en la conductividad

Los metales tienen sus átomos ordenados formando celdillas de unos pocos ángstrom, que se repiten hasta formar dominios cristalinos ordenados de algunas micras o incluso milímetros o centímetros². A estos dominios se les denomina granos y se forman durante la solidificación del metal. De esta forma, el metal se constituye de varios granos de una o varias fases cristalinas⁴. El borde de cada grano se encuentra atómicamente desordenado y su estructura muy distorsionada. Cada borde de grano es frontera de otro grano que presenta una orientación o fase distinta. Al análisis de estas estructuras del interior de un metal se le denomina metalografía. Mediante un microscopio óptico es sencillo observar la metalografía de un metal.

Considerando un metal puro, debemos de tener en mente que:

- (i) cuanto más lenta suceda la solidificación, mayor resultará en tamaño de grano.*
- (ii) La deformación plástica o permanente, texturiza y afina el tamaño de grano, aumentando el volumen de material desordenado (borde de grano), con respecto al volumen ordenado. Además, durante la deformación permanente, aumenta la concentración de imperfecciones de tipo maclas y dislocaciones⁴.*
- (iii) En los bordes de grano los electrones tendrán menor movilidad, dada la distorsión de la estructura y, por ser frontera de una nueva orientación o fase cristalina.*
- (iv) Cuanto menor sea el tamaño de grano de un metal, mayor resultará su resistividad.*

Si pensamos en una aleación, las consideraciones anteriores generalmente se mantienen, pero el contexto es algo más complejo. La microestructura de una aleación depende no solo de la velocidad de enfriamiento, sino de la concentración de cada elemento en el sistema. Ambos factores determinan las fases cristalinas o nuevos compuestos formados. En todo caso, se mantiene la máxima de que, mayor desorden y heterogeneidad en el material conduce a una menor conductividad.

A modo de ejemplo, analicemos el caso de un hilo conductor de cobre puro, *Cu* y el efecto que un tratamiento térmico pueda tener en su microestructura. La Figura 6a muestra la microestructura de un monofilamento de cobre según se suministra de fábrica, la Fig. 6b es el mismo monofilamento después de un tratamiento térmico de recocido. Este tratamiento consiste en calentar el cobre a 400°C durante 30 minutos en un horno con atmósfera inerte (gas nitrógeno o argón, por ejemplo).

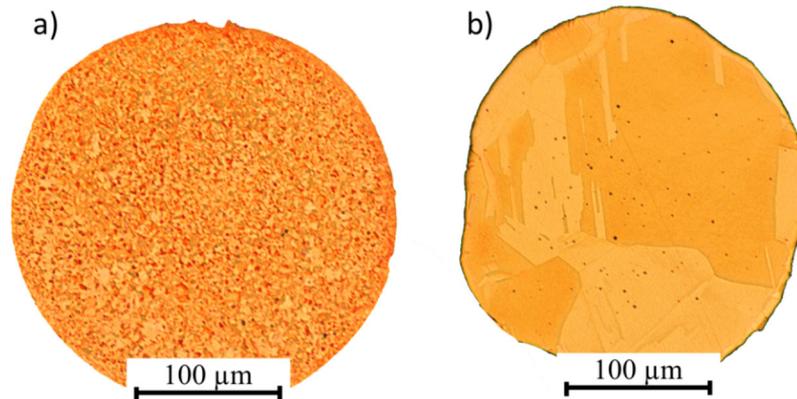


Figura 6. a) Microestructura de la sección transversal de un monofilamento de cobre según su estado de suministro. b) Mismo conductor después de un tratamiento térmico a 400°C durante 30 minutos. Fotografía mediante microscopio óptico metalográfico.

Observando las micrografías de la figura 6, se puede ver que en el caso del cable de suministro, la microestructura es muy fina, es decir, apenas se distinguen unos granos de otros. Sin embargo, cuando ese metal es tratado térmicamente, sí se revelan formas geométricas con dominios de la misma tonalidad y brillo de decenas de micras. Cada una de estas zonas indica la presencia de un grano metálico, es decir, de un dominio donde los átomos de la red cristalina mantienen un orden y orientación determinada.

Lo que ha ocurrido en estas microestructuras es lo siguiente. El cable de suministro es un hilo que para su fabricación se ha procedido a trefilar. Esto es, una barra o lingote de cobre se estira en frío para aumentar su longitud a medida que se reduce su sección. Esto implica un enorme trabajo mecánico de deformación plástica que según lo comentado, ha producido una importante distorsión en la red cristalina, cuya deformación ha hecho prácticamente desaparecer cualquier signo de orden atómico.

Por otro lado, al calentar el metal bajo el tratamiento térmico de recocido, se le otorga energía suficiente para que los átomos regresen a posiciones de mínima energía, mayor orden atómico. En este caso, el tratamiento fue suficiente para recrystalizar el material, aumentando el tamaño de grano. Además, se reducen o eliminan tensiones mecánicas, distorsiones, maclas y dislocaciones.

Por esta recrystalización, se explica la respuesta observada en la figura 5c, en la que el Cu con tratamiento térmico presenta mayor conductividad que el metal de suministro. De hecho, el ingeniero puede determinar las condiciones de un incendio –temperatura, tiempo y atmósfera-, a la que ha estado sometido un hilo conductor. Es un trabajo forense en el que el científico observa la microestructura de un cable implicado en un incendio para ayudar a los peritos a determinar causas y condiciones del siniestro.

Y esta conclusión nos conduce a otra más general e importante, que justifica y motiva la redacción del presente artículo docente: *“un metal puede presentar importantes variaciones en su conductividad eléctrica en función de la historia térmica y mecánica a la que haya sido sometido. De este modo, nunca debemos de dar por sentado la respuesta eléctrica de un metal por el mero hecho de conocer su composición química”*

5 Conclusiones

En este artículo docente hemos descubierto un método experimental sencillo basado en un método de 4 sondas, que nos servirá para calcular la conductividad y resistividad propia de un metal. Además, hemos visto y comprobado que esta constante resistiva depende, no sólo de cada metal analizado, sino de posibles elementos aleantes y de la historia térmica y mecánica a la que haya sido sometido. Por un lado, alear un metal nos permite mejorar algunas propiedades resistentes que son necesarias para soportar las condiciones mecánicas a las que están sometidas las líneas. Sin embargo, el aumento de resistencia mecánica suele ir acompañado de una pérdida en conductividad, viéndonos obligados a llegar a soluciones de compromiso. Por otro lado, un metal deformado en frío o solidificado bajo ratios de enfriamiento moderado puede afinar el grano metalográfico, lo que implica un aumento resistivo del metal. Ha sido importante demostrar, que un mismo metal puede ver variada su conductividad bajo este tipo de deformación y que mediante un tratamiento térmico adecuado, se puede lograr restablecer sus propiedades eléctricas.

6 Bibliografía

¹Modelo de conductividad eléctrica según Drude. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Drude_model Fecha de consulta: 01 de junio de 2021.

²William F. Smith. "Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales". Tercera Edición, ISBN: 844811429, pág. 412–483.

³Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros, 7ª ed. James F. Shackelford. Pág, 45-105

⁴Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. William D. Callister, ed. Reverte. págs. 20-85