



## Efecto del fuego en el comportamiento microestructural en aleaciones de cobre\*

**Geovany Sánchez Torres**

Especialidad: Ingeniería mecánica

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

**Resumen:** Se realizó la caracterización microestructural de la aleación de cobre del tipo Cu-DHP empleada en la fabricación de conductores eléctricos con protección de PVC. Para el desarrollo del trabajo fueron seleccionados cuatro tipos de conductores, conductor unifilar de 2,5 mm, el conductor unifilar de 4 mm, el conductor multifilar de 55 hilos y el conductor multifilar de 113 hilos. Se consideró la microestructura de los mismos en estado de entrega, la cual fue analizada en su sección transversal y longitudinal. En el análisis efectuado en estas secciones, luego de someter a los conductores a la acción del fuego, se pudo determinar que las estructuras obtenidas son del tipo: de granos equiaxiales de diferentes tamaños orientados al azar, de bordes rectos y curvados, engrosamiento de grano y maclas y de formación de eutéctico. Al analizar la dureza se aprecia una disminución mayor en el conductor multifilar de 113 hilos.

**Palabras clave:** aleaciones de cobre; conductores eléctricos, fuego.

---

\* Trabajo tutorado por el Dr. Tomás Fernández Columbié.

Recibido: 12 marzo 2015 / Aceptado: 31 agosto 2015.

## Fire effects in microstructure of copper based alloys

**Abstract:** The microstructural characterization of the Cu-DHP type copper based alloy used for the manufacture of PVC lined electrical conductors was completed. Four types of conductors were selected: 2,5 mm and 4 mm one-wire conductors and multi-wire conductors of 55 and 113 threads. The microstructure of the conductor on delivery state was analyzed; both the cross and longitudinal sections. The analysis results after the conductors were exposed to the fire could indicate that the structure type was: randomly oriented equiaxial grains of various sizes with curved and straight edges; grain and macle thickening and of eutectic formation. The hardness analysis results indicated a greater reduction of hardness in the multi-wire conductor of 113 threads.

**Key words:** copper based alloys; electrical conductors, fire.

## Introducción

Numerosas aplicaciones requieren materiales estables microestructuralmente y con resistencia a elevadas temperaturas con alta conductividad eléctrica y térmica. Para estas aplicaciones, el metal más promisorio es el cobre, debido a su alta conductividad eléctrica y térmica. El cobre presenta la ventaja de tener un bajo módulo de elasticidad que minimiza los esfuerzos térmicos en estructuras enfriadas activamente. Sin embargo, el cobre precisa considerables incrementos en su resistencia para satisfacer los requerimientos de diseño para aplicaciones a altas temperaturas.

El cobre presenta la ventaja de tener un bajo módulo de elasticidad, lo que minimiza los esfuerzos térmicos en estructuras enfriadas activamente. Sin embargo, el cobre requiere considerables incrementos en su resistencia para satisfacer los requerimientos de diseño para aplicaciones a altas temperaturas.

El cobre y sus aleaciones reaccionan con el oxígeno y los vapores de agua a temperaturas elevadas, con mayor intensidad que el aluminio y sus aleaciones. Por esta particularidad, durante el tratamiento térmico del cobre y sus aleaciones, a menudo se recurre a atmósferas protectoras, mientras que en la tecnología, en el tratamiento térmico del aluminio, dichas atmósferas protectoras se emplean rara vez.

El recocido de cobre y sus aleaciones se efectúa con el objetivo de eliminar aquellas desviaciones respecto a la estructura equilibrada que surgieron en el proceso de solidificación, a causa de la sollicitación mecánica, o como resultado del tratamiento térmico precedente.

La calidad del material recocido queda definida por sus propiedades mecánicas y por el tamaño del grano recristalizado. El tamaño del grano, en una estructura por entero recristalizada, es bastante homogéneo. Si un material con acritud se somete al temple, al calentarlo se desarrollan los procesos de recuperación y recristalización. Durante el recocido de recristalización un alto grado de deformación (mayor del 30 %), una baja temperatura y corto tiempo de calentamiento proporcionan el grano fino.

Las empresas en Cuba muchas veces se ven afectadas por incendios. En ocasiones es difícil determinar si un fallo de la instalación eléctrica ha sido la causa del mismo. Los efectos del fuego modifican la microestructura y propiedades de los materiales. Su estudio permitirá obtener información de las condiciones operantes a lo largo del

suceso. Por ello el objetivo de este trabajo es establecer la relación entre la microestructura del material, en conductores de cobre de diferentes tipologías, con las variables que determinan los efectos del fuego, temperatura y tiempo de permanencia.

### Propiedades y aplicaciones del cobre

El cobre puro recocido posee un límite de resistencia que varía de 220–240 MPa, una dureza de 40–50 HB y alargamiento relativo del 50 %. El cobre puro se utiliza en la industria electrónica dada su alta conductibilidad eléctrica y se fabrica en forma de producto semiacabado: alambre, varillas, cintas, hojas, flejes y tubos. Como consecuencia de su baja resistencia mecánica el cobre no se emplea como material de construcción, sino que se utilizan sus aleaciones con zinc, estaño, aluminio, silicio, manganeso y plomo. La composición química estándar del cobre aparece en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del cobre

Cobre	Cu + Ag	Bi máx	Pb máx	P
Cu-DHP	99,90	2,5	0,23	0,015 a 0,040

El cobre presenta una gran plasticidad, alta conductibilidad calorífica y pequeña oxidabilidad. Su ductilidad permite transformarlo en cables de cualquier diámetro, a partir de 0,025 mm. La resistencia a la tracción del alambre de cobre estirado es de unos 420 MPa y puede emplearse tanto en cables y líneas de alta tensión exteriores como en el cableado eléctrico en interiores (Montoliu, 2007).

### Resistencia mecánica a diferentes temperaturas

Las características mecánicas del cobre mejoran con el descenso de temperatura. La resistencia a la tracción y el límite elástico son más elevados que a temperatura ambiente, aumentando el alargamiento. Las propiedades de resistencia a la deformación del cobre descienden muy rápidamente por encima de los 100 °C, aunque la capacidad de deformación permanece elevada hasta temperaturas próximas a la de fusión, siendo esta una indicación de excelente aptitud para la deformación en caliente. Las propiedades mecánicas del cobre permanecen a nivel satisfactorio hasta 150 °C o 200 °C. Por encima de esta temperatura las características mecánicas disminuyen rápidamente y el metal experimenta un aumento de grano muy perjudicial para su comportamiento en servicio (Prasad y Rao, 2004).

### **Capa de óxido superficial en el cobre**

A temperatura ordinaria la superficie del cobre en aire seco se recubre de una película de  $\text{Cu}_2\text{O}$  que protege la superficie. A  $150\text{ }^\circ\text{C}$  esta película crece rápidamente (Humphreys, 2006). Bajo película de la acción de la humedad de los sulfuros, del gas carbónico, esta se ennegrece y adquiere posteriormente una pátina negra (azufre) o verde. A temperatura más elevada, la película de  $\text{Cu}_2\text{O}$  formada al aire aumenta su espesor y, según la pureza del metal, puede o no escamarse.

Las adiciones de fósforo favorecen el escamado de la película, sobre todo mediante un rápido enfriamiento por temple en agua después del calentamiento. El cobre fundido puede absorber cierta cantidad de carbono, sin embargo, el carburo no es estable en el cobre solidificado (Lugo *et al.*, 2003). Debido a su acción el  $\text{Cu}_2\text{O}$  se reduce en la interfase metal/CO y las partículas subyacentes de  $\text{Cu}_2\text{O}$  permiten la difusión de oxígeno, por solubilidad en el cobre, y debido al gradiente provocado por la producción que se ha llevado a cabo en la superficie. Es posible desoxidar totalmente un cobre oxidado por calentamiento en atmosfera de CO sin que se produzca ningún daño.

### **Evaluación del daño en los conductores eléctricos**

Una gran variedad de métodos físicos y químicos han sido propuestos para determinar el estado de deterioro de los conductores eléctricos. Muchos esfuerzos se centran en determinar el origen de las perlas de fundición que se encuentran en los extremos de los conductores eléctricos para determinar si el incendio ha estado originado por un cortocircuito o si este ha sido causado por el propio incendio. En el primer caso las marcas encontradas son primarias (*Primary Molten Marks* o *Cause Beads*), en el segundo las marcas del cobre fundido son de origen secundario (*Secondary Molten Marks* o *Victim Beads*). Hay diferencias significativas tanto físicas como químicas entre las muestras de cobre obtenidas después de un incendio iniciado por un fallo eléctrico y las muestras afectadas únicamente por las llamas.

Cuando el conductor es multifilar el metal fundido penetra entre los hilos uniéndolos, esta unión puede variar desde una pequeña unión incipiente hasta una fusión completa. Este tipo de fusión se podrá observar en zonas distintas del mismo conductor, precisamente donde el fuego haya alcanzado temperaturas altas. (Babrauskas, 2003).

Respecto a las sobrecorrientes afectan a todo el conductor por igual ya que la corriente que lo recorre será igual. Un conductor puede soportar dos o tres veces su intensidad máxima admisible durante algunos segundos sin verse afectado.

Cuando un conductor de cobre es expuesto a una llama se deteriora su superficie. Estos cristales representan los núcleos formando cristales rojizos de óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) de los cristales negros de óxido cúprico ( $\text{CuO}$ ). Cuando la temperatura se acerca a la de la fusión del cobre, el óxido cúprico vuelve a formar cristales rojos de óxido cuproso (Clarke, 2006).

Babrauska (2003) recoge los métodos propuestos hasta la fecha para detectar si las causas de un incendio ha sido un cortocircuito. Todos los métodos asumen que hay diferencias suficientes en los restos de conductores eléctricos de cobre para poder diferenciarlos. Sin embargo, estos estudios no aportan un soporte teórico a sus resultados. En la mayoría de ellos se utiliza un número pequeño de muestras que no se puede considerar estadísticamente suficiente. Otros estudios se han producido en laboratorios pero no aportan datos suficientes para poder repetir las pruebas por lo que no son válidos para un estudio con rigor de estos.

### **Efectos del fuego sobre elementos metálicos**

El efecto del fuego sobre los materiales metálicos puede describirse como: aumento de la temperatura en el interior del material, dependiendo del calor. Deterioro superficial del metal, principalmente por oxidación de su superficie, aunque resulta más significativo el efecto térmico sobre la difusión de algunas de sus fases hacia el interior del material (Méndez, 2000).

### **Determinación de las temperaturas en los elementos metálicos**

Para la determinación de la temperatura alcanzada por los elementos metálicos presentes en el incendio se realiza una inspección para conocer el grado de deterioro, el cual se correlaciona por la observación de fusión en algunos materiales y por el hallazgo de deformaciones de fluencia o indicios de corrosión (Ramunni, De Paiva-Coelho & De Miranda, 2006).

Los metales puros suelen tener bajas temperaturas de recristalización en comparación con los metales y aleaciones impuras. El zinc, el estaño tienen temperaturas de

recristalización inferiores al ambiente. Es por ello que estos metales no pueden trabajarse en frío a temperatura ambiente, ya que se recristalizan espontáneamente, reconstruyendo una estructura reticular libre de tensión (Tarín y Badía, 2006).

A medida que se alcanza la temperatura superior del intervalo de recuperación, aparecen nuevos cristales en la microestructura, los cuales tienen la misma composición y estructura reticular que los granos originales no deformados y son aproximadamente uniformes (Kuznik, Virgone & Noel, 2008). Los nuevos cristales suelen aparecer en las porciones del grano drásticamente deformadas, por lo general, en los límites de granos y planos de deslizamiento.

El agrupamiento de átomos del cual se forman los nuevos granos se llama núcleo. La recristalización tiene lugar mediante una combinación de nucleación de granos libres de deformación y crecimiento de estos núcleos para abarcar todo el material trabajado en frío. A mayor cantidad de deformación previa, menor es la temperatura necesaria para iniciar el proceso de la recristalización, ya que habrá mayor distorsión y más energía interna disponible (Hyuk, Cheol-Kim & Park, 2000).

Al aumentar el tiempo de recocido disminuye la temperatura de recristalización, proceso sensible a cambios en la temperatura. Otro dato a tener en cuenta es el crecimiento de sufren los granos de la estructura metálica con la temperatura (Polmear, 2006).

### **Tratamientos térmicos**

Tratamiento térmico es el proceso que comprende el calentamiento de los metales o las aleaciones en estado sólido a temperaturas definidas, manteniéndolas a esa temperatura por suficiente tiempo, seguido de un enfriamiento a las velocidades adecuadas con el fin de mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, especialmente la dureza, la resistencia y la elasticidad. Los materiales a los que se aplica el tratamiento térmico son, básicamente, el acero y la fundición, formados por hierro y carbono.

Las características mecánicas de un material dependen tanto de su composición química como de la estructura cristalina que tenga. Los tratamientos térmicos modifican esa estructura cristalina sin alterar la composición química, dando a los materiales unas características mecánicas concretas, mediante un proceso de

calentamientos y enfriamientos sucesivos hasta conseguir la estructura cristalina deseada (Lienhard y Lienhard, 2005).

Al realizar el análisis de microdureza se comprobó que existe una disminución de la dureza de 89,75 HV para el conductor unificar de 2,5 mm, hasta una dureza de 51,11 HV para el multifilar de 113 hilos, luego del tratamiento térmico de recocido impuesto por el fuego.

### Plan experimental

Se utilizó una metodología de ensayo en la que se usan diferentes tipos de conductores. Se escogieron cuatro tipologías de conductores de cobre electrolítico con aislante de PVC. Las Figuras 1 y 2 muestran los calibres de los conductores seleccionados. Se eligieron dos variedades de cable unifilar y multifilar utilizados en las instalaciones eléctricas.



Figura 1. Conductores unifilares sección 2,5 y 4 mm<sup>2</sup> con aislamiento PVC.



Figura 2. Conductor multifilar ,113 y 55 hilos y sección 13 y 6 mm<sup>2</sup> con aislamiento PVC.

El cable unifilar es más rígido, mientras que el multifilar es más flexible. Estos se usan en electricidad en aplicaciones donde se requiere cierta flexibilidad en servicio o durante su instalación. La flexibilidad de un cable aumenta cuanto menor es la sección de los hilos. Los diferentes grosores utilizados permiten estudiar la influencia de la difusión en cada uno de ellos.

### Análisis microestructural

Las microestructuras que se observan se corresponden al cobre sin afectar por ningún tratamiento térmico. La comparación de estas microestructuras con las que se vayan obteniendo de las pruebas nos deberá mostrar el estado de deterioro del conductor. Las micrografías se corresponden con las cuatro tipologías de cables conductores elegidas expuestas anteriormente. Se han realizado probetas metalográficas de cortes



transversales y longitudinales. Las Figuras 3 y 4 muestran al conductor unifilar sección  $2,5 \text{ mm}^2$  en sus secciones longitudinal y transversal.

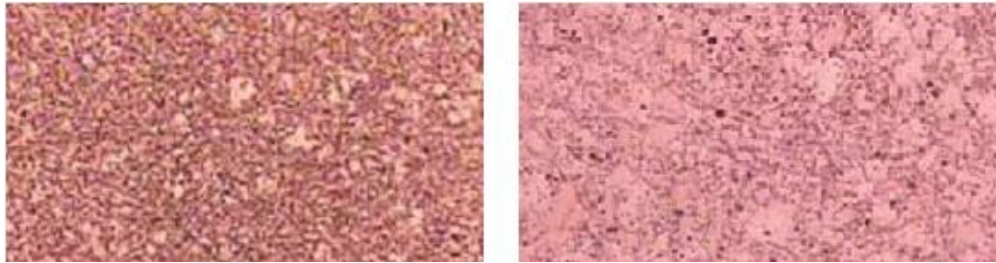


Figura 3. Corte transversal del conductor unifilar sección  $2,5 \text{ mm}^2$  x 100 y x400 aumentos.

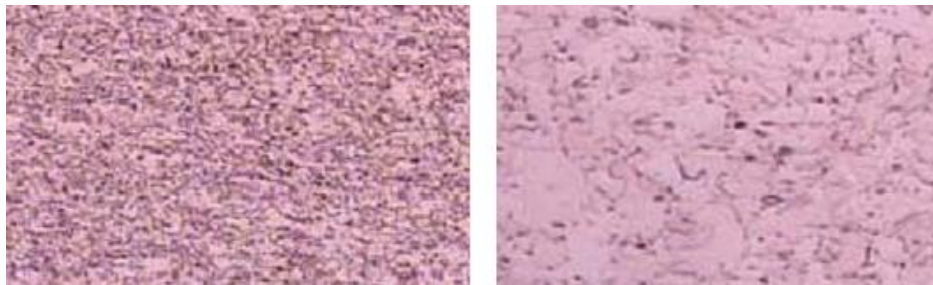


Figura 4. Corte longitudinal del conductor unifilar sección  $2,5 \text{ mm}^2$  x 100 y x400 aumentos.

Para el conductor unifilar de sección de  $4 \text{ mm}^2$  se realizó el mismo procedimiento, las microestructuras de las Figuras 5 y 6 se corresponden con el corte transversal y longitudinal de este conductor.

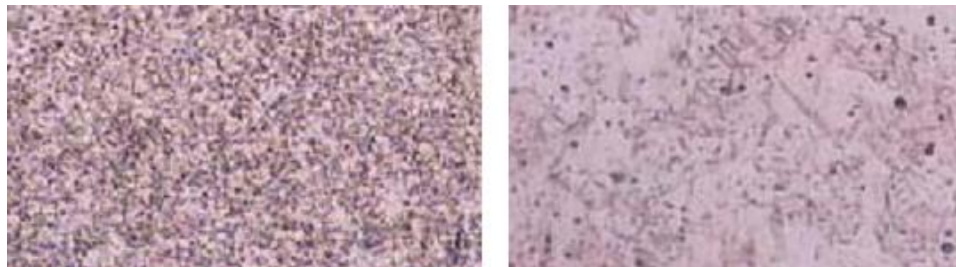


Figura 5. Corte transversal del conductor de  $4 \text{ mm}^2$  x 100 y x400 aumentos.

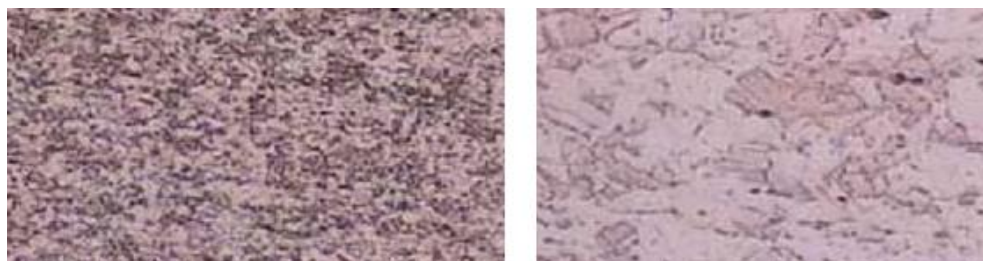


Figura 6. Corte longitudinal del conductor de  $4 \text{ mm}^2$  x 100 y x400 aumentos.

Para los conductores multifilar se procedió a realizar una observación transversal en los hilos componentes de los mismos, luego se realizó el análisis microestructural en la sección transversal y longitudinal de los mismos.

En las Figuras 7 y 8 se observa el corte transversal y longitudinal del conductor de 113 hilos, de sección  $6 \text{ mm}^2$ .

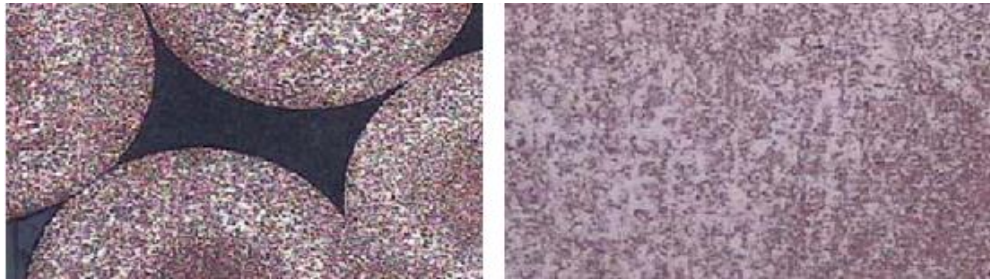


Figura 7. Corte transversal del conductor de 113 hilos x100 y x400 aumentos.

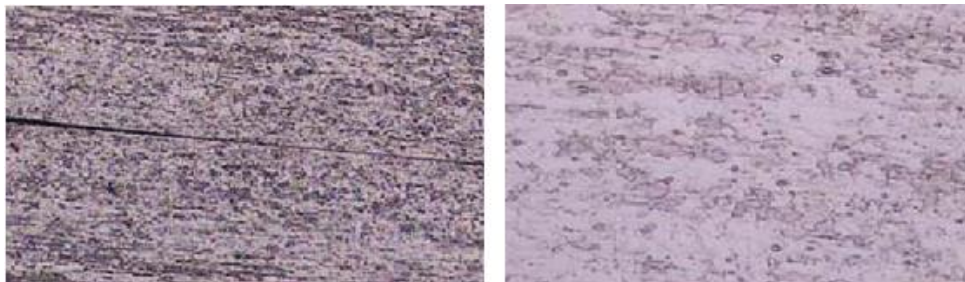


Figura 8. Corte longitudinal del conductor de 113 hilos x100 y x400 aumentos.

La microestructura del conductor multifilar de 55 hilos que se corresponde con el corte longitudinal se muestra en la Figura 9 y con el corte transversal en la Figura 10.

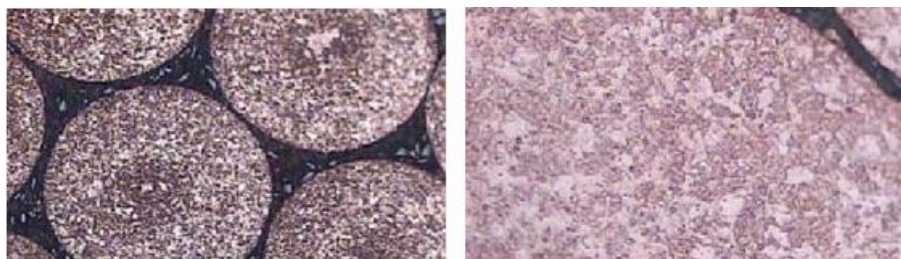


Figura 9. Corte longitudinal del conductor de 55 hilos x100 y x400 aumentos

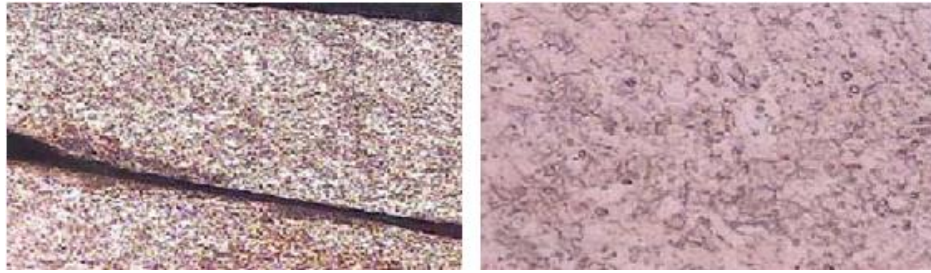


Figura 10. Corte transversal del conductor de 55 hilos x100 y x400 aumentos.

Las características microestructurales que habrá que tener en cuenta de las muestras obtenidas de los ensayos serán las siguientes: tamaño y forma del grano (dendríticos o equiaxiales), presencia de distintas fases, localización de eutécticos, presencia de poros y tamaño de estos, precipitados en bordes de granos, tamaño de capa de óxido, formación de cuellos de sinterización entre hilos, fragilidad del cable, defectos de solidificación (rechupes, desgarros).

### **Selección de las muestras sometidas a incendio**

Las muestras se recogen una vez examinado el escenario del incendio y encontrado el foco inicial u origen. Se acopian tanto en el lugar del foco inicial como en las partes de la línea donde se espera que se confirme la sobrecarga. Se toman muestras que se espera que no haga falta examinar si los resultados de los primeros análisis se confirman y que servirían para un análisis más amplio en caso de que los resultados iniciales no confirmen la teoría propuesta. La Figura 11 muestra el comportamiento de los cables luego del suceso.



Figura 11. Comportamiento de los conductores luego del suceso.

Antes de su recogida las muestras se fotografiaron en la posición en que quedaron tras el incendio, utilizando las tenazas de corte, sin realizar tracciones o flexiones ya que sino se podría modificar la microestructura del cobre, con la intención de que no haya una pérdida de información en ninguna operación Las muestras se empaquetaron en

bolsas de plástico con sistema de cierre hermético, de manera que queden preservadas de la humedad o de otros materiales contaminantes.

Se eligen las muestras más representativas, las que contengan perlas, más oxidación, estén más deterioradas, y una que no esté deteriorada que servirá de patrón.

### **Instalaciones eléctricas y aparatos eléctricos**

Se consideran los tipos de instalaciones eléctricas: provisionales y fijas.

Las instalaciones fijas son los conductores que deben ir entubados y la calidad de los materiales deberán cumplir con la norma oficial correspondiente, principalmente en aquellos lugares donde se manejen líquidos y gases inflamables, en cuyo caso las tomas de corriente y registro deberán ser a prueba de explosión.

Las instalaciones eléctricas provisionales son aquellas que han envejecido y el material aislante que las cubre está deteriorado; puede causar incendios por corto circuito o por subir la carga de energía eléctrica en las líneas de distribución, incendiando la estructura sobre la que están instalados los conductores, más aun si la estructura es de madera o de algún material similar.

Según lo expuesto el estudio se fundamenta en la instalación eléctrica del tipo provisional.

### **Equipos empleados en la experimentación**

La microestructura tiene una fuerte influencia en las propiedades y en la correcta aplicación de los materiales. Su determinación y control requiere de técnicas metalográficas y microscópicas. El principal objetivo de la caracterización microestructural es revelar los constituyentes y la estructura por medio de microscopía, por lo que son de vital importancia una buena selección y preparación de las muestras a analizar. Este proceso va a posibilitar la comprobación de determinados requerimientos relacionados con la microestructura, como son: la determinación de la composición en la microestructura y su distribución, la caracterización de la morfología de los granos, el estudio de la porosidad existente (tamaño y características de los poros), la presencia oxidación.

-Microscopio metalográfico: Se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM-100, dotado de cámara. El hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe (2006), que refleja la micrografía en el computador, presenta objetivo acromático de 4,10X, 80X, 100X, para el caso objeto de estudio; la observación se realiza a 50 X.

### Corte de las muestras

Para el estudio microestructural de las muestras es necesario la previa preparación metalográfica que comienza con una etapa de corte de la muestra (conductores que poseen varios hilos) Se asegura con cinta adhesiva para evitar de esta manera que los hilos se separen. Se realiza el corte utilizando como herramienta una tronzadora con refrigeración automática que evite que la muestra se caliente y altere.

La fijación de las piezas durante el corte debe garantizar su estabilidad y fijación, evitando posibles movimientos que puedan ocasionar superficies dañadas.

En los ensayos de microdureza para la medición de la dureza se usó la norma ASTM NORMA E18-89<sup>a</sup>. En la caracterización mecánica primeramente se realizó un barrido de microdureza en todas las microestructuras, tanto de forma longitudinal, como transversal. Se utilizó un microdurómetro Vickers, aplicando una carga de 100 g y realizando las mediciones cada 500  $\mu\text{m}$ .

Para calcular la microdureza (VHN) se utilizó la fórmula:  $HVN = 1,854 \frac{P}{d^{-2}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right]$  (1)

Diámetro medio:  $d^{-2}(\text{mm}) \dots d^{-2} = \frac{(d_1+d_2)+(d_3-d_4)}{2}$  (2)

Microdureza promedio:  $\overline{VHN} = \frac{\sum VHN_1 + VHN_2}{2} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right]$  (3)

Donde: 1,58 - constante

P - peso, kgf/mm<sup>2</sup>

El número de dureza HV se determina por el tamaño de las huellas. El comportamiento que tienen los materiales (cobre) frente a la resistencia que estos ofrecen al dejarse penetrar por un material más duro se estudia con el ensayo de dureza. Los ensayos de microdureza determinan valores de dureza en áreas muy pequeñas, donde se utiliza un indentador de diamante en forma piramidal, que es un material de mucha mayor dureza que la muestra.

Para determinar la microdureza (HVN) de las probetas de análisis se realizó el ensayo para una carga de 50 g, donde se midieron los diámetros de la huella de la punta de diamante penetrada en un tiempo de 15 s, las medidas se tomaron para dos puntos de prueba seleccionados aleatoriamente en la superficie de las probetas. El número de dureza HV se determina por el tamaño de las huellas obtenidas en las diagonales.

-Máquina pulidora metalográfica: La pulidora metalográfica empleada es marca MONTASUPAL. En ella se utilizó un paño de fieltro grueso usando como sustancia abrasiva el óxido de cromo (Pasta GOI), las características de la máquina aparecen a continuación:

Voltaje: 250 V

Corriente: 2,5 A

Número de revoluciones: 300-1 000 rev/min

Potencia del motor: 3,7 kW.

### **Operación de desbaste**

Se inició con lijas de grano 60, pasando sucesivamente por las de 120, 180, 240, 320, 400 y 600. Los papeles de lija fueron apoyados sobre una superficie plana, se frotó en una dirección hasta que se observó en su superficie solo marcas de desbaste correspondientes al papel que se está utilizando. La dirección de desbaste se giró a 90° al pasar de un papel al siguiente; se realizó la limpieza de la probeta con agua con el fin de eliminar las posibles virutas y restos de granos de la última lija utilizada.

**Pulido de las muestras:** La superficie de la probeta, desbastada hasta el grano más fino y limpia, se pasó por paños impregnados en abrasivo. El tipo de abrasivo utilizado en este caso fue pasta GOI y como paño se utilizó el fieltro.

Los paños, húmedos y con suficiente abrasivo se sujetaron a un disco giratorio. Se han realizado dos etapas de pulido con el fin de obtener una superficie especular, susceptible de ser atacada y examinada al microscopio.

Para realizar el pulido se usan pulidoras manuales, marca MONTASUPAL. El disco gira, y la probeta, apoyada suavemente sobre él, se hizo girar describiendo círculos en sentido contrario al del disco. Se han realizado dos etapas de pulido con el fin de obtener una superficie especular, susceptible de ser atacada y examinada al

microscopio. Para pasar de una etapa de pulido a la siguiente, la probeta se ha aclarado con alcohol, arrastrando con él restos del primer pulido y evitando así la contaminación del siguiente paño. Una vez terminadas las dos etapas del pulido se procede a la limpieza de la probeta, antes de proceder al ataque.

**Ataque químico:** Para el ataque químico del cobre electrolítico se empleó medio crisol de dicromato potásico con una gota de ácido clorhídrico.

Al preparar el reactivo se vierte un poco en una cápsula en la que se introduce la probeta unos instantes, mojando la superficie pulida. Se detiene el ataque con agua y se observa la superficie. La operación se repite hasta que la superficie a examinar esté bien atacada. Después del ataque se lavó la probeta de nuevo con abundante agua corriente y se secó con alcohol (absoluto) y secada al aire.

### **Análisis de la microestructura para conductor unifilar sección 2,5 mm<sup>2</sup>**

Fueron observadas las microestructuras obtenidas del conductor unifilar de 2,5 mm<sup>2</sup>; se aprecia en las muestras una superficie con fuerte deterioro en los hilos con fuerte reducción de los óxidos superficiales que provoca la importante pérdida de material.

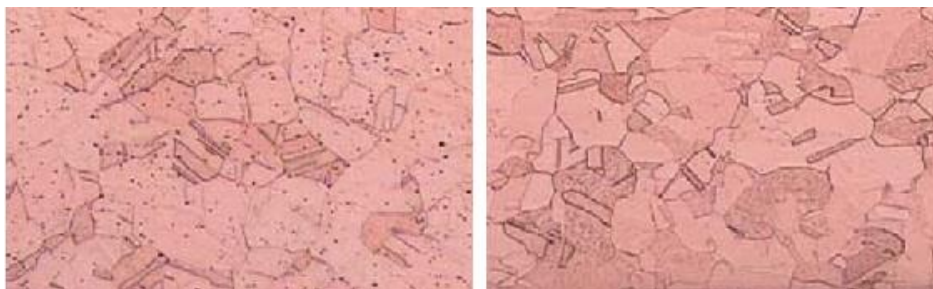


Figura 12. Corte transversal del conductor unifilar sección 2,5 mm<sup>2</sup>

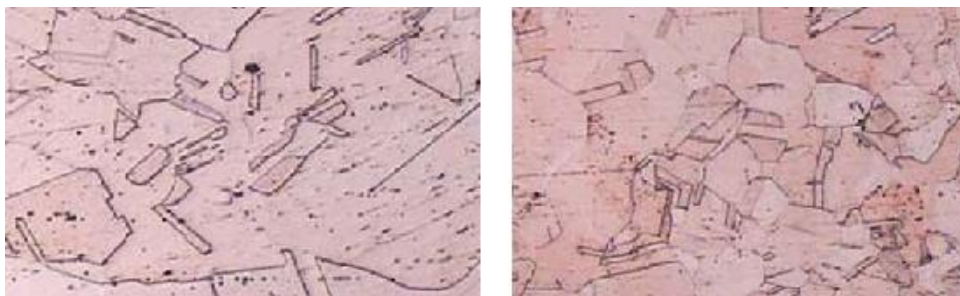


Figura 13. Corte longitudinal del conductor unifilar sección 2,5 mm<sup>2</sup>

En las figuras se observa que, en comparación con las muestras analizadas, estado de entrega, las obtenidas, luego del fuego, se caracterizan por su heterogeneidad microestructural, con granos equiaxiales de diferentes tamaños orientados al azar, de bordes rectos y curvados, con algunas partículas pequeñas de segunda fase dispersas dentro de ellos y maclas térmicas.

Comparativamente en la secuencia de fotomicrografías presentadas se observa que el menor tamaño promedio de grano, en apariencia, se corresponde al cobre cuando es sometido a un proceso de normalizado seguido, en orden creciente de magnitud, por el estado de entrega y después por todas las condiciones de control.

El normalizado mantiene su heterogeneidad microestructural aunque se observa más refinado, con algunos bordes menos definidos que otros, pero la microestructura sigue conservando en esencia todas las características. Con el aumento de la temperatura, a partir de esta condición normalizada, los bordes de grano se definen más en aspecto y tamaño, adquiriendo una forma más regular y redondeada, aunque se mantiene la heterogeneidad microestructural. La presencia de las maclas persiste para todas las temperaturas.

En tal sentido, los granos de un metal de grano fino recristalizado empiezan a crecer rápidamente, a expensas de otros granos, cuando se calientan a temperatura superior. Este fenómeno se conoce con el nombre de crecimiento anormal de grano.

### **Análisis microestructural para el conductor unifilar de 4 mm<sup>2</sup>**

Para el conductor multifilar de 4 mm<sup>2</sup> fueron obtenidas las microestructuras que se observan en las Figuras 14 y 15; la primera se corresponde con el corte transversal realizado al elemento conductor y la segunda con el corte longitudinal, ambas secciones muestran el efecto de la temperatura y su efecto en el tamaño de los granos. Con respecto a esto, es conocida la tendencia de las impurezas a segregarse en las dislocaciones. En metales relativamente puros la concentración de impurezas atómicas segregadas en las dislocaciones puede ser elevada; en particular, los átomos de soluto intersticial, como el oxígeno en el cobre.



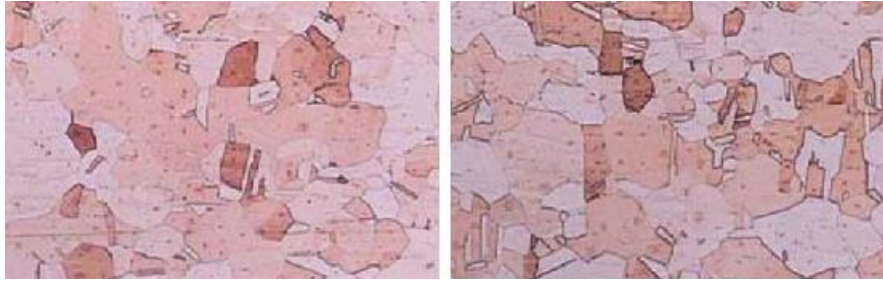


Figura 14. Corte transversal del conductor unifilar sección 4 mm<sup>2</sup>.



Figura 15. Corte longitudinal del conductor unifilar sección 4 mm<sup>2</sup>.

Con respecto a la muestra patrón obtenida de este conductor unificar se puede apreciar el engrosamiento de grano y maclas. El comportamiento del tamaño de grano se corresponde con el descrito anteriormente para el esfuerzo de fluencia, con referencia a la temperatura. Es decir, a medida que aumenta la temperatura se espera la presencia de eventos dinámicos que originen cambios microestructurales en el material tendentes, por lo general, a aumentar su tamaño de grano y disminuir su esfuerzo de fluencia.

En los materiales en los cuales los procesos de recuperación son lentos, tales como los metales de baja y moderada energía de falla de apilamiento (aceros inoxidables austeníticos, níquel, cobre y sus aleaciones), podrían acumularse suficiente densidad de dislocaciones durante la deformación en caliente. Esto permite que la recrystalización dinámica ocurra durante la deformación, con un fuerte ablandamiento microestructural que se traduce en una reducción de la resistencia del material, de modo que la curva de fluencia presenta incluso unos valores máximos de tensión. Estos máximos caracterizan el conformado en caliente de estos materiales en los conocidos procesos de recrystalización dinámica discontinua de pico simple (bajas temperaturas y/o altas velocidades de deformación) o cíclica de picos múltiples (altas temperaturas y/o bajas velocidades de deformación).

### **Análisis microestructural para el conductor multifilar de 55 hilos**

Las microestructuras que se muestran en las Figuras 16 y 17 se corresponden con el conductor multifilar de 55 hilos, de igual manera se consideró la sección transversal y longitudinal de dicho conductor.

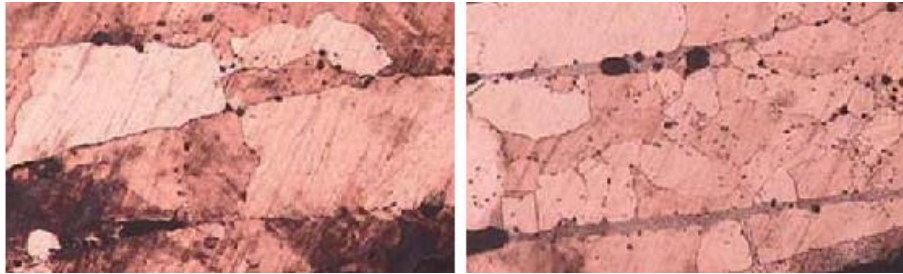


Figura 16. Corte transversal del conductor multifilar de 55 hilos.

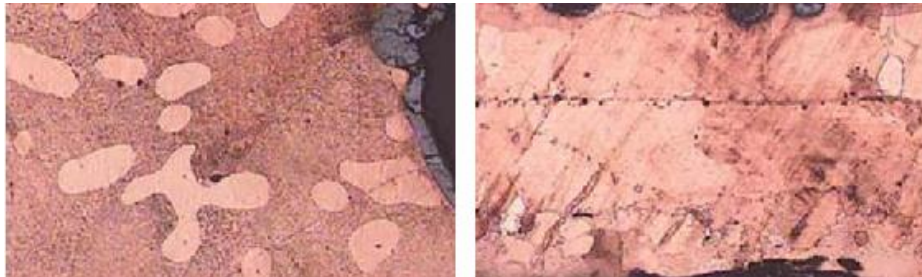


Figura 17. Corte longitudinal del conductor multifilar de 55 hilos.

El análisis de la microestructura en los hilos de cobre de la muestra, en su corte y preparación longitudinal, como en los cortes transversales observados, nos indica una fuerte formación de eutéctico cobre-oxígeno, tanto en la superficie de los hilos, como en los espacios entre hilos, por infiltración del material fundido.

El tamaño de grano es muy grande debido al fuerte engrosamiento por las elevadas temperaturas e incluso puede apreciarse el efecto de fusiones incipientes en el material por el redondeo de los granos o de los propios hilos. El corte transversal en las figuras presenta una microestructura de fuerte sinterización entre los hilos con una importante formación de fase líquida que proporciona con su posterior solidificación en los granos y una más que notable formación de cuellos de unión. Se puede apreciar la formación de poros, por lo que puede apuntarse como temperatura alcanzada la que se encontraría entre la transformación eutéctica, 1 064 °C y la de formación de líquido para las aleaciones hipoeutéctica Cu-O, alrededor de los 1 075 °C.

### **Análisis microestructural para el conductor multifilar de 113 hilos**

Para el conductor multifilar de 113 hilos se consideró de igual manera que los conductores anteriores su sección transversal y longitudinal, así como la microestructura patrón. La Figura 18 se corresponde con los resultados obtenidos.

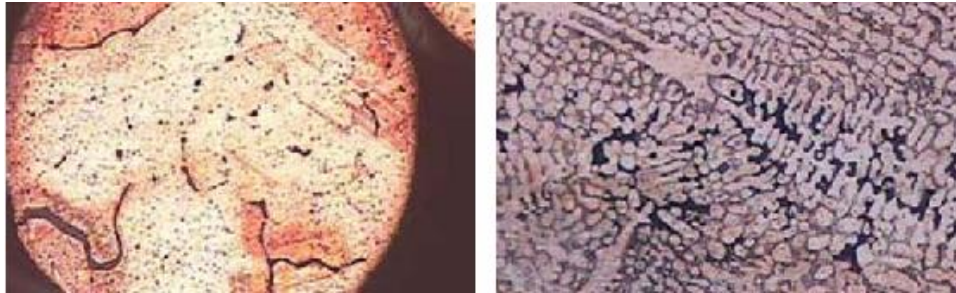


Figura 18. Corte transversal y longitudinal del conductor multifilar de 113 hilos.

Siguiendo con el análisis de las fotomicrografías de la Figura 18 para las deformaciones por proceso de fuego se observa la tendencia hacia una mayor equiaxialidad de los granos que adquieren un aspecto y tamaño cada vez más regular, sobre todo a la menor deformación, así como una disminución paulatina de las maclas térmicas, hasta llegar a una estructura más homogénea, temperatura a la cual se pueden observar todavía pequeñas cantidades de granos pequeños. Se sigue observando la presencia de partículas de segunda fase dispersas en la matriz del cobre, pero en menor cantidad.

La parte con los hilos no fundidos presenta una microestructura de granos muy groseros, provocada por temperaturas muy elevadas de recocido. Además, se aprecia en los hilos mostrados en las dos figuras una fuerte fragilización en borde de grano, que presenta una fuerte oxidación al verse sometido a una atmósfera oxidante (frente de llama) y elevadas temperaturas. Con posterioridad, el material se ha visto sometido a una atmósfera reductora, también a elevadas temperaturas, como la que sucede por la combustión de los materiales aislantes de los cables.

En la zona más próxima a los hilos conductores (Figura 18) aparece una cierta difusión entre el cobre conductor y otros elementos extraños, procedentes muy probablemente del material fundido que envuelve los hilos del cable conductor para mejorar el contacto eléctrico.

En las muestras, los hilos presentan fenómenos de recristalización, con un importante efecto de crecimiento de grano. Este crecimiento de los granos, muy uniforme a lo largo de la microestructura analizada, responde al calentamiento uniforme y repetitivo que los cables conductores pudieran tener en el tiempo de servicio, sin que por ello variaran significativamente sus propiedades de resistividad eléctrica.

En el corte longitudinal del conductor (Figura 18) la zona fundida presenta, por su parte, una estructura de granos dendríticos y de formación de eutéctico en los hilos orientados en el sentido del enfriamiento. La porosidad se acumula alrededor de las dendritas de solidificación y no se aprecia signos de reacción con la atmósfera del entorno, lo que resulta indicativo de que la fusión ha sucedido con anterioridad al fuego y, por tanto, cuando todavía no se dispone de gases procedentes de la combustión que provocarían en el material una especial contaminación y, además, si el material quedara expuesto a la zona oxidante de las llamas, a un mayor nivel de oxidación, que desembocaría en la formación de zonas con transformación eutéctica.

### **Análisis de la microdureza en los conductores**

Se realizaron mediciones de microdureza (HV) en probetas de cobre nuevo (cobre estándar) para tenerlas como referencia. Las medidas se realizaron a lo largo de las probetas donde el cobre está dispuesto de forma longitudinal. Para determinar los resultados se consideraron diferentes temperaturas, teniendo en cuenta que los conductores estuvieron sometidos a un ciclo de tratamiento térmico controlado. En la Tabla 2 se exponen los resultados obtenidos.

Tabla 2. Variación de la dureza de los conductores con el aumento de la temperatura

<b>Temperatura °C</b>	<b>2,5 mm</b>	<b>4 mm</b>	<b>6 mm</b>	<b>13 mm</b>
32	89,75	88,80	79,33	78,88
950	79,58	64,15	68,44	64,20
975	76,06	55,16	65,01	60,73
1 000	68,54	53,82	59,21	54,46
1 050	58,21	50,98	52,66	51,11

En la Tabla 2 se puede apreciar la variación de la dureza en cada uno de los conductores con el aumento de la temperatura, para una tasa de dureza en todas las muestras a temperatura ambiente. Luego de estar expuestas a condiciones de temperatura hay una disminución de la dureza, típico de los procesos de recocido.

Se han obtenidos menores niveles de dureza en los conductores para el caso de una velocidad y temperatura de deformación mayor y se produce un ablandamiento del material a partir de cierta deformación, posiblemente debido a que el material recrystalizaría durante la deformación y se alcanza un esfuerzo de estado estacionario.

Propiedades básicas importantes como la resistencia, la dureza, la ductilidad y la tenacidad son influenciadas y modificadas por elementos de aleación y por procesos de tratamientos térmicos. A partir de una dureza de 89,75; dureza en estado de entrega, la deformación plástica en frío origina un endurecimiento del metal que trae como consecuencia una pérdida en la plasticidad. Los sucesivos trefilados aumentan este endurecimiento y dan lugar a un mayor peligro de rotura. El tratamiento térmico impuesto a los conductores, afectan sensiblemente las características de conducción luego de perder la condición de entrega.

En la Figura 19 se muestra la comparación del cambio de dureza con el aumento de la temperatura, en las diferentes secciones de los cables. Para el conductor unificar de 4 mm se ha mantenido una mayor dureza, el mismo, al presentar mayor diámetro, se hace más resistente a las llamas del fuego, precedido por el unificar de 2,5 mm. Mientras que para el cable multifilar de 113 hilos es de mayor diámetro por la cantidad de hilos que presenta, pero por poseer esta cantidad, los mismos son de menores diámetros, lo cual lo hace más susceptible a los cambios por altas temperaturas.

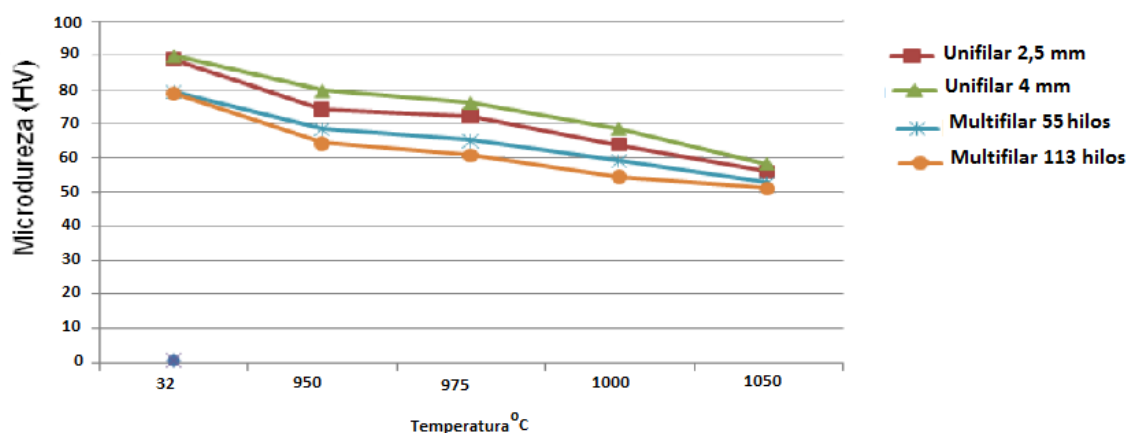


Figura 19. Comparación del cambio de dureza con el aumento de la temperatura en las diferentes secciones de cable.

## **Análisis de regresión**

El análisis de correlación desarrolla métodos para investigar si dos o más variables están relacionadas y para medir la intensidad de esta relación. El análisis de regresión, por su parte, nos ayudará a determinar el modelo o ecuación matemática que mejor representa la relación existente entre las variables analizadas. Se realizó el análisis de regresión para las variables: temperatura, como variable independiente, y la dureza, como para variable dependiente.

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre temperatura y 4 variables independientes.

La ecuación del modelo ajustado es:

Temperatura = -13865,4

Unifilar 25 mm - 1855,3\*

Unifilar 4 mm- 239,919\*

Multifilar 55 hilos+ 3530,41\*

Multifilar 113 hilos - 993,308\*

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 100 % de la variabilidad en temperatura. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 0,0 %. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0,0.

El error absoluto medio (MAE) de 1,19035E-9 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar la correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero.

## **Análisis de varianza**

El análisis de la varianza ANOVA descompone la variabilidad de carga en las contribuciones debidas a varios factores. Al elegirse la suma de cuadrados Tipo III (valor por defecto) se mide la contribución de cada factor eliminando los efectos del resto de los factores. En la Tabla 3 se recoge el resumen del análisis de varianza para temperatura vs dureza.

Tabla 3. Resumen del análisis de varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio
Modelo	745 439,0	4	186 360,0
Residuo	0,0	0	0,0
Total (Corr.)	745439,0		
R-cuadrado = 100,0 porcentaje			
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 0,0 porcentaje			
Error estándar de est. = 0,0			
Error absoluto medio = 1,19035E-9			
Estadístico de Durbin-Watson = 2,62295			
Autocorrelación residual en Lag 1 = -0,347662			

Los P-valores comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Dado que ningún P-valor es inferior a 0,05, ninguno de los factores tiene efecto estadísticamente significativo en temperatura para un nivel de confianza del 95,0 %.

El análisis de las características observadas está basado en la modelación matemática de ellas mediante el modelo lineal. En el ANOVA la repetición de la observación se debe entender como la repetición del experimento, entendiéndose por repetición (réplica) la realización repetida del hecho que se estudia bajo las condiciones que los caracterizan; no es recomendable la utilización de esta técnica para una sola observación.

### Conclusiones

Las microestructuras analizadas en los conductores eléctricos unificar de diámetro de 2,5 mm, el de 4 mm, en los multifilar de 55 hilos y el de 113 hilos, se pudo determinar que en su corte longitudinal y transversal las estructuras obtenidas son de granos equiaxiales de diferentes tamaños orientados al azar, de bordes rectos y curvados, engrosamiento de grano y maclas y de formación de eutéctico.

Al realizar el análisis de microdureza se comprobó que existe una disminución de la dureza de 89,75 HV para el conductor unificar de 2,5 mm, hasta una dureza de 51,11 HV para el multifilar de 113 hilos, luego del tratamiento térmico de recocido impuesto por el fuego.

## Referencias bibliográficas

- BABRAUSKAS, V. 2003: Fires due to Electric Arcing: Can 'Cause' Beads Be Distinguished from 'Victim' Beads by Physical or Chemical Testing? *Fire and Materials* p. 189–201.
- CLARKE, C. 2006: Evaluation of fire damaged copper wire. *Advanced Materials & Processes*, April.
- HUMPHREYS, J. 2006: Recrystallization, Materials Science Center. The University of Manchester. Disponible en: <http://www.recrystallization.info>
- HYUK, S.; CHEOL-KIM, R. & PARK, K. 2000: Microstructure Changes in Equal Channel Angular Pressed Low Carbon Steel by Static Annealing. *Acta Materialia* (48): 3 245–3 252.
- KUZNIK, F.; VIRGONE, J. & NOEL, J. 2008: Optimization of a phase change material wallboard for building use. *Applied Thermal Engineering* 28(11-12): 1 291–1 298.
- LIENHARD, J. & LIENHARD, J. 2005: *Transfer textbook*. Phlogiston Press.
- LUGO, N.; CABRERA, J.; PUCHI, E.; & PRADO, J. 2003: Deformación a alta temperatura bajo condiciones de deformación variable de un acero ARMCO. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.* 18(2): 47–61.
- MÉNDEZ, V. 2000: *Impacto ambiental producido por el proceso de combustión en calderas*. Tesis de maestría. Universidad de Cienfuegos. 92 p.
- MONTOLIU, A. 2007: *El fuego y la electricidad en instalaciones de baja y alta tensión*. Fundación Mapfre.
- POLMEAR, I. 2006: *Light Alloys, from traditional Alloys to Nanocrystals*. Ed. Elsevier.
- PONS, G. 2003: *Dinámica del fuego. Origen y causa de los incendios*. Ed. Abisal.
- PRASAD, Y. & RAO, K. 2004: Mechanisms of high temperature deformation in electrolytic copper in extended ranges of temperature and strain rate. *Materials Science and Engineering A*. 3(74): 335–341.



RAMUNNI, V.; DE PAIVA-COELHO, T. & DE MIRANDA, P. 2006: Interaction of hydrogen with the microstructure of low-carbon steel. *Materials Science and Engineering A*. 435 - 436 504-514.

TARÍN, R. & BADÍA, P. 2006: Apuntes Aleaciones Ligeras (guiones y figuras) E.T.S.I. de Aeronáuticos.