

**TESINA DE MÁSTER**

ESTUDIO DEL EFECTO DEL  
FUEGO EN LOS CAMBIOS  
MICROESTRUCTURALES DE  
LAS ALEACIONES DE COBRE

**Autor:** Inmaculada López Sánchez

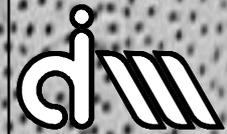
**Tutor:** Vicente Amigò Borràs

**Valencia, 2009**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**



**Departamento de Ingeniería  
Mecánica  
y de Materiales**



## Agradecimientos

Quisiera agradecer a las personas que han hecho posible la realización de esta tesina de master:

En primer lugar a mi Director de tesina, Dr D. Vicente Amigó Borrás, por su paciencia, apoyo y disponibilidad en todo momento durante la realización del mismo

De igual manera quisiera agradecerles a todos mis compañeros del ITM por la ayuda prestada, Vicky, Oscar, Rut, Irma, Lissette, María Dolores, Juanjo, David....y a todos los demás, gracias por vuestro apoyo y amistad sin vosotros no hubiera sido posible esta tesina.

Finalmente, quisiera darle las gracias a mi familia y a Oscar, por su apoyo y cariño incondicional, por los ánimos de seguir adelante que me han dado a lo largo de este año, por eso quiero dedicarles a ellos esta tesina.

## INDICE

1.	Antecedentes .....	5
2.	Motivación.....	6
3.	Objetivos .....	7
4.	Panorama científico .....	8
4.1.	Propiedades y características del cobre.....	8
4.1.1.	Antecedentes históricos.....	8
4.1.2.	Generalidades.....	9
4.1.3.	Propiedades físicas.....	12
4.1.4.	Propiedades mecánicas.....	14
4.1.5.	Propiedades químicas.....	17
4.2.	Dinámica y efectos del fuego en los materiales.....	24
4.2.1.	Teoría sobre el fuego y características de los factores que intervienen. 24	
4.2.2.	Efectos del fuego sobre elementos metálicos.....	33
4.3.	Evaluación del daño.....	39
5.	Metodología de los ensayos.....	57
5.1.	Planificación de la investigación.....	57
5.2.	Tipología de conductores y materiales.....	58
5.2.1.	Tipología de los conductores.....	59

5.2.2.	Tipos de conductores.....	59
5.3.	Ensayos realizados.....	60
5.3.1.	Calentamiento en horno.....	64
5.4.	Manipulación de muestras y análisis macrográfico.....	68
5.5.	Caracterización microestructural.....	72
5.5.1.	Preparación metalográfica.....	73
5.5.2.	Microscopía óptica.....	80
5.5.3.	Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	83
5.5.4.	Ensayo de microdureza.....	88
5.5.5.	Medición del espesor de la capa de oxido.....	89
5.5.6.	Medición del tamaño de grano.....	90
5.6.	Análisis de incendios reales.....	91
6.	Resultados y discusión.....	95
6.1.	Estudio de la capa de oxido de cobre.....	95
6.1.1.	Medición del espesor de la capa de óxido.....	96
6.1.2.	Análisis de la capa de oxido por SEM.....	101
6.2.	Tamaño de grano.....	105
6.3.	Microdureza.....	109
6.4.	Observación de las diferentes microestructuras.....	111
6.5.	Casos de incendios reales.....	116

6.5.1.	Caso 1 incendio con código ITM 0620 .....	117
6.5.2.	Caso 2 incendio ITM 0708 .....	123
6.5.3.	Caso 3 incendio ITM 0725. ....	129
6.5.4.	Caso 4 incendio con código ITM 0633. ....	133
6.5.5.	Caso 5 incendio código 200202 .....	138
7.	Conclusiones: .....	148
8.	Referencias bibliográficas. ....	151

**ANTECEDENTES, MOTIVACION Y**  
**OBJETIVOS**

## **1. Antecedentes.**

En el Instituto de Tecnología de Materiales se han recibido, en los últimos años, gran cantidad de solicitudes de análisis de materiales afectados por el fuego. El objetivo de estas solicitudes era analizar la posible relación de las transformaciones de la microestructura ocurridas en el material incendio con la temperatura alcanzada. Debido a la demanda de estos estudios se han propuesto simular algunas de las condiciones que suceden durante los incendios, fundamentalmente la temperatura y el tiempo de permanencia a estas temperaturas.

Dentro de los materiales diversos que podemos encontrar en los lugares que han sufrido este tipo de daño destaca, por su abundancia y distribución homogénea a lo largo del local, el cobre [1]. Los elementos conductores gozan de una característica que los hace prácticamente únicos y es la uniformidad de su uso a nivel mundial, por lo que su composición y procesado es prácticamente el mismo en todos los casos [2]. Además se cuenta con transformaciones simples de recocido contra acritud y fusión-solidificación con ausencia de transformaciones alotrópicas, eutectoides y peritectoides que dificultarían su análisis y complicarían los tratamientos a estudiar [2-7].

Por tanto el motivo de este estudio es realizar unos tratamientos térmicos que reproduzcan las condiciones extremas a las que pueden estar sometidos los elementos conductores en una instalación eléctrica y proceder a su estudio metalúrgico para determinar su estado de deterioro y las condiciones a las que han estado sometidos.

En el caso particular de los incendios podrían utilizarse estos conocimientos para determinar si un fallo de la instalación eléctrica ha sido la causa o no del incendio, aunque ello viene dificultado por los devastadores efectos del fuego que modifican la microestructura y propiedades de los materiales implicados [8] no pudiéndose observar los efectos nítidos que pudieran revelar las causas del incendio. A pesar de ello es importante el estudio que pudiera realizarse sobre estos materiales al obtener valiosa información de las condiciones operantes a lo largo del suceso.

Puesto que el elemento que se encuentra de forma mayoritaria en todas las instalaciones son los conductores de cobre [1, 9] se centrará el estudio en éstos. Por ello se seleccionarán las configuraciones de cables más comunes en las líneas de acometida y

alimentación en viviendas e industrias, para con ellos realizar los ensayos en laboratorio que puedan darnos información precisa del crecimiento de la capa de óxido en superficie o del tamaño de grano en la microestructura de estos conductores.

## **2. Motivación.**

Analizar la influencia de las variaciones de temperatura en los conductores metálicos más ampliamente utilizados, ampliando el conocimiento de las modificaciones microestructurales y las propiedades mecánicas producidas por tratamientos térmicos simulados en el laboratorio. Permitiendo de esta forma correlacionar y aportar luz sobre las transformaciones provocadas por incendios reales. A partir de los cambios producidos en el material original, centrándonos en sus propiedades microestructurales, así como en los indicadores mecánicos en escala micro a partir de los valores de su microdureza. Ampliando de este modo el reducido conocimiento encontrado en las referencias bibliográficas respecto a esta temática.

Lo mencionado anteriormente permitirá establecer una relación entre los patrones obtenidos en el laboratorio y la microestructura observada, tras las variaciones en la temperatura provocadas por los incendios, justificando las transformaciones sufridas.

Dentro del estudio de los efectos del fuego en conductores eléctricos, donde estadísticamente el 75% de los incendios se deben a una fuente de calor causada por un fallo eléctrico, tenemos que los más habituales que encontramos en todos los escenarios de los incendios reales son: aluminio, zinc, estaño, latón y cobre. Nos centraremos en el estudio de los cambios microestructurales del cobre ya que es el metal conductor más ampliamente utilizado y la mayoría de los estudios de incendios reales se centran en él.

### **3. Objetivos.**

El objetivo fundamental del trabajo es establecer la relación entre la microestructura del material, conductores de cobre de diferentes tipologías, con las variables que determinan finalmente los efectos del fuego, temperatura y tiempo de permanencia a ésta.

Como objetivos específicos podemos indicar como prioritarios los siguientes:

- Análisis del efecto de la temperatura y tiempo en el crecimiento de la capa de óxido superficial.
- Evaluación de la capa de óxido en función de la tipología de los cables que pueden analizarse.
- Análisis del efecto de la temperatura, para tiempo determinado, en el tamaño de grano del cobre, estableciendo los modelos de crecimiento pertinentes.
- Evaluación del efecto de la tipología de los cables, número de hilos y diámetro de los mismos, con los cambios microestructurales observados.
- Relación entre los efectos observados en laboratorio y los provocados en fuegos reales, para lo que se analizarán en profundidad los conductores de algunos incendios reales que se han estudiado en el Instituto de tecnología de Materiales.
- Establecer el alcance de las relaciones encontradas entre los hilos conductores en condiciones de servicio y las obtenidas en laboratorio para establecer las semejanzas y diferencias que permitan una mejor interpretación de los resultados obtenidos.

## **4. Panorama científico.**

Para cumplir con estos objetivos es necesario en primer lugar encuadrar el material de estudio y las transformaciones que se espera encontrar por el efecto de las condiciones térmicas impuestas por situaciones de fuego real. Para ello haremos una revisión del estado del arte comenzando con las propiedades y características del cobre desde su extracción y tratamiento a su aplicación como conductor, haciendo especial mención de la difusión y efecto del oxígeno en el mismo. Se continuará con un apartado dedicado a la dinámica y efectos del fuego en los materiales, para finalizar con la evaluación del daño en los conductores de forma que se enmarque perfectamente el problema tratado en el presente trabajo.

### **4.1. Propiedades y características del cobre.**

#### **4.1.1. Antecedentes históricos.**

El cobre, de símbolo Cu (del latín cuprum), es el elemento químico, se trata de un metal de transición de color rojizo y brillo metálico que, junto con la plata y el oro, forma parte de la llamada familia del cobre, caracterizada por ser los mejores conductores de electricidad. Gracias a su alta conductividad eléctrica, ductilidad y maleabilidad, se ha convertido en el material más utilizado para fabricar cables eléctricos y otros componentes eléctricos y electrónicos .

Es uno de los primeros metales utilizados por el ser humano y en sus distintas aleaciones todas las civilizaciones han hecho uso de él. Las razones por las que fue empleado de manera tan precoz son la existencia de cobre nativo en estado casi puro y su facilidad de extracción dado su baja temperatura de reducción con carbón vegetal.

El cobre y su aleación con el estaño, el bronce, adquirieron tanta importancia que los historiadores han llamado Edad del Cobre y Edad del Bronce a dos periodos de la Antigüedad. Aunque su uso perdió importancia relativa con el desarrollo de la siderurgia, el cobre y sus aleaciones siguieron siendo empleados para hacer objetos tan diversos como monedas, campanas y cañones. A partir del siglo XIX, concretamente de la invención del generador eléctrico en 1831 por Faraday, el cobre se convirtió de nuevo en un metal estratégico, al ser la materia prima principal de cables e instalaciones eléctricas [2,3].

Forma parte de una cantidad muy elevada de aleaciones que generalmente presentan mejores propiedades mecánicas, aunque tienen una conductividad eléctrica menor. Las más importantes son conocidas con el nombre de bronce y latones. Por otra parte, el cobre es un metal duradero porque se puede reciclar un número casi ilimitado de veces sin que pierda sus propiedades mecánicas [3].

Por sus propiedades se aproxima a los metales preciosos con características como resistencia a la corrosión, conductividad eléctrica y térmica, colorido y maleabilidad. Otras características específicas de sus aleaciones le han dado desde la antigüedad un alto valor metalúrgico. Los bronce al estaño, los cuproaluminios, los latones, han permitido ampliar el campo de aplicación de este metal.

El cobre es el tercer metal más utilizado en el mundo, por detrás del acero y el aluminio. La producción mundial de cobre refinado se estimó en 15,8 Mt en el 2006, con un déficit de 10,7% frente a la demanda mundial proyectada de 17,7 Mt. [2].

#### **4.1.2. Generalidades.**

El cobre tiene una gran variedad de aplicaciones a causa de sus ventajosas propiedades, como son su elevada conductividad del calor y electricidad, la resistencia a la corrosión, así como su maleabilidad y ductilidad, además de su belleza. Debido a su extraordinaria conductividad, sólo superada por la plata, el uso más extendido del cobre se da en la industria eléctrica. 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 4.200 kg/cm<sup>2</sup> (420 MPa). Puede usarse tanto en cables y líneas de alta tensión exteriores como en el cableado eléctrico en interiores, cables de lámparas y maquinaria eléctrica en general: generadores, motores, reguladores, equipos de señalización, aparatos electromagnéticos y sistemas de comunicaciones [2,3].

La metalurgia del cobre varía según la composición de la mena. El cobre en bruto se tritura, se lava y se prepara en barras. Los óxidos y carbonatos se reducen con carbono. Las menas más importantes, las formadas por sulfuros, no contienen más de un 12% de cobre, llegando en ocasiones tan sólo al 1%, y han de triturarse y concentrarse por flotación. Los concentrados se funden en un horno de reverbero que produce cobre

metálico en bruto con una pureza aproximada del 98%. Este cobre en bruto se purifica por electrólisis, obteniéndose barras con una pureza que supera el 99,9 por ciento.

El cobre puro es blando, pero puede endurecerse posteriormente. Las aleaciones de cobre, mucho más duras que el metal puro, presentan una mayor resistencia y por ello no pueden utilizarse en aplicaciones eléctricas. No obstante, su resistencia a la corrosión es casi tan buena como la del cobre puro y son de fácil manejo. Las dos aleaciones más importantes son el latón, una aleación con cinc, y el bronce, una aleación con estaño. A menudo, tanto el cinc como el estaño se funden en una misma aleación, haciendo difícil una diferenciación precisa entre el latón y el bronce. Ambos se emplean en grandes cantidades. También se usa el cobre en aleaciones con oro, plata y níquel, y es un componente importante en aleaciones como el monel, el bronce de cañón y la plata alemana o alpaca [2,3].

Algunas disoluciones de cobre tienen la propiedad de disolver la celulosa, por lo que se usan grandes cantidades de cobre en la fabricación de rayón. También se emplea el cobre en muchos pigmentos, en insecticidas como el verde de Schweinfurt, o en fungicidas como la mezcla de Burdeos, aunque para estos fines está siendo sustituido ampliamente por productos orgánicos sintéticos.

#### **4.1.2.1. Obtención.**

El cobre ocupa el lugar 25 en abundancia entre los elementos de la corteza terrestre. Frecuentemente se encuentra agregado con otros metales como el oro, plata, bismuto y plomo, apareciendo en pequeñas partículas en rocas, aunque se han hallado masas compactas de hasta 420 toneladas.

El cobre se encuentra por todo el mundo en la lava basáltica, localizándose el mayor depósito conocido en la cordillera de los Andes en Chile, bajo la forma de pórfido. Este país posee aproximadamente el 25% de las reservas mundiales conocidas de cobre y a comienzos de 1980 se convirtió en el primer país productor de este metal. Los principales yacimientos se localizan en Chuquicamata, Andina, El Salvador y El Teniente [2,3].

Las principales fuentes del cobre son la calcopirita y la bornita, sulfuros mixtos de hierro y cobre. Otras menas importantes son los sulfuros de cobre, calcosina y covellina; la

primera se encuentra en Chile, México, Estados Unidos y la antigua URSS, y la segunda, en Estados Unidos.

#### **4.1.2.2. Las etapas de la extracción.**

- Enriquecimiento del mineral.
- Preparación de un mixto por tostación oxidante.
- Fusión del mixto y obtención de la mata.
- Afino de la mata para obtener el “cobre negro” (blister).
- Afino al fuego o por electrolisis.

Una operación importante que se lleva a cabo en el proceso de fusión del cobre es la transformación de la mata de cobre en cobre blister o cobre negro [2,3].

El convertidor consiste en un cilindro horizontal de acero con toberas por las que inyectar aire a presión que al atravesar la mata permite la oxidación de sus componentes. La carga esta compuesta por la mata en estado líquido procedente del horno de reberbero y compuesta por sulfuros de hierro y de cobre. Al iniciarse el soplado comienza la oxidación y la formación de escorias. Cuando las llamas que salen por la boca del convertidor cambian de color se procede al desescoriado. Terminado el desescoriado se vuelve el convertidor a la posición de trabajo y se vuelve a insuflar aire y comienza la segunda fase. En ésta se verifica la oxidación de  $\text{Cu}_2\text{S}$  (sulfuro cuproso), de acuerdo con la siguiente reacción:



Cuando el color de la llama pasa de amarillo a casi incoloro es señal de que se ha eliminado el azufre, quedando únicamente en el convertidor cobre metálico. El cobre fundido se cuela en calderos y a continuación en lingotes de sección rectangular para su envío a las plantas de afino. El gas desprendido en la solidificación del cobre produce irregularidades superficiales, que dan lugar al nombre que recibe de cobre blister o con veteaduras [2,3].

Los procesos metalúrgicos de extracción y afino del cobre tradicional permiten obtener cobre refinado “térmico” con un contenido de cobre de un 99,85%. Existen, en este producto, una serie de impurezas aún presentes, de las que la más importante es el oxígeno. En este tipo de cobre no se alcanza la conductividad eléctrica potencial máxima, únicamente un 85 a 95% de la misma.

Sin embargo, en muchos casos, el cobre refinado “térmico” de relativa impureza no es utilizado directamente sino que se somete a un proceso de afino electrolítico. El producto resultante es el denominado cobre “electrolítico”, de alta conductividad también, y con un contenido mínimo de cobre del 99,9% [2,3].

El cobre se utiliza tanto en piezas coladas como forjadas. Sin embargo, la mayor parte del cobre se consume en forma de productos semielaborados forjados tales como alambres , bandas, chapas , perfiles , tubos, etc. Para la fabricación de estos productos semielaborados se parte de las siguientes formas comerciales [2,3]:

- Lingote alambre (wirebar):

Se le destina a la laminación y a la trefilación. Tiene sección trapezoidal, de altura variable entre 85 y 125mm, longitud entre 1.000 y 1.370 mm y peso de 60 a 190kg.

- Placas:

Destinadas a la laminación de chapas o bandas, son de sección rectangular y de dimensiones variables .Su peso varia normalmente entre 65 y 1.800 Kg aunque pueden alcanzarse pesos superiores.

- Tochos:

Son destinados a procesos de punzonado o de extrusión, seguidos de la laminación o estirado; son de sección circular, con diámetro comprendido entre 75 y 250mm, su longitud máxima es de La extracción comprende las siguientes etapas:

#### **4.1.3. Propiedades físicas.**

Las principales propiedades físicas están recogidas a continuación:

- Número atómico: 29.
- Masa atómica: 63,54.
- Densidad: 8,93 (sin poros).
- Punto de fusión: 1083° C.
- Temperatura de ebullición: 2310° C.
- Calor específico: 0,92 cal/g.
- Calor latente de fusión: 50,6 cal/g.
- Módulo de elasticidad: 12.650 kg/mm<sup>2</sup>.
- Coeficiente lineal de dilatación térmica (25° C):  $16,47 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .
- Conductividad eléctrica 59 m/ohm · mm<sup>2</sup>.
- Conductividad térmica 0,39 cal/cm · s · g.

El cobre cristaliza según una red cúbica centrada en las caras. Los átomos están situados en cada uno de los vértices y en el centro de las caras. La constante reticular es  $a = 3,608 \text{ \AA}$  a 18° C. Estas características de la estructura son importantes dado que a ellas se debe la gran capacidad de deformación del cobre.

Uno de los mecanismos principales de deformación plástica de los metales es el deslizamiento a lo largo de determinados planos cristalográficos según direcciones definidas. Estos planos y direcciones son respectivamente los de mayor densidad atómica y los más densamente poblados por átomos. En el sistema cúbico centrado en las caras, el número de planos de mayor densidad atómica, que son los octaédricos (111), es 4 y las direcciones más densamente pobladas son 12, que corresponden a las direcciones [10], [110] o [101].[4-6].

La existencia de este gran número de planos y direcciones potenciales de deslizamiento explica la facilidad de deformación plástica del cobre sometido a la aplicación de esfuerzos.

El punto de fusión es de 1083° C para el cobre puro y de 1063° C para el eutéctico Cu – Cu<sub>2</sub>O (con un 0,39% de oxígeno). [2,3].

#### **4.1.3.1. Conductividad eléctrica.**

Después de la plata el cobre es el mejor conductor de la electricidad. La resistividad del cobre es de 1,7241 microhmios cm<sup>2</sup>/cm. La plata tiene una conductividad del orden de un 6% mayor, si bien razones económicas no justifican su empleo en proporciones industriales.

El cobre con la resistividad citada tiene por convenio una conductividad de 100 IACS a 20° C (International Annealed Copper Standard).

De hecho los cobres más puros pueden alcanzar 101 y hasta 102 IACS en estado recocido. El cobre OFHC obtenido por procesos especiales, libre de oxígeno, es un poco inferior a estos valores, debido a que no está presente el oxígeno para transformar a óxidos insolubles las últimas impurezas solubles.

El efecto de las adiciones de los elementos de aleación y de la deformación en frío es aumentar la resistividad del cobre. Por otra parte, el cobre como todos los metales, tiene una resistividad descendente a medida que la temperatura se aproxima a 0 K y sobre todo si su pureza es muy alta (Superconductividad). [2,3].

El coeficiente de incremento lineal de la resistencia eléctrica a 20° C es igual a 0,00393.

Sin embargo las propiedades magnéticas son las de un material diamagnético, y están normalmente influidas por las

#### **4.1.4. Propiedades mecánicas.**

El cobre, como ya se ha indicado, posee una excelente capacidad de deformación, que se traduce en la existencia de un elevado alargamiento previo a la rotura en el material

recocido (y aún con acritud), y un intervalo considerable entre los valores del límite elástico y la carga de rotura. A continuación se indican los aspectos más sobresalientes de las diversas propiedades mecánicas.

En el cobre puro la resistencia mecánica en estado moldeado es similar a la que se obtiene en productos laminados, siempre que los productos sean compactos y de grano fino. En realidad esta última condición no se puede mantener para secciones de una cierta importancia, salvo que se utilice la colada continua. Como cifras representativas de las magnitudes pueden tomarse las siguientes:

Propiedades	Moldeado	Laminado y recocido
R kg/mm <sup>2</sup>	<b>20</b>	<b>22</b>
F kg/mm <sup>2</sup>	<b>4</b>	<b>4</b>
A %	<b>40</b>	<b>40 a 45</b>

**Tabla 1.** Magnitudes del cobre puro.

El módulo de elasticidad es de difícil determinación para el material en estado recocido, debido al bajo valor del límite elástico en esta condición. En el material con acritud, deformado, el valor del módulo de torsión varía entre 4200 y 4900 kg/mm<sup>2</sup>.

El coeficiente de Poisson es aproximadamente 0,35.

El límite de fatiga del cobre varía poco según las diferentes calidades del mismo, pero sin embargo son afectados de forma importante en frío.

En general las propiedades mecánicas del cobre varían poco según las diferentes calidades del mismo, pero sin embargo son afectados de forma importante por la deformación en frío. [2-3].

#### **4.1.4.1. Acritud.**

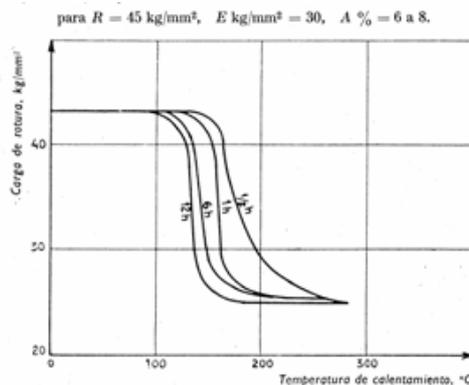
La gran ductilidad del cobre permite que sea sometido a deformaciones muy importantes, mediante cualquier proceso de deformación en frío. Es por esto que en el cobre puro la carga de rotura puede llegar a alcanzar valores de 42-45 kg/mm<sup>2</sup>.

En el cuadro siguiente se indican algunos valores medios de las diferentes propiedades mecánicas, para diversos grados de acritud.

	Deformación media (%)	R kg/mm <sup>2</sup>	E kg/mm <sup>2</sup>	A %
<b>Recocido</b>	0	23	7	45
<b>¼ duro</b>	10	27	21	25
<b>½ duro</b>	25	30	25	14
<b>4/4 duro</b>	50	35	32	6

**Tabla 2.** Valores de diferentes propiedades mecánicas, para diferentes grados de acritud del cobre.

La dureza Brinell del cobre HC pasa de 40 HB en estado recocido a cerca de 110 HB después de un deformación de  $\epsilon = 900\%$ . [2-3].



**Gráfica 1.** Curvas de recocido de un hilo de cobre electrolítico. Se relaciona la carga de rotura con la temperatura de calentamiento durante 30 min., 1 hora, 6 horas y 12 horas.

#### 4.1.4.2. Restauración y recristalización.

Los fenómenos de restauración y recristalización se presentan en el cobre con características similares a otros metales. La temperatura de recristalización está ligada a la pureza del cobre y a la importancia de la deformación previa.

Ya a temperaturas de  $100^\circ \text{C}$ , el cobre electrolítico presenta ablandamiento para un calentamiento de larga duración; este fenómeno se acelera de forma notable para temperaturas superiores a  $200^\circ \text{C}$ . Incluso en el cobre puro muy fuertemente deformado, el ablandamiento puede producirse a temperaturas próximas a la ambiente. [2,3].

#### **4.1.4.3. Resistencia mecánica a diferentes temperaturas.**

Las características mecánicas del cobre mejoran generalmente con el descenso de temperatura. La resistencia a la tracción y el límite elástico son más elevados que a temperatura ambiente, el alargamiento también aumenta.

Las propiedades de resistencia a la deformación del cobre descienden muy rápidamente por encima de los 100°C, aunque la capacidad de deformación permanece muy elevada hasta temperaturas próximas a la de fusión, siendo ésta una indicación de excelente aptitud para la deformación en caliente.

Las propiedades mecánicas del cobre permanecen a niveles satisfactorios hasta 150°C o todo lo más, 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 [2-3].

#### **4.1.5. Propiedades químicas.**

El cobre forma dos series de compuestos químicos: cuprosos, en los que el cobre tiene valencia +1, y cúpricos, en los que tiene valencia +2. Los compuestos cuprosos se oxidan fácilmente a cúpricos, en muchos casos por la mera exposición al aire y son de poca importancia industrial; los compuestos cúpricos son estables [2-3].

Se indica a continuación la acción de algunos elementos sobre el cobre.

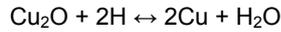
##### **4.1.5.1. Efecto del hidrógeno.**

El cobre líquido puede disolver cantidades importantes de hidrógeno. Por ejemplo, 100 g de cobre líquido a 1083°C disuelven 12 cm<sup>3</sup>, mientras que a esa misma temperatura pero en estado sólido, disuelven 8,3 cm<sup>3</sup>. Por tanto al solidificar un cobre conteniendo hidrógeno, se producirá un desprendimiento gaseoso interdendrítico en el líquido al final de la solidificación, que puede dar lugar a porosidades en las piezas moldeadas. Podrá dar lugar incluso a proyección de partículas metálicas incandescentes que acompañan al gas que se desprende.

El hidrógeno está presente en el cobre a la temperatura ordinaria, en solución sólida intersticial. El efecto más importante, por sus consecuencias extremadamente

negativas sobre el material, del hidrógeno, se presenta cuando el cobre contiene oxígeno. El oxígeno está presente en el cobre en forma de  $\text{Cu}_2\text{O}$ , disuelto en el cobre líquido, y bajo la forma de fase separada en el cobre en estado sólido.

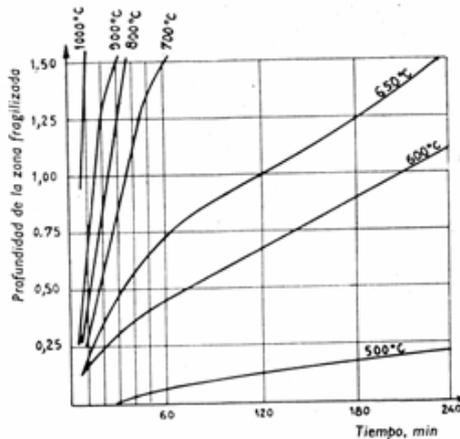
Como el hidrógeno se disuelve igualmente en el cobre, tanto en estado líquido como en estado sólido, la reacción:



Y puede producirse tanto en líquido como en sólido.

En estado sólido, el vapor de agua desprendido a causa del proceso de reducción puede eliminarse únicamente provocando una dislocación intergranular.

La amplitud y velocidad de crecimiento de la zona fragilizada, como consecuencia de la difusión del hidrógeno y de la reacción de reducción del  $\text{Cu}_2\text{O}$ , queda representada, como función de la temperatura y tiempo de calentamiento en la figura 58, referida a un cobre con un contenido del 0,042% de oxígeno. Puede observarse que ya a 500°C la penetración aunque lenta es ya apreciable.



**Gráfica 2.** Importancia de la zona fragilizada por el calentamiento en atmósfera de hidrogeno de un cobre que contiene 0.042% de oxigeno.

El contenido de oxígeno, por debajo del cual el efecto de la fragilización es despreciable, es difícil de definir y, aún para contenidos muy bajos en oxígeno, se produce la reacción de reducción, con formación de grietas localizadas en torno a las inclusiones de

Cu<sub>2</sub>O. Sólo el cobre totalmente desoxidado es completamente inmune a los efectos perniciosos del hidrógeno.

En los cobres oxidados el calentamiento sólo debe efectuarse en atmósferas oxidantes o neutras, las atmósferas reductoras deben evitarse totalmente. Por ejemplo son inaplicables los métodos de soldadura oxiacetilénica, de soldadura blanda con soplete, en estos casos es necesario emplear cobres sin oxígeno (desoxidados con fósforo o "exentos de oxígeno [2,3].

En los cobres sin oxígeno, se requieren unos contenidos extremadamente bajos de oxígeno, y no pueden efectuarse ciclos alternados de calentamiento en atmósfera oxidante y reductora (fragilización de la zona anteriormente oxidada).

Es de resaltar que, el vapor de agua no reduce el Cu<sub>2</sub>O, aunque es necesario vigilar la posible producción de hidrógeno en atmósferas con vapor de agua.

#### **4.1.5.2. Efecto de los halógenos.**

Atacan fácilmente al cobre, sobre todo en presencia de humedad; totalmente secos el cloro y el bromo no producen ningún efecto. El flúor no origina ataque más que por encima de los 500°C.

Los compuestos halogenados orgánicos pueden transportarse o almacenarse en recipientes de cobre, a condición de que no se produzcan descolocaciones (limitación de temperatura y ausencia total de humedad).

El ácido clorhídrico ataca el cobre y a sus aleaciones en presencia de cinc, calor y humedad aceleran el ataque. Sin embargo, ciertas aleaciones de cobre resisten bastante bien la presencia de soluciones clorhídricas (cuproníqueles, aleaciones con silicio) resisten bastante bien en presencia de soluciones clorhídricas diluidas. [2,3].

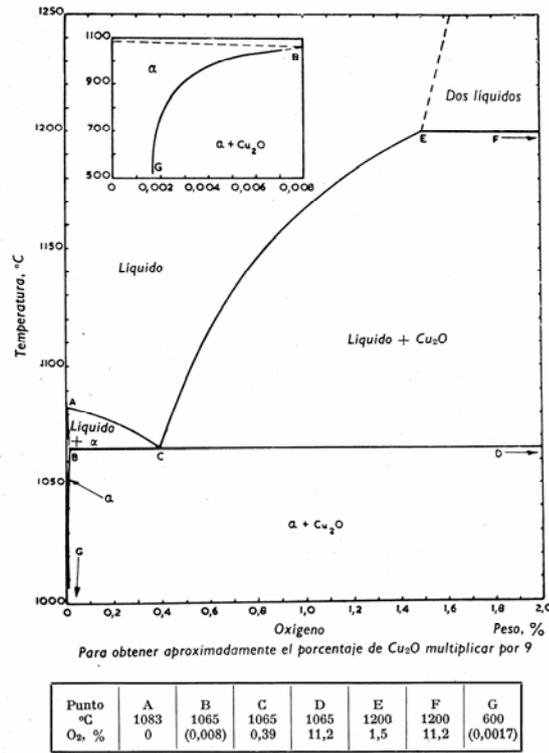
El cobre también es atacado por los cloruros, aunque el agua de mar solo produce un ataque superficial.

Los ácidos fluorhídricos y bromhídricos atacan fuertemente al cobre y a todas sus aleaciones.

**4.1.5.3. Efectos del oxígeno.**

El oxígeno oxida al cobre y se disuelve en el cobre fundido, en forma de  $\text{Cu}_2\text{O}$ , formando con él un eutéctico de 0,39 % de oxígeno, o sea 3,6 % de  $\text{Cu}_2\text{O}$  aproximadamente, y que funde a los  $1065^\circ\text{C}$ .

El siguiente diagrama de estado  $\text{Cu} - \text{O}_2$  se comprueba que la solubilidad en estado sólido es pequeña:



**Gráfica 3.** Diagrama de estado del Cobre – Oxígeno

En la siguiente tabla se muestran los valores de la solubilidad del  $\text{Cu}_2\text{O}$  en el cobre sólido:

0,07 % de  $\text{Cu}_2\text{O}$  a  $1065^\circ\text{C}$  (líquido)

0,03 % de  $\text{Cu}_2\text{O}$  a  $900^\circ\text{C}$

0,015 % de  $\text{Cu}_2\text{O}$  a  $600^\circ\text{C}$

0,0015 % de  $\text{Cu}_2\text{O}$  a  $500^\circ\text{C}$

Sin embargo se debe prever que, a pesar de estos porcentajes pequeños, el oxígeno podría difundirse en el cobre sólido por calentamiento al aire [2, 3,9].

#### 4.1.5.3.1. Oxígeno y cobre líquido.

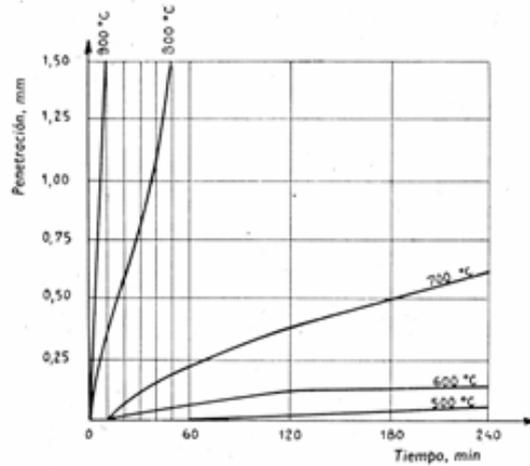
El oxígeno puede estar presente en el cobre de tres formas diferentes:

- En forma de óxido combinado con las impurezas del cobre no eliminadas durante la fusión. Este es un oxígeno inerte.
- En forma de solución sólida, invisible al microscopio óptico (fase  $\alpha$ ).
- En forma de  $\text{Cu}_2\text{O}$  rodeado de granos de solidificación de metal o superpuesto a la estructura actual si hubiera tenido lugar una transformación y recristalización.

No obstante, como el  $\text{Cu}_2\text{O}$  es parcialmente soluble en el cobre, es posible, en cierta medida, ponerlo en solución sólida mediante un calentamiento y hacerlo precipitar en las juntas de grano actuales realizando el enfriamiento lentamente [2,3].

#### 4.1.5.3.2. Difusión del oxígeno en estado sólido.

La importancia de esta difusión es escasa a temperaturas inferiores a  $600^\circ\text{C}$ . En la práctica, se comprueba que los cobres "puros" son poco susceptibles a la oxidación a causa de la saturación en oxígeno. Para ello se ha calentado una muestra de cobre OFHC al aire entre 0 y 240 minutos a  $500$ ,  $600$ ,  $700$ ,  $800$  y  $900^\circ\text{C}$  y posteriormente en hidrógeno durante 15 min.



**Gráfica 4.** Penetración de la fragilidad por calentamiento a 800°C durante 15 min en atmósfera de hidrogeno sobre un cobre OFHC calentando a 500-600-700-800-900 °C al aire entre 0 y 240 min.

#### 4.1.5.3.3. Capa de óxido superficial.

A la 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°C ésta película crece rápidamente. Bajo la acción de la humedad de los sulfuros, del gas carbónico, la película 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 se espesa y, según la pureza del metal puede o no escamarse. La ley de crecimiento y adherencia de la película tienen una gran importancia para ciertas aplicaciones. Las adiciones de fósforo favorecen el escamado de la película, sobre todo mediante un rápido enfriamiento por temple en agua después del calentamiento [3].

En siguientes apartados, Óxidos de cobre, se trata con mayor profundidad el fenómeno de la oxidación ya que tendrá mucha importancia en estudios posteriores

#### 4.1.5.4. Efectos del azufre.

El azufre se disuelve parcialmente en cobre tanto en medio seco como acuoso. El hidrógeno sulfurado y los sulfuros le atacan también, en presencia de agua o de aire. El azufre da con el cobre un diagrama de estado completamente análogo al del sistema cobre-

oxígeno. Eutéctico para S=0,77 % (4% de Cu<sub>2</sub>S) a 1067° C. En estado sólido la solubilidad es débil. El sulfuro de cobre puede reaccionar con el Cu<sub>2</sub>O para dar:



Si los contenidos del cobre fundido son los siguientes:

$$\text{S} = 0,040 \%$$

$$\text{O} = 0,030 \%$$

Se produce al final de la solidificación un desprendimiento de SO<sub>2</sub> (dióxido de azufre) en forma de burbujas parcialmente aprisionadas.

El ácido sulfúrico ataca al cobre, y sus soluciones diluidas lo atacan en presencia de aire. Se utilizan como baños de decapado, aunque tienen el inconveniente de no poder disolver el Cu<sub>2</sub>O [2].

#### **4.1.5.5. Acción del carbono.**

El cobre fundido puede absorber una cierta cantidad de carbono, sin embargo el carburo no es estable en el cobre solidificado.

El óxido de carbono prácticamente no se disuelve, pero es reductor en el metal solidificado. Debido a su acción el Cu<sub>2</sub>O se reduce en la interfase metal/CO, y las partículas subyacentes de Cu<sub>2</sub>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 pues posible, con tiempo suficiente, desoxidar totalmente un cobre oxidado por calentamiento en atmósfera de CO, y sin que se produzca ningún daño como ocurre en el caso del hidrógeno. Los ácidos orgánicos atacan fácilmente al cobre y a todas sus aleaciones [2,3].

## 4.2. Dinámica y efectos del fuego en los materiales.

### 4.2.1. Teoría sobre el fuego y características de los factores que intervienen.

Para poder entender las condiciones a las que pueden estar expuestos los conductores eléctricos durante un incendio explicaremos la teoría del fuego. Nuestra intención es que los experimentos o simulaciones que se realicen en el laboratorio se centren en reproducir las condiciones habituales que encontraríamos en un incendio confinado en viviendas, empresas industriales etc.

#### 4.2.1.1. Introducción.

El fuego, como todo proceso de la naturaleza, es un suceso irreversible. La mayor o menor velocidad de los procesos irreversibles, así como el que ocurran preferentemente unos y no otros, esta en función de la energía que intercambia, es una consecuencia de la función de estado definida en el segundo principio de la termodinámica y que se denomina entropía.

La trayectoria que sigue el fuego y la velocidad a la que se propaga constituyen la base de la dinámica del mismo, es decir, la fuerza con que el mismo se desencadena. Tanto la trayectoria como la velocidad del incendio son magnitudes vectoriales. La dinámica del incendio, es decir, la fuerza que expresa la severidad con la que el mismo se desarrolla, aparte de ser función de la velocidad con la que el incendio se propaga en un intervalo de tiempo y del combustible presente, depende también de las condiciones del escenario [8.10].

Todo incendio se puede expresar como una función del siguiente tipo:

Incendio  $(x, y, z, T, t, c, P, G)=0$

$x, y, z$ ; son las coordenadas que definen el espacio volumétrico donde el incendio se desarrolla.

$T$ : temperatura desarrolladas desde el inicio hasta el final del incendio.

$t$ : tiempo que dura el incendio, periódico de tiempo durante el cual se desarrolla.

q: carga de fuego; naturaleza del combustible.

c: concentración combustible/ comburente.

P: medidas pasivas de protección e instalaciones fijas de protección.

G: diseño geométrico del escenario donde el incendio transcurre.

Es evidente que todo incendio, que se origina en un punto, instantes antes del inicio:

$X=0, y=0, z=0$ , define el origen del incendio.

En  $t=0$ , la T será la del ambiente.

En esta función no puede contemplar en su análisis las acciones externas de los trabajos de intervención durante la extinción, considerando que el incendio se propaga sin más obstáculos que los que sean inherentes del escenario, es decir, las medidas pasivas de protección [2,3].

#### 4.2.1.2. Principios del fuego.

Para que se produzca un incendio o una explosión han de coincidir los elementos del llamado tetraedro del fuego:

Combustible

Comburente

Fuente de ignición (calor)

Reacción en cadena

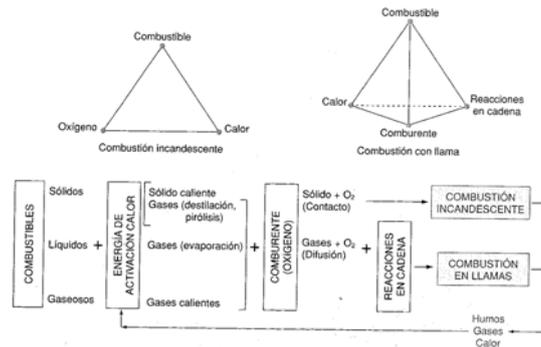


Fig 1. Factores de la combustión

El combustible ha de estar en cantidad suficiente y dispuesto en forma adecuada para que pueda iniciarse, mantenerse y propagarse la combustión. El comburente también ha de estar en las proporciones adecuadas aunque de forma mayoritaria este resulta ser el

propio oxígeno del aire. En cuanto a la fuente de calor es el punto donde se localiza la energía calorífica suficiente para comenzar la combustión [11].

Los incendios eléctricos se originan principalmente por:

El calentamiento local provocado por contactos defectuosos.

El calentamiento excesivo como resultado de una sobretensión o una sobreintensidad.

La formación de arco eléctrico

Estas causas pueden venir originadas por:

Consecuencia de instalaciones defectuosas.

Puesta en marcha o en funcionamiento de instalaciones no idóneas por deficiencias en el proyecto.

Sobrecargas producidas a causa de ampliaciones de potencia sin modificar las instalaciones ya existentes.

Equipos desgastados por su utilización continuada cables que han llegado al fin de su vida útil.

Errores de diseño.

Problemas de electricidad estática al no haberse establecido medidas para su prevención o su descarga controlada.

#### **4.2.1.3. Trayectoria y propagación del fuego.**

El fuego, en condiciones idóneas y no forzadas, sigue una trayectoria siempre vertical. Esto es así debido a que los gases que se producen en el mismo, al estar en contacto con la fuente de calor, aumentan su temperatura, con lo que disminuye su densidad.

La propagación de un incendio ocurre en cinco fases diferenciadas [11]:

**Fase de ignición:** Periodo en el que se inicia el fuego.

**Fase de desarrollo:** Básicamente es el desarrollo de la ignición en el que el crecimiento inicial del fuego se describe en esta fase en función de la energía desarrollada en la combustión. El fuego se describe en esta fase en función de la energía desarrollada en la combustión. En este momento existe suficiente cantidad de oxígeno y de combustible como para poder mantener combustión y como consecuencia, el desarrollo del incendio.

**Fase de pleno desarrollo:** Durante esta fase, el fuego se encuentra en todo su plenitud. Habitualmente, es en estos momentos cuando se produce una polimerización del combustible mientras arde, de tal forma que desaparece el oxígeno del recinto (como consecuencia del consumo del mismo durante la combustión) si no existe aporte adicional externo.

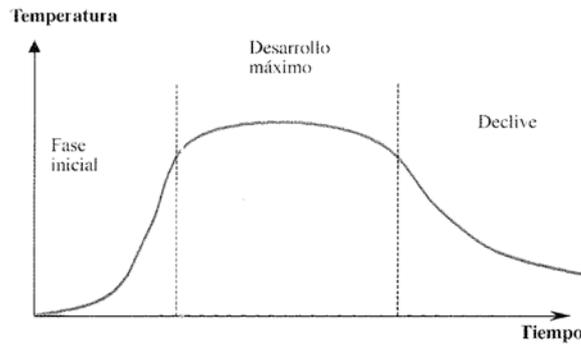
**Fase de declive:** Tiene lugar conforme va desapareciendo la cantidad de combustible disponible.

En la fase de inicial, la elevación de la temperatura es gradual en función del tiempo. El calor en el escenario se propaga fundamentalmente por radiación, excepto en el donde de genera el incendio, donde existe una pequeña transmisión de calor por convección.

Trascurrido el tiempo, el incendio alcanza su máximo desarrollo, se consiguen las temperaturas más altas y el calor se transmite tanto por convección como por radiación.

A partir de este momento, el incendio entra en una fase de decaimiento, donde se disminuye la temperatura del escenario. Este decaimiento puede deberse bien a que se ha consumido toda la materia combustible, bien a la presencia del comburente se ha reducido drásticamente o ambas a la vez.

Cuando el decaimiento del incendio es una consecuencia de la disminución del combustible, el incendio tiende a extinguirse generalmente con una propagación convencional, pero si el decaimiento es consecuencia de la reducción de la presencia del comburente en el escenario, el incendio entra en una fase de asfixia que a veces consigue la extinción del mismo.



**Gráfica 5.** Gráfico de las fases de un incendio.

Con la finalidad de comprender la evolución de un incendio y entender sus posibles consecuencias, generalmente se representan “las temperaturas generadas durante su desarrollo” ( $T$ , en  $^{\circ}\text{C}$ ) en función del “tiempo transcurrido desde su inicio” ( $t$ , en minutos). Puede expresarse gráficamente  $T = f(t)$ , que representará la evolución de la temperatura. . [8, 10,11].

La necesaria sistematización del análisis del desarrollo de los incendios, a efectos de obtener conclusiones coherentes y comparables con un cierto rigor ha hecho que se generalice en todo el mundo la consideración de un “desarrollo normalizado” que permite establecer criterios homogéneos sobre muchos criterios de interés en el análisis de los incendios.

Como resultado de muchas experiencias y la observación y el análisis de incendios reales, se ha convenido establecer como fuego tipo normalizado (ISO) aquel que se desarrolla de tal modo que los incrementos de temperatura responden a la siguiente función del tiempo. [10]:

$$\text{Ecuación 1. } \Delta T = T - T_0 = 345 \log(8t + 1)$$

$T_0$ : temperatura inicial (ambiente) del horno donde se desarrolla el fuego en  $^{\circ}\text{C}$ .

$T$ : temperatura del horno en el instante  $t$ , en  $^{\circ}\text{C}$ .

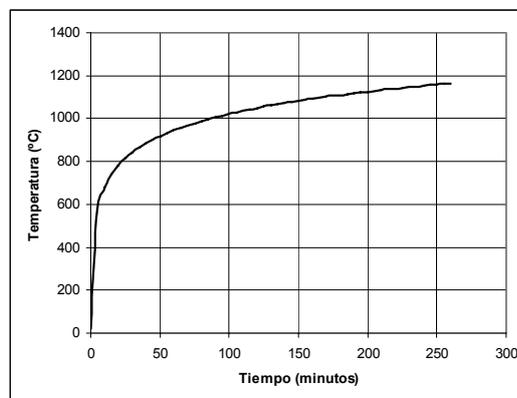
t : tiempo transcurrido desde que se inicia el fuego, en minutos.

Aplicando la anterior ecuación se obtienen los siguientes valores:

Tempo (min)	15	30	45	60	90	120	180	240
$\Delta T$ en °C	718	821	897	925	946	959	1000	1133

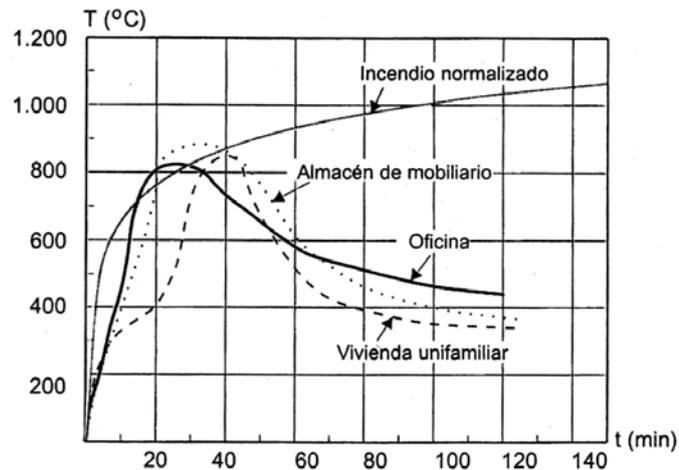
**Tabla 3.** Valores obtenidos mediante la expresión de fuego tipo normalizada ISO

Si representamos de forma continua las temperaturas obtenidas durante los 260 primeros minutos de un incendio estándar se obtiene la siguiente figura:



**Gráfica 6.** Representación del fuego tipo Programa Térmico normalizado

Desgraciadamente la mayoría de los fuegos ocurren en condiciones no previstas. En la Gráfica 7 se muestra el desarrollo de la temperatura en función del tiempo, durante un incendio de edificios de distinto uso [10]:



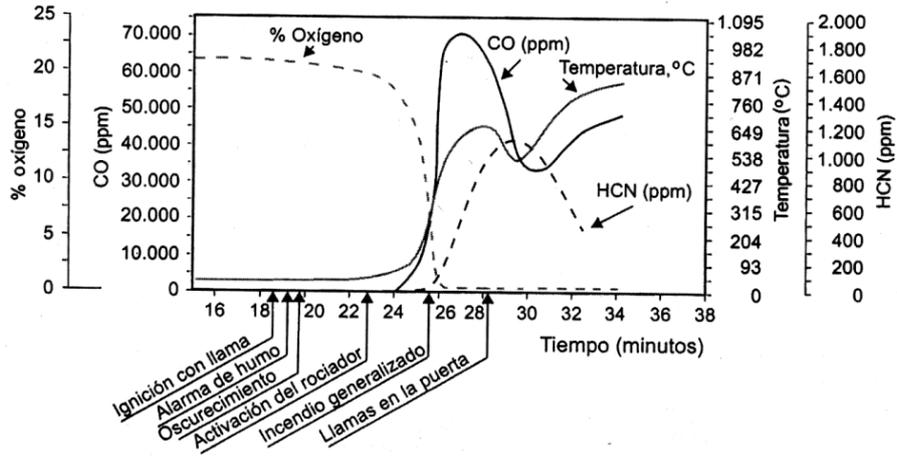
**Gráfica 7.** Desarrollo de la temperatura en función del tiempo, durante el incendio de edificios de distinto uso.

#### 4.2.1.4. Productos de la combustión.

Con la intención de entender mejor las condiciones a las que están expuestas las instalaciones eléctricas vamos a estudiar los productos de la combustión que tradicionalmente se clasifican en cuatro: gases, humo, llamas y calor.

##### 4.2.1.4.1. Gases.

Gases de combustión se consideran a aquellos gases que permanecen en el aire al reducirse los productos de combustión a sus temperaturas normales. El tipo de gases que se forman depende de muchos factores, siendo los principales: la composición química del combustible, la cantidad y composición del comburente que interviene (sobre todo el oxígeno) y la temperatura o gradiente alcanzado. La mayor parte de los materiales combustibles contienen carbono que al quemarse forma anhídrido carbónico, si la concentración de aire es suficiente, pero pueden producir monóxido de carbono, si dicha concentración es baja. En general, salvo cuando hay previamente una mezcla aire combustible, la concentración de aire en la zona suele ser baja. Estos dos unidos al vapor del agua son los gases de combustión más abundantes en los incendios, pero hay una serie de compuestos que habitualmente se producen en los siniestros, tales como el amoníaco, anhídrido sulfuroso, ácido cianhídrico, óxidos de nitrógeno, fosgeno y ácido clorhídrico, ácidos halogenados, acroleína, etc. [11].



Gráfica 8. Secuencia de sucesos y desarrollo de la toxicidad y del calor a un altura de 1m en la habitación de un hotel.

Estos productos pueden aparecer en los análisis químicos realizados sobre las muestras de conductores recogidas en el escenario del incendio.

Gases	Características
CO Monóxido de carbono	-Muy abundante -Carbustión incompleta
CO <sub>2</sub> Dióxido de carbono Anhidrido carbónico	-Muy abundante -Carbustión completa
H <sub>2</sub> S Sulfuro de hidrógeno Sulfídrico	-Carbustión incompleta de gases, lamas, cenizas y póles
SU <sub>2</sub> Anhidrido sulfuroso Nitrógeno de azufre	-Carbustión de lamas, gases y algunas maderas
NH <sub>3</sub> Amoniaco	-Carbustión de lamas, cenizas, plásticos sulfuros y resinas
HCl Cloruro de hidrógeno Clorídrico	-Carbustión incompleta de lamas, cenizas y plásticos
Cl <sub>2</sub> Cloruro de hidrógeno Clorídrico	-Carbustión de plásticos con cloro en su molécula (PVC)
NO <sub>2</sub> Dióxido de nitrógeno	-Carbustión de alambres de cables y aislamientos
CH <sub>3</sub> CHO Acroleína aldehído	-Carbustión de productos parafínicos, grasas y aceites
Cl <sub>2</sub> CO Fosgeno Oxicloruro de carbono	-Cuando un compuesto clorado entra en carbustión -Carbustión del PVC

Tabla 4. Gases más abundantes con distintos tipos de combustibles.

#### **4.2.1.4.2. Llamas.**

La llama es una masa incandescente formada por gases, que sufre el proceso de combustión. Las llamas consisten generalmente en una mezcla de oxígeno (o aire) y otro gas, normalmente combustible, como hidrógeno, monóxido de carbono o un hidrocarburo. Esta llama tiene tres zonas que se distinguen fácilmente. La zona interior, un cono no luminoso, está compuesta por una mezcla de gas y aire a una temperatura comparativamente baja. [11].

En el segundo cono, que es luminoso, se producen hidrógeno y monóxido de carbono por descomposición, que empiezan a reaccionar con el oxígeno para formar agua y dióxido de carbono respectivamente. En este cono la temperatura de la llama (de 590 a 680°C) es suficientemente alta como para disociar los gases de la llama y producir partículas libres de carbono, que se calientan hasta la incandescencia y luego se consumen. El carbono incandescente produce la luz amarilla característica de esta parte de la llama. En el exterior, la zona luminosa es un tercer cono invisible en el que se consumen el monóxido de carbono e hidrógeno restantes.

Si se introduce un objeto frío en la parte exterior de una llama, la temperatura de esa parte descenderá por debajo del punto de combustión, y se desprenderán carbono y monóxido de carbono sin quemar. Por ejemplo, si se pasa un plato de porcelana a través de la llama de una vela, el carbono se depositará en el plato en forma de hollín. Es peligroso dejar funcionando una estufa que produzca llama en una habitación sin ventilar, pues produce monóxido de carbono, que es venenoso.

Todas las sustancias combustibles requieren una proporción definida de oxígeno para arder completamente. (Se puede mantener una llama en una atmósfera de cloro puro, pero la combustión no es completa). En la combustión de una vela, o de sólidos como la madera y el carbón, este oxígeno es suministrado por la atmósfera que los rodea. En los sopletes y otros tipos de mecheros (quemador) de gas, se mezcla aire u oxígeno puro con el gas en la base del mechero, de forma que el carbono se consume casi instantáneamente en la boca del mechero. Por este motivo, las llamas no son luminosas.

Estas llamas ocupan un volumen menor y son proporcionalmente más calientes que la llama de una vela. La parte más caliente de la llama de un mechero Bunsen tiene una temperatura de unos 1.600°C. La parte más caliente de las llamas de oxígeno-acetileno

utilizadas para soldar metales alcanza los 3.500°C; dichas llamas tienen un cono verde azulado en lugar del cono luminoso. Si se reduce el suministro de oxígeno, estas llamas tienen cuatro conos: no luminoso, verde-azulado, luminoso e invisible.

Al cono verde-azulado de cualquier llama se le suele llamar cono reductor, porque al no tener suficiente oxígeno lo adquiere de las sustancias situadas en su interior. De la misma forma, al cono exterior, que tiene un exceso de oxígeno, se le llama cono oxidante [11].

#### **4.2.1.4.3. Humo.**

El humo está formado por pequeñas partículas sólidas parcialmente quemadas y por vapor condensado, en suspensión en el aire y gases de combustión. El color, tamaño y cantidad de estas partículas determinan el espesor del humo; también el vapor del agua condensado espesa el humo. La formación del humo es favorecida por la combustión incompleta del combustible, normalmente por falta de oxígeno (en sótanos y garajes se generan humos opacos), por la humedad de los materiales y el ambiente, y por la naturaleza del combustible.

Según el combustible tenemos humos blancos (vegetales, fósforos, polímeros sintéticos, etc.), Amarillos (azufre, ácidos clorhídrico y nítrico, etc.), Grises (celulosas comunes, fibras artificiales, etc.), Negros claros (algunos cauchos, altos polímeros, poliéster, etc), y negros oscuros y opacos (plásticos e hidrocarburos, fibras acrílicas, poliestirenos, etc.). En los incendios también se pueden producir daños materiales por humo muy importantes, ya que dichas partículas, gases y vapores suspendidos en el aire se adhieren y corroen a los bienes y materiales [11].

#### **4.2.2. 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, permitiendo 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. Esta difusión se realiza a través del borde grano por la formación de fases en él, como es el caso del oxígeno.

Resulta necesario trabajar con diferentes herramientas para cualificar y cuantificar el efecto del fuego en los metales:

- Herramientas analíticas. Fundamentalmente en el análisis químico de los materiales, tanto másico como superficial.
- Herramientas metalográfica. Fundamentadas en el análisis metalográfica y la observación microscópica de los materiales y en particular de los metales [8,10].

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

Para la determinación de la temperatura alcanzada por los elementos metálicos presentes en el escenario del incendio, pilares, correas componentes de maquinas, etc., se realiza una inspección con objeto de determinar el grado de deterioro, el cual se correlaciona tanto por la observación de fusión en algunos materiales como por el hallazgo de deformaciones de fluencia o indicios de corrosión.

El grado de deterioro se puede cuantificar a través de las manifestaciones siguientes:

**Zonas fundidas en materiales o piezas.** En el escenario del incendio industrial existen gran cantidad de metales y aleaciones metálicas, así como elementos no metálicos, que pueden encontrarse fundido, indicándonos la temperatura que como mínimo alcanzó el incendio en aquellos lugares donde se encuentran. Los de punto de fusión más bajos se ven en muchas ocasiones (aluminios, plásticos, etc.). Los metales de punto de fusión mas alta se presentan mas raras veces fundidos en el escenario del incendio, y solo se ven en aquellos casos en que la carga calorífica es muy elevada. El hecho de observar metales de bajo punto de fusión fundidos en un indicio de la temperatura que como mínimo se ha alcanzado durante el incendio, pero no indica la temperatura máxima desarrollada, que puede, y de hecho en muchos casos es superior a la temperatura de fusión de dichos metales.

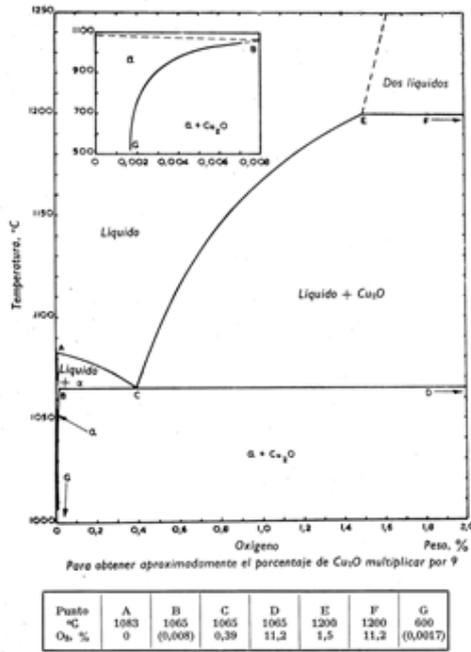
**Deformaciones provocadas por la fluencia.** Los ensayos de fluencia se realizan para analizar las características resistentes de los materiales en las condiciones que muestran un comportamiento viscoelástico. Se dice que un material trabaja a fluencia cuando experimenta alargamientos crecientes en función del tiempo, aun para cargas aplicadas constantemente.

**Corrosión seca.** Todos los metales se oxidan más rápidamente cuando aumenta la temperatura, a excepción de la plata. El calor desarrollado por el incendio sobre superficie metálica hace que se libera oxígeno, que produce una oxidación seca sobre el metal, que se ve incrementada cuando el mismo entra en contacto con el agua empleada en las tareas de extinción. El grado de corrosión es índice del calor al que se ha visto sometido el elemento metálico durante el incendio [8,10].

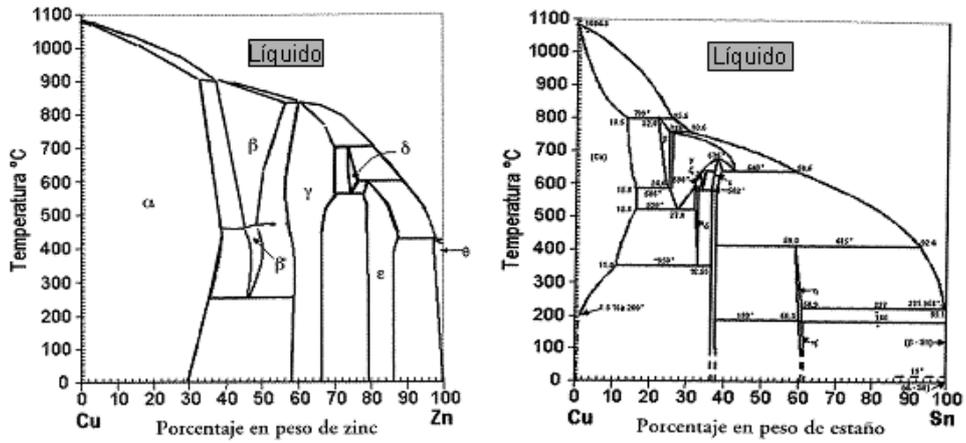
#### **4.2.2.2. Aplicaciones de los diagramas de fases para la determinación de la temperatura alcanzada durante el incendio.**

Un procedimiento para determinar de una forma aproximada la temperatura en el escenario del incendio, sobre todo cuando hay metales de alto punto de fusión, es el empleo de diagramas de fases. Este método es un complemento y refuerzo a la inspección visual. Como complemento y refuerzo de la inspección visual, se toman muestras de las partes más representativas, con el objeto de observar la transformación de la estructura metalográfica por el calor.

La influencia de la temperatura en la microestructura de las aleaciones es primordial, y para ello sólo hay que ver los diagramas de equilibrio o de fases [2-8].



Gráfica 9. Diagrama de fases del Cu-O.



Gráfica 10. Diagramas de fases de Cu-Zn (latón) y Cu-Sn (bronce), respectivamente.

Se toman muestras de las partes mas representativas de los elementos metálicos presentes en el escenario del recinto, mediante un correcto procedimiento analítico se

podrá observar y determinar la transformación de la estructura metalográfica del metal o aleación, como consecuencia de la temperatura alcanzada en el seno del mismo.

Como cada transformación de la microestructura se corresponde con una temperatura concreta, si se dispone del diagrama de fases de la aleación, se podrá determinar a qué temperatura en concreto se corresponde dicha microestructura, por lo que tendrá un dato de la temperatura máxima a la que ha estado sometida dicha aleación durante el desarrollo del incendio.

Estas modificaciones de la microestructura como consecuencia de la temperatura a la que se he visto sometida la aleación durante el incendio, perduran con el paso del tiempo, por lo que es un dato del que se puede disponer después de haber transcurrido un tiempo de la ocurrencia del incendio.

En la se representa el diagrama de fases de Cu- Zn (latón). Estas aleaciones pueden contener otros elementos como plomo, estaño o aluminio, que darán al latón diferentes característica de color, resistencia, ductilidad, resistencia a la corrosión, etc.

La solución a sólida es FCC (Cúbica centrado en las caras), y la fase b es BCC (cúbica centrado en el cuerpo). Al enfriar en este intervalo de temperaturas alrededor de los 454°C, la fase b sufre un ordenamiento. Al enfriar en este intervalo la fase b con átomos de cobre y zinc dispersados al azar en los puntos de la red, cambia continuamente hasta convertirse en la estructura b' ordenada con los átomos de cobre en las esquinas y los de zinc en los centros de los cubos unitarios [2-7].

En la Gráfica 10, izquierda se representa el diagrama de fases de una aleación de cobre-estaño: bronce. La pendiente de la línea solvus por debajo de 415°C muestra un considerable decrecimiento en la solubilidad del estaño en la fases a. Los bronce fundidos al estaño, lentamente enfriados, que contienen menos del 75% de estaño, suelen mostrar una sola fase a sólida.

Como se puede ver estos diagramas de fases están en función de la temperatura, por lo que en muchas ocasiones el análisis de la aleación metálica después de sufrir un incendio, permite establecer las temperaturas que se han alcanzado en aquellos puntos donde se encuentra en el escenario del incendio.

Otro hecho que tiene lugar cuando los metales y sus aleaciones se someten a diferentes temperaturas es la recristalización. El término temperatura de cristalización se refiere no a una temperatura definida por debajo de la cual el proceso de recristalización no ocurrirá, sino a la temperatura aproximada a la que un material altamente trabajado en frío se recristaliza por completo en una hora [8,10].

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. Esto significa que estos metales no pueden trabajarse en frío a temperatura ambiente, ya que se recristalizan espontáneamente, reconstruyendo una estructura reticular libre de tensión.

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 no están alargados, sino que son aproximadamente uniformes. Los nuevos cristales suelen aparecer en las porciones del grano más drásticamente deformadas, por lo general en los límites de granos y planos de deslizamiento.

El agrupamiento de átomos del que 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.

Al aumentar el tiempo de recocido disminuye la temperatura de recristalización. El proceso de recristalización es sensible a cambios en temperatura, otro procedimiento para ver la temperatura desarrollada en el incendio.

Otro dato a tener en cuenta es el crecimiento de los granos (datos que están estudiados y analizados más adelante) de la estructura metálica con la temperatura. Todos los granos crecen al aumentar la temperatura.

Los granos grandes tienen menor energía libre que los pequeños, esto se asocia con la menor cantidad del área de frontera de grano; por tanto, en condiciones ideales, el

menor estado de energía para un metal será aquel que tendría si estuviera formando un cristal [8,10].

### **4.3. Evaluación del daño.**

Desde los años 60 una gran variedad de métodos físicos y químicos han sido propuestos para determinar el estado de deterioro de los conductores eléctricos. Muchos de estos estudios están enfocados a intentar determinar las condiciones a las que han estado expuestos los conductores con la finalidad de reconocer el origen de incendios en viviendas o industrias. En la actualidad muchos de los esfuerzos se centran en determinar el origen de las perlas de fundición que se encuentran en los extremos de los conductores eléctricos en muchos de los incendios. Su interés está en determinar si el incendio ha estado originado por un cortocircuito o si el cortocircuito ha sido causado por el propio incendio. En el primer caso las marcas encontradas serían marcas primarias llamadas por los investigadores "Primary Molten Marks" o "Cause Beads". En el segundo caso las marcas del cobre fundido serían marcas de origen secundario llamadas "Secondary Molten Marks" o "Victim Beads".

Los estudios asumen que 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.

A pesar de la complejidad de las técnicas utilizadas en la actualidad, los estudios suelen tener muy poca base teórica para explicar los resultados obtenidos. Además el número de muestras utilizadas en las simulaciones es reducido y por lo tanto poco significativo.

La clasificación de los estudios realizados se puede realizar a través de las técnicas analíticas utilizadas. Así se formarían tres grupos:

- 1º) Análisis visual y microscopía óptica.
- 2º) Microscopía electrónica y microanálisis por energías dispersivas.

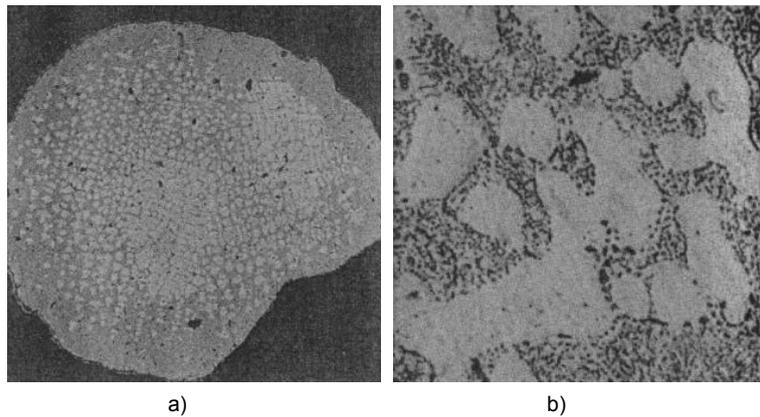
Desde los primeros estudios encontrados en los años setenta hasta la actualidad la evolución de éstos ha venido marcada por las técnicas empleadas para los análisis. Los

primeros se basaban en análisis visuales de los materiales y en microscopía óptica. Posteriormente se encuentran estudios basados en microscopía electrónica y en microanálisis con rayos X. En la actualidad las técnicas utilizadas son la espectroscopía Raman, espectroscopía electrónica Auger (AES) [14] y en espectrometría de masa de ión secundario (SIMS).

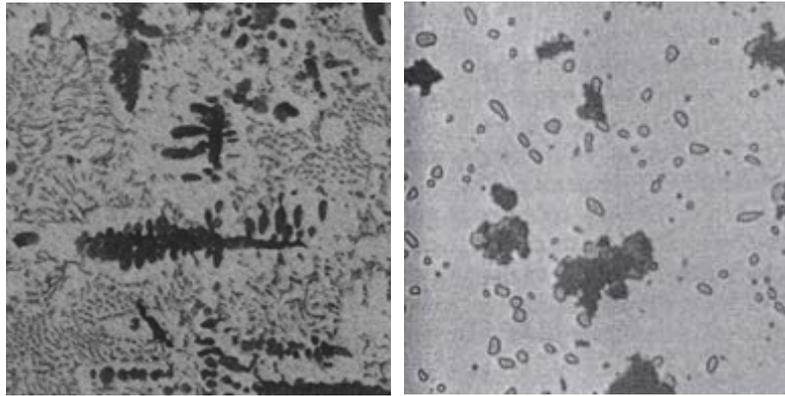
Levinson, en *Copper metalurgy as a diagnostic tool for análisis of the origin of building fire* [12], analiza la microestructura y la macroestructura de distintas muestras de conductores de cobre expuestos a procesos térmicos.

En el apartado de microestructura, tras explicar como preparar muestras de cobre para su análisis mediante microscopio metalográfico explica varias características del cobre electrolítico. Entre las configuraciones explicadas están la variación de la forma y el tamaño del grano metálico durante los procesos de trefilado, la formación de óxido cuproso y de eutéctico, el crecimiento de las dendritas, la microporosidad y la recristalización. En el estudio se relacionan estas estructuras con procesos térmicos y eléctricos, como las sobrecorrientes. Es una exposición teórica y no utiliza experimentos para intentar cuantificar los procesos anteriores por los que para nuestro proyecto tiene un valor relativo.

A continuación se muestran algunas de las micrografías publicadas por Levinson en su artículo:



**Fig 2.** Gota de cobre fundido conseguido en llama. Se observa el eutéctico cobre-óxido x64(izquierda) x1000 (derecha).

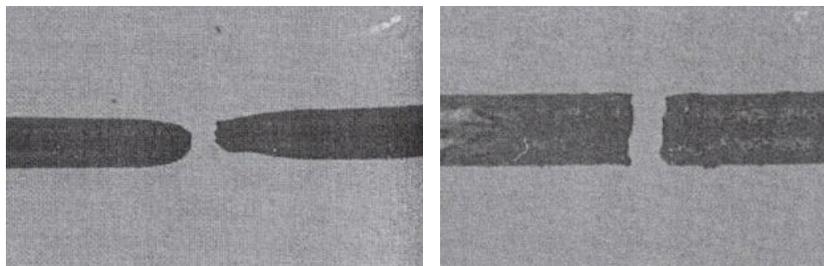


a)

b)

**Fig 3.** a) Dendritas de oxido de de cobre fundido de alto contenido en oxigeno .b) microestructura de un conductor de cobre calentado a 870°C durante una hora.

En el apartado de macroestructuras se trata en primer lugar el tema de la forma que adoptan las fracturas de los conductores de cobre. Así muestra en la Fig 4 a). La forma de una fractura dúctil producida por el cobre frío o bien a temperatura inferior a la de fusión. A la temperatura de fusión se produce una fractura frágil sin ninguna deformación plástica según se muestra en la Fig 4 b). Si en los extremos se encontraran gotas o perlas de cobre solidificado significaría que el conductor en el momento de romper estaba conduciendo corriente eléctrica.



a)

b)

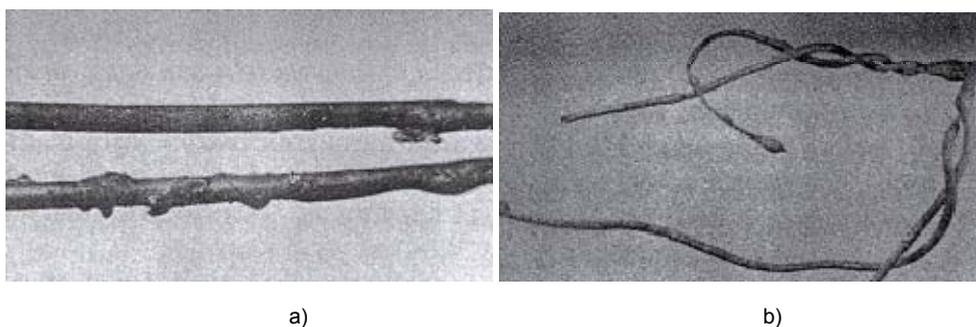
**Fig 4.** a) Conductor de cobre mostrando una fractura dúctil. b) Conductor de cobre con fractura a temperatura cercana a la eutéctica donde de muestra una factura frágil.

Levinson indica que, en su opinión, como la microestructura de las perlas de fundición de cobre dependen de muchos factores no hay forma de determinar la fuente de energía que las ha creado. También afirma que no hay forma de determinar el momento en el que se formaron pudiendo haber sido meses antes del incendio hecho que puede llevar a errores a la hora de determinar el origen del fuego.

En general no aporta ningún método para determinar algún parámetro del deterioro de los conductores de cobre. Únicamente da información de la metalurgia del cobre comúnmente conocida. Apunta la potencialidad de la aplicación a la investigación de incendios de la metalografía óptica. Para el presente estudio su utilidad es únicamente de consolidación de conocimientos.

Ettling, en [1] *Electrical Wiring in Building Fires*, analiza de manera visual numerosas muestras de conductores sometidas a sobrecorrientes, cortocircuitos y calentamiento por llamas y las compara con cables encontrados en incendios reales. Para las simulaciones se utilizan tanto conductores unifilares como multifilares. Algunas de las muestras son examinadas metalográficamente.

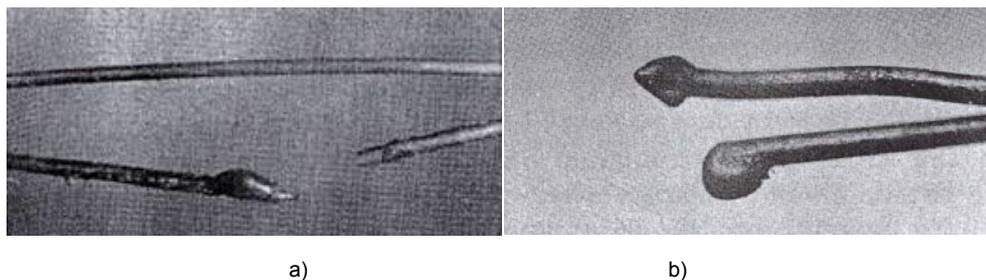
Primeramente analiza más de 200 muestras de conductor de cobre fundidas mediante llama. Según el autor, cuando el fuego afecta la superficie de un conductor de cobre y si la temperatura es inferior a la de fusión (1083°C), éste se oxida y se decolora ligeramente pero se siguen reconociendo las marcas del trefilado. Si la temperatura asciende se empiezan a dar cambios en la estructura de los gases ocluidos en el interior del cobre. Se forman cavidades interiores y pequeñas burbujas en la superficie. Si la temperatura sigue subiendo el cobre fundido comienza a deslizar en forma de gotas de cobre líquido dejando en el centro del conductor un núcleo sólido. Esta parte interior sin fundir asoma en forma de punta de las perlas fundidas por el calor. Estos dos efectos se muestran en la Fig 5 a) y b).



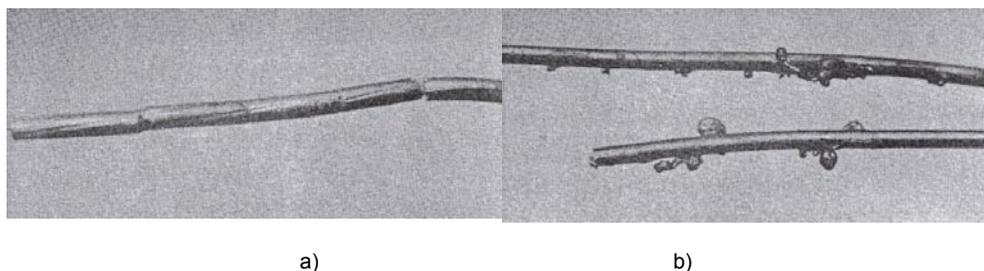
**Fig 5.** a) Conductores de cobre, calentados al fuego hasta la temperatura de fusión, muestran zonas de cobre fundido. b) Conductores de cobre calentados al fuego hasta la temperatura de fusión mostrando la terminación en la formación de una perla.

Cuando el conductor es multifilar el metal fundido penetra entre los hilos uniéndolos, esta unión entre los hilos 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.

Respecto a las sobrecorrientes afectan a todo el conductor por igual ya que la corriente que lo recorre será igual a lo largo de todo él. Un conductor puede soportar dos o tres veces su intensidad máxima admisible durante algunos segundos sin verse afectado. Cuando la corriente sobrepasa esos valores o bien el tiempo aumenta, en los dos conductores se destruye el aislante. Si persiste el defecto el conductor se pondrá al rojo lo que hará que cambie la estructura cristalina del cobre y que se oxide superficialmente. El conductor podrá llegar a fundirse lo que cortará el circuito. En el momento de la separación se producirá una pequeña chispa. A lo largo del circuito se podrán observar zonas que han estado a punto de fundir. En el punto de fusión se formarán glóbulos redondeados similares a los producidos por las llamas. Para no confundirnos habrá que examinar el resto del conductor. Fig 6 a) y b), Fig 7 a) y b).



**Fig 6.** a) Conductor de cobre seccionado por un arco eléctrico mostrando una terminación en perla muy común fundición de llama. b) Conductor de cobre seccionado por arco eléctrico mostrando perlas globulares.



**Fig 7.** a) Conductor de aluminio seccionado por una sobrecorriente donde se observan grietas. b) Conductores de cobre calentados mediante sobrecorriente en los que se observa perlas.

Cuando el conductor consta de varios hilos éstos llegarán a unirse entre si de forma más íntima que cuando se calientan por una llama. Mayor fusión mostrarán los extremos del conductor seccionado ya que se añade a la temperatura de la sobrecorriente la del arco eléctrico.

En un cortocircuito la intensidad alcanzará fácilmente varios cientos de amperios. En el punto de contacto se producirá un arco explosivo que funde el metal haciendo saltar chispas a cierta distancia. La energía que se desprenda en el arco dependerá del dispositivo de protección que tenga el circuito.

Las marcas dejadas por un cortocircuito variarán desde una pequeña señal en la superficie hasta la sección del conductor. Otras veces se pueden ver afectadas partes de

los propios dispositivos de protección. En los extremos de los conductores afectados pueden formarse glóbulos con deformaciones por las burbujas de gas producidas, aunque también pueden quedar seccionadas de forma limpia. De todas formas siempre encontraremos salpicaduras de cobre adheridas sobre el conductor. En los cortocircuitos se forma una separación clara entre la zona afectada y el conductor sin afectar, siempre que las llamas posteriores no lleven al conductor al punto de fusión. Si así fuera las formas cambiarían haciendo irreconocibles las formas anteriores.

Los conductores multifilares, la mayoría de las veces, al seccionarse por un cortocircuito forman glóbulos o perlas esféricas de diámetro superior al del conductor. Si el cortocircuito no secciona el conductor completamente deja los hilos afectados unidos entre sí. Si el arco ocurre antes del incendio y el conductor estaba frío solo se unirán los hilos en la zona del cortocircuito. Si el arco eléctrico ocurre porque el fuego ha destruido el aislante la zona afectada por el cortocircuito será más extensa ya que el conductor en ese punto estará a altas temperaturas.

Según Ettlíng hay otros efectos que nos pueden ayudar a reconocer el estado de deterioro de los conductores como la ductilidad que indicará el grado de recocido y la fragilización del conductor que indicará si la atmósfera donde se calentó tenía carácter oxidante o reductor.

En cuanto a las aleaciones que se pueden observar, en ocasiones, entre el cobre y otros metales, el aluminio formará una zona de aleación que fragilizará el conductor en ese punto. Si el conductor ha cortocircuitado con un metal galvanizado el zinc podrá formar aleación con el cobre formándose un latón amarillo en la zona de fusión.

Los conductores de aluminio al tener una temperatura de fusión de 660°C suelen fundir en todos los incendios. Al oxidarse los hilos del conductor no se unen entre ellos formando glóbulos o perlas y por eso las llamas los afectan en mayor grado adoptando formas muy variadas.

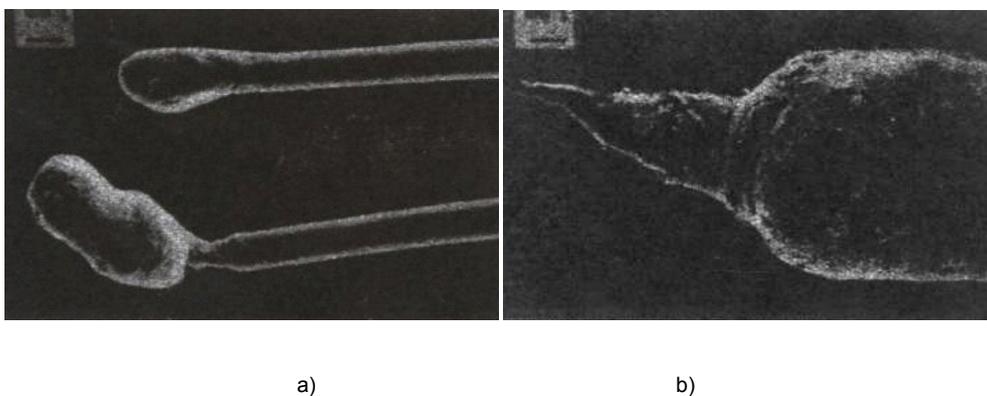
Para finalizar explica como los exámenes metalográficos de los conductores dan información de su historia térmica. Ettlíng cree observar ciertas diferencias entre un conductor afectado por el calor de una llama y por el calor interno de una sobrecorriente. Con calor externo suele quedar en el centro del hilo una zona sin fundir mientras que si ha fundido por sobrecorriente toda la sección estará afectada de igual forma.

En cuanto a los aislantes de PVC pueden servir para diferenciar, si el calor proviene de una sobrecorriente o de un fuego ya que en éste último caso solo se habrá afectado la zona expuesta a las llamas mientras que una sobrecorriente hubiera afectado a todo el circuito. Si el calentamiento es lento, por ejemplo una sobrecorriente limitada, el aislante no se desprendería del conductor quedando en contacto a lo largo del circuito.

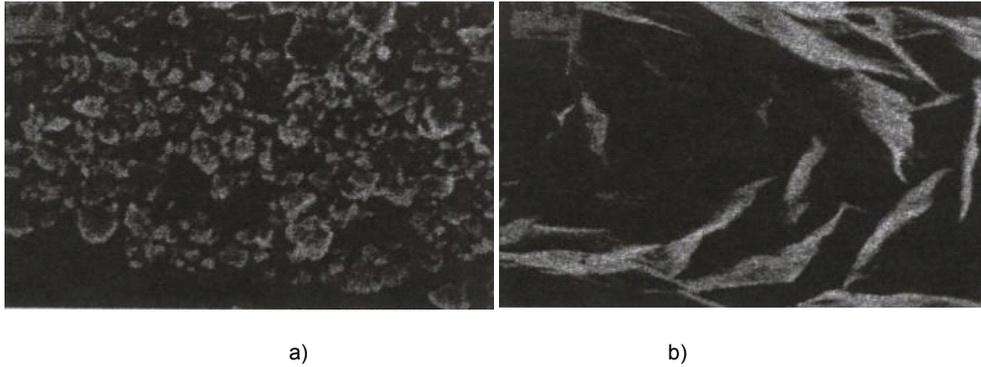
Singh, en *Scannig electrón miroscopy of burn electric wires* [13] utiliza la microscopía electrónica para analizar muestras recogidas de escenarios de incendios. De las distintas causas accidentales cree que las más frecuentes son los cortocircuitos y las sobrecorrientes. Al examinar distintas muestras mediante SEM enumera una serie de características que no se pueden observar mediante microscopía óptica.

La microscopía electrónica de barrido ha sido utilizada por la ciencia forense para examinar distintos materiales como filamentos de bombillas, superficies metálicas, fracturas en conductores, etc, pero poco para el examen de conductores eléctricos afectados por incendios.

Singh somete a conductores de cobre y aluminio a sobrecorrientes y a la acción directa de la llama de un mechero de gas. Después de las pruebas, y tras limpiar las muestras con acetona, para eliminar los restos de aislante, los materiales son observados mediante SEM. Las Fig 8 a) y b) dos microestructuras conseguidas mediante cortocircuito, la primera, y mediante calentamiento en llama, la segunda.

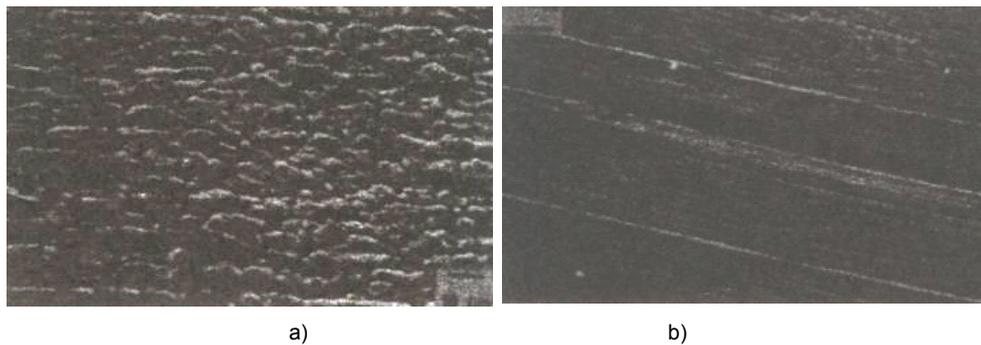


**Fig 8.** a) Glóbulos terminales en el conductor de cobre sometido a un cortocircuito eléctrico  
.b) terminación de un conductor de aluminio sometido a llama.



**Fig 9.** a) Estructura granulada de un conductor de cobre sometido a cortocircuito. b) Bucles de oxido de cobre en la superficie del conductor.

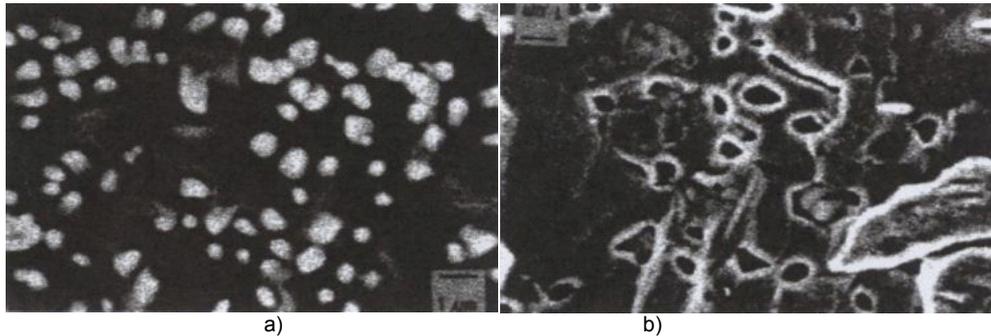
En una primera prueba se cortocircuitan varios conductores. En unos se forman perlas que son fácilmente identificables por su forma, pero en las muestras que quedan sin perlas en sus extremos, se distinguen distintas estructuras. Así en el lugar del cortocircuito se observa una estructura granular mientras que a 3 cm del extremo se observa un grano alargado en dirección longitudinal al hilo y a 15 cm sólo quedan las marcas superficiales del trefilado. Estas estructuras se muestran en la Fig 10 a) y b).



**Fig 10.** a) Estructura granular alargada a 3cm del cortocircuito. b) Marca del trefilado a 15 cm del cortocircuito.

Cuando un conductor de cobre es expuesto a una llama se deteriora su superficie formando cristales rojizos de óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ). Estos cristales representan los núcleos 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. Fig 11 a) y b).



**Fig 11.** a) Cristales de  $\text{Cu}_2\text{O}$  en la superficie de un conductor de cobre. b) Cristales de  $\text{CuO}$  en la superficie de un conductor de cobre.

Estos efectos son utilizados para analizar dos casos de incendio. En el primero se encuentra la clásica estructura granular de un cortocircuito. En el segundo se concluye que la estructura corresponde a un cable afectado por el fuego.

Anderson R.N, en *Surface Analysis of Electrical Arc Residues in Fire Investigation*, [14] indica que los incendios iniciados por causas eléctricas son difíciles de diferenciar. Técnicas de análisis superficial como la Espectroscopía Electrónica para Análisis Químico (ESCA) y la Espectroscopía Electrónica de Auger (AES), pueden usarse para determinar el proceso de acontecimientos en un cortocircuito en relación con el entorno donde los residuos del arco eléctrico se han formado.

En un fuego donde se destruye el aislante eléctrico del conductor la superficie del glóbulo formado por un cortocircuito mostrará los productos de la combustión. Si el cortocircuito ocurre antes de que el incendio se haya iniciado en el análisis del glóbulo terminal no se encontrarán restos de productos de combustión.

En el caso de conductores de cobre la presencia de una atmósfera reductora de CO cambia el ratio normal de formación de óxido cuproso – óxido cúprico ( $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$ ) de 25:1, cuando el arco eléctrico ocurre al aire, a un valor mucho más elevado en atmósfera de CO.

En un ensayo realizado en varias muestras y analizadas con AES se puede observar las cantidades de cloro, carbón, oxígeno y azufre obtenidas al cortocircuitar conductores de cobre en distintas atmósferas. Las atmósferas utilizadas son: Gas natural, oxígeno y aire. Las proporciones obtenidas son utilizadas para contrastar muestras de incendios reales con resultados bastante satisfactorios.

Babrauska, en *Fires due to Electric Arcing: Can 'Cause' Beads Be Distinguished from 'Victim' Beads by Physical or Chemical Testing?* [15] 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. Algunos estudios no dan ningún soporte teórico a sus resultados. También se observa que la mayoría de ellos 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 éstos.

Nobuo Mitsuhashi, en *Discriminación between primary Arc Marks on Electric Wires by microvoid distribution* [16] ,estudia la relación entre la microporosidad y los factores a los que ha estado expuesto el cobre.

Cuando un cortocircuito es la causa propuesta del inicio de un incendio, las marcas de los arcos eléctricos sobre los conductores son pruebas importantes para la demostración de estos hechos. Con la finalidad de clarificar la distribución de la microporosidad producida en los cortocircuitos, estas marcas han sido observadas mediante SEM. De estas observaciones se deduce que las muestras eléctricas calentadas antes de los arcos eléctricos (Primary marks) son diferentes de las que se funden antes de ser afectadas por las llamas (Secondary marks) en cuanto a la distribución de los microporos con diámetros entre 0,5 y 1,0  $\mu\text{m}$  de diámetro.

Los autores simulan los dos tipos de glóbulos mediante un experimento y estudian estadísticamente los resultados. Para ello utilizan conductores multifilares de 0,75 mm<sup>2</sup> de sección a los que les ha retirado el aislante. Para la realización de los cortocircuitos utilizan un electrodo de grafito en contacto con el conductor. Para limitar la corriente colocan una carga en serie.

Para conseguir los glóbulos primarios cortocircuitan en primer lugar el conductor y posteriormente los calientan en un horno eléctrico a 400, 600, 800 y 1000°C durante 1, 10 y 30 minutos a esas temperaturas, con una rampa de calentamiento de 30°C por minuto. Según comprueban, la diferencia de tiempos de calentamiento de las muestras no produce diferencias en la distribución de los microporos. Para conseguir los glóbulos secundarios se calientan de la misma manera las muestras y se cortocircuitan después.

Mediante SEM cuentan los microporos de diámetro comprendido entre 0,5 y 1,0  $\mu\text{m}$  de diámetro en el centro de los glóbulos formados. Para las observaciones se preparan cuatro grupos de muestras:

- GRUPO 1 (43 muestras) Cortocircuito antes del calentamiento (Marcas primarias)
- GRUPO 2 (23 muestras) Calentamiento antes del cortocircuito (Marcas secundarias)
- GRUPO 3 (49 muestras) Calentamiento en horno de los cables.
- GRUPO 4 (73 muestras) Cortocircuitos de los cables.

El recuento del número de micro-poros se muestra en su tabla 1. Se observa que aunque la microestructura cambia para los distintos tiempos de calentamiento, el número de micro-poros no varía con la temperatura. El grupo 2 tiene un mayor número de poros que el grupo 3. Se observan diferencias estadísticas entre los grupos 1 y 2.

A pesar de que las muestras del grupo 2 se cortocircuitan a temperatura ambiente, y no en el horno, se supone que no afecta a las lecturas por tres razones:

Porque la temperatura de calentamiento no afecta al número de poros.

La energía de los arcos es limitada.

La temperatura de calentamiento es inferior a la de fundición de cobre.

Por lo tanto se concluye que el método sirve para diferenciar entre los dos tipos de proceso de formación de marcas con la limitación de que solo sirve para conductores

multifilares con corrientes limitadas. Para generalizar el método habría que hacer más experimentos en condiciones distintas y con otros materiales.

Sin embargo todo esto no es tan sencillo como parece pues finalmente en un incendio real se dispone de muy pocas muestras donde se observan casi todos los fenómenos descritos por estos investigadores. Por eso se hace prioritario el ahondar en estos conocimientos.

C.K .Clarke, en *Evaluation of fire damaged copper wire* [17] nos explica las posibles causas y procedimientos para llegar al origen de un incendio real.



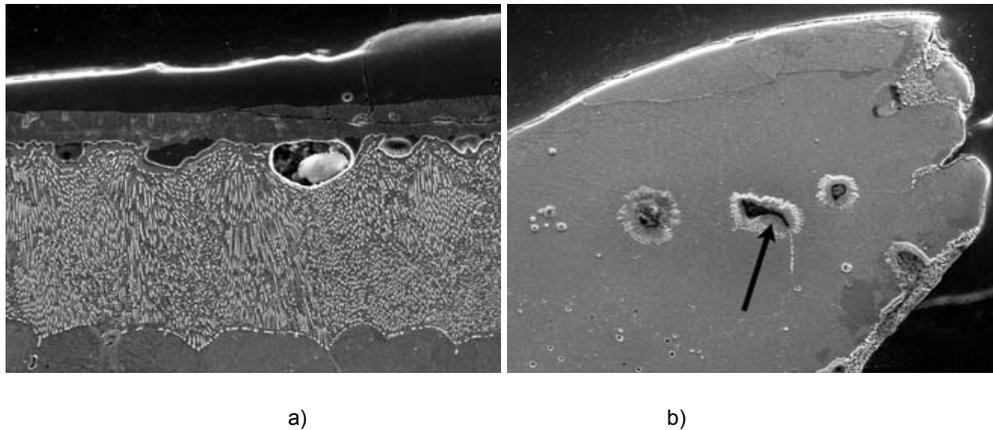
**Fig 12.** a) Conductor de cobre, calentados extraídos de un incendio real hasta la temperatura de fusión, muestran zonas de cobre fundido b) Conductor de cobre seccionado del mismo incendio real mostrando una terminación en perla muy común fundición de llama.

Después de un análisis metalográfico y ataque químico de los cables expuestos en la Fig 12



**Fig 13.** Montaje de la muestra metalográfica correspondiente a la Fig 12 a), atacada.

En esta muestra se puede observar granos muy grandes en la punta del conductor, pero el resto de la estructura de grano mucho más pequeño (en el extremo contrario), motivo por el cual el cable ha sido calentado y recocido en el fuego. En las siguientes imágenes de MEB se observan zonas eutécticas y fusión en borde de grano.



**Fig 14.** a) zona eutéctica Cu-Cu<sub>2</sub>O y b) Fusión en borde de grano se puede observar en unos de los alargados huecos en la punta de conductor.

En la Fig 14 se aprecian zonas de eutéctica apenas visibles en la superficie, se revela un mayor aumento de la zona eutéctica como una película delgada que cubre la zona del cráter.

Después de la observación de estas fotografías llegan a la conclusión que el conductor ha estado sometido a altas temperaturas ya que el eutéctica Cu-Cu<sub>2</sub>O punto de fusión es 1066°C y el cobre funde a 1084°C.

Sin embargo estas pruebas no significan que el cable fuera la causa del incendio esa el cable estudiado pero no afirma a que temperatura a la que ha estado sometidos los cables estudiado.

Yasuaki Hagimoto, en *Analysis of a Soldered Wire Burnt in a FIRE* [18] nos explica el estudio de una perla recogida de un incendio que duró un día entero en una fábrica. Y que el análisis por rayos X no informa de que es un latón como se puede ver en la Fig 16a)



Fig 15. Una perla recogida de los escombros del incendio.

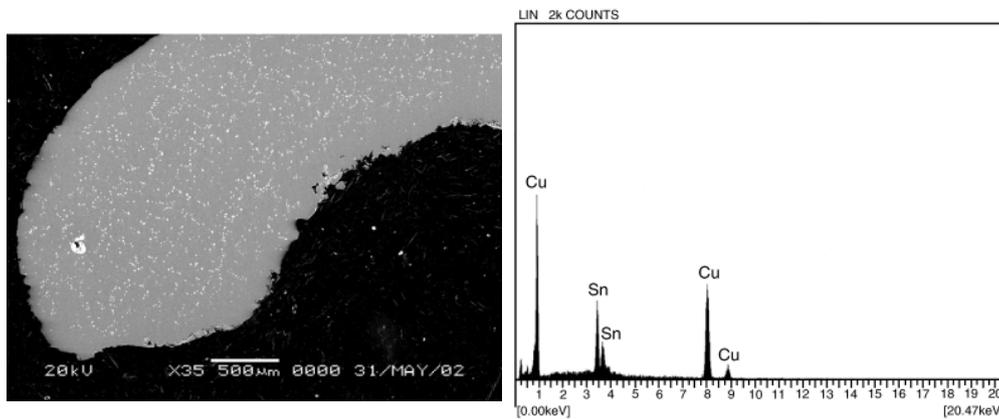


Fig 16. Izquierda: Perla sacada de los escombros del incendio. Derecha: Espectro de rayos X de la perla.

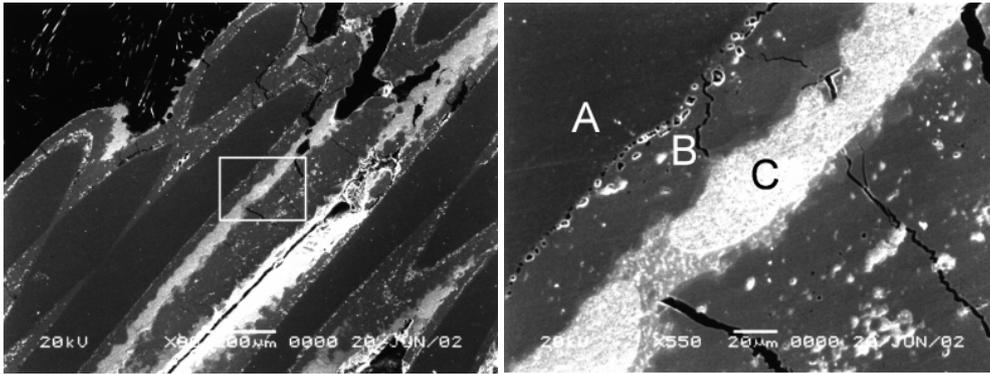


Fig 17. Izquierda: Imagen de de la perla anterior. Derecha: Imagen de SEM correspondiente al recuadro de la figura izquierda.

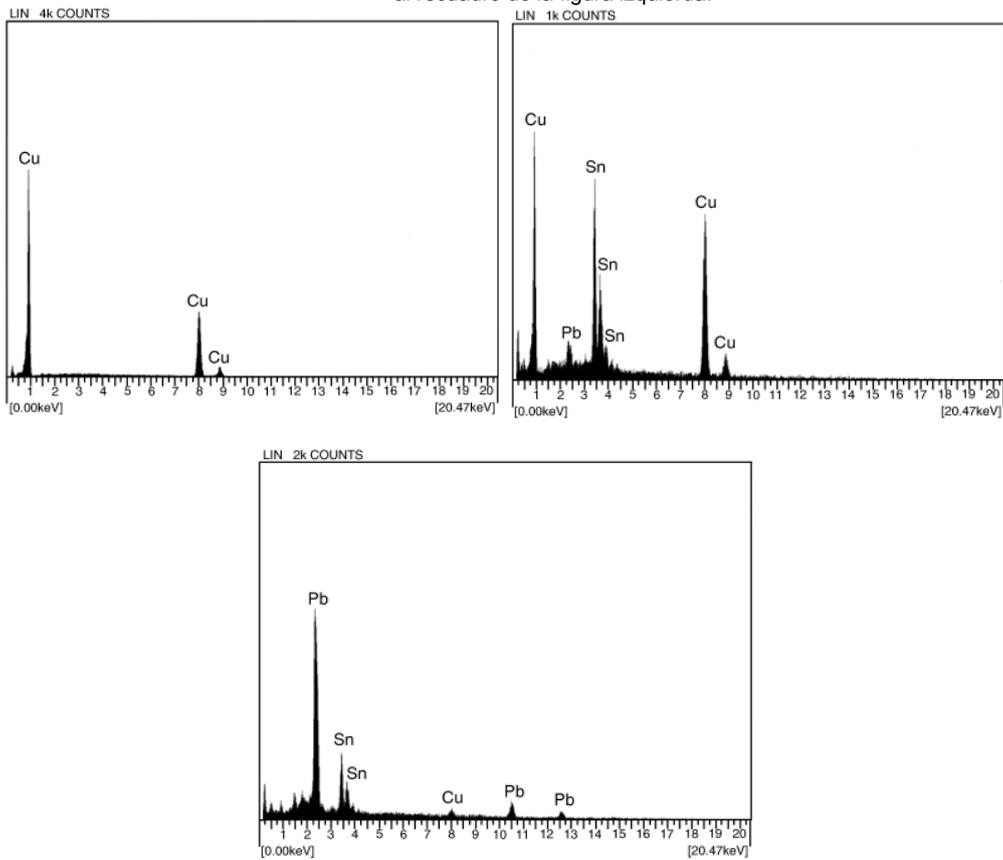


Fig 18. Estos tres espectros corresponden a las zonas A,B;C respectivamente de la Fig 17.

En este incendio de sospecha que la causa del incendio fue un fallo eléctrico. Y como resultado de este incendio de estudio la perla anteriormente propuesta. Y al mismo tiempo se realiza una muestra de control simulando las condiciones del incendio en un horno eléctrico a 500°C durante 3 horas. La soldadura utilizada para la muestra de control fue de la misma composición que la utilizada en las soldadura de la industria 60% de estaño y 40% de plomo.

Los conductores de cobre pueden formar aleaciones con metales tales como aluminio, zinc, plata. La sección transversal de la perla en la Fig 15 es de color plateado lo que nos indica que el conductor de cobre se ha convertido en una aleación en toda lo zona de perla.

El espectro de rayos X en el Fig 18 a) indica que el conductor se ha convertido en una aleación de estaño en todo la perla y no fue detectado plomo de la soldadura. Se comprobó que dejando más tiempo en el horno una muestra de control se convierte en una aleación de cobre-estaño.

Aunque el análisis elemental de las perlas en los alambres eléctricos desempeña un papel potencialmente importante en las investigaciones de las escenas de los incendios, no siempre el fuego y las investigaciones forenses son clave para resolverlos.

Análisis de rayos X de una cuenta al final de un alambre soldado encontrado en los restos del incendio pone de manifiesto que el conductor de cobre se ha convertido en una aleación de estaño y que el plomo se perdió durante un largo plazo de explosión a altas temperaturas .Si la perla se he interpretado de otra manera, podría haber enmascarado la investigación de este incendio. Tal pruebas deben ser examinadas cuidadosamente para evitar tales peligros.

# **METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS**

## **5. Metodología de los ensayos.**

Para poder cumplir los objetivos del trabajo, se utiliza una metodología de ensayo en la que se utilizarán diferentes tipos de conductores sobre los que se realizarán tratamientos térmicos en atmósfera de aire a diferentes temperaturas para un tiempo establecido en 45 minutos que viene a corresponder a un tiempo medio entre la llegada de los servicios de extinción y su intervención hasta el control final del fuego.

De los diferentes tipos de cables y tras los tratamientos térmicos se evaluará el crecimiento de la capa de óxido superficial obtenida y la evolución del tamaño de grano mediante la preparación metalográfica de cortes transversales y longitudinales de los conductores para su observación en microscopía óptica y electrónica de barrido cuando fuera necesario la determinación de la composición química puntual.

Con los resultados obtenidos se establecerán las relaciones entre los parámetros obtenidos y las variables del tratamiento térmico en el laboratorio de modo que podamos comparar con los resultados obtenidos en condiciones de servicio. El estudio de casos reales significará una validación de las relaciones obtenidas a pesar de que tal como es de esperar las condiciones de cívico real resultan mucho más complejas que las de laboratorio donde las variables pueden controlarse mucho mejor.

### **5.1. Planificación de la investigación.**

Para la realización de las simulaciones se han escogido cuatro tipologías de conductores de cobre electrolítico con aislante de PVC.

A nivel general los ensayos propuestos para simular los efectos que pueden deteriorar los conductores eléctricos son los siguientes:

- Calentamiento en horno con temperaturas: 950, 975, 1000, 1050 y 1083°C con un tiempo de permanencia de 45 min en el horno.
- Análisis de muestras de incendios reales.

De las muestras resultantes se estudiará la microestructura y se propondrán nuevas pruebas en condiciones diferentes para poder hacer el seguimiento del estado de deterioro de éstas.

Las características microestructurales que habrá que tener en cuenta de las muestras obtenidas de los ensayos, de manera general, serán las siguientes:

- Tamaño y forma del grano, (dendríticos o equiaxiales).
- Presencia de distintas fases.
- Localización de eutécticos.
- Presencia de poros y tamaño de éstos.
- 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, etc.).

## **5.2. Tipología de conductores y materiales.**

Los tipos de conductores y los materiales a utilizar a lo largo del estudio. En la base de datos de imágenes, principalmente micrografías, encontraremos las estructuras del estado inicial, o sea sin ningún tipo de deterioro, de los conductores elegidos. Estas imágenes se utilizarán para compararlas con las microestructuras obtenidas en los diferentes tratamientos térmicos, de manera que se puedan determinar los cambios a nivel estructural que han sufrido.

### **5.2.1. Tipología de los conductores.**

En primer lugar describiremos su configuración en cuanto a número de hilos y secciones Configuraciones

Debido a que el elemento que se encuentra de forma mayoritaria en las instalaciones eléctricas en viviendas, locales y empresas, son los conductores de cobre con aislante de cloruro de polivinilo (PVC), el estudio se centrará en éstos. Se seleccionarán las configuraciones de cables más comunes en las líneas de acometida y alimentación en este tipo de locales.

### **5.2.2. Tipos de conductores.**

Para la realización de los ensayos se han escogido 4 tipologías de conductores de cobre electrolítico con aislante de PVC habitualmente utilizado en las instalaciones eléctricas:

Conductor Unifilar de 2,5 mm<sup>2</sup> de sección (Fig 19).

Conductor Unifilar de 4 mm<sup>2</sup> de sección (Fig 19).

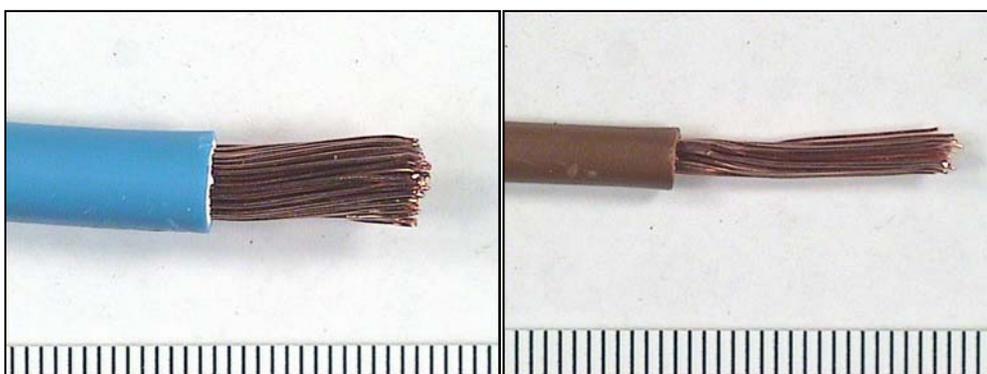
Conductor Multifilar (113 hilos) de 13 mm<sup>2</sup> de sección (Fig 20).

Conductor tipo cordón (55 hilos) de 6 mm<sup>2</sup> de sección (Fig 20).

En este apartado se describen los conductores utilizados en el estudio. Realizando una breve descripción en cuanto a número de hilos y secciones mostramos las micrografías de su estructura tomada a diferentes aumentos.



**Fig 19.** Conductores unifilares sección  $2,5 \text{ mm}^2$  y  $4 \text{ mm}^2$  respectivamente, aislamiento PVC.



**Fig 20.** Conductor multifilar ,113 ,55hilos y sección  $13 \text{ mm}^2$  ,  $6 \text{ mm}^2$  respectivamente, aislamiento PVC.

Hemos elegido estas dos variedades de cable unifilar y multifilar por que estos son los utilizados en las instalaciones eléctricas. El cable unifilar es más rígido, mientras que el multifilar es mucho más flexible, estos últimos 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. Y los diferentes grosores utilizados son para estudiar la influencia de la difusión en cada uno de ellos.

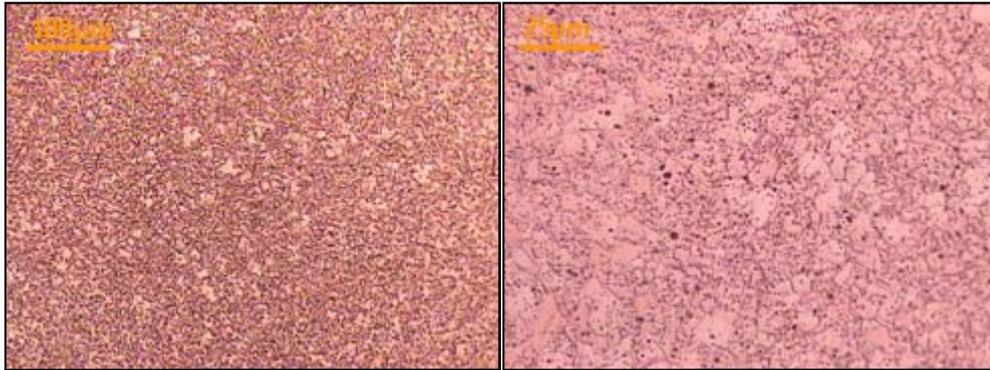
### 5.3. Ensayos realizados.

En primer lugar es necesario obtener, como referencia, las microestructuras que corresponden al cobre origen sin afectar por ningún tratamiento térmico. La comparación de

éstas microestructuras con las que se vayan obteniendo de las pruebas nos deberá mostrar el estado de deterioro del conductor.

Las siguientes micrografías corresponden a las 4 tipologías de cables conductores elegidas expuestas en el capítulo anterior, para realizar los diferentes tratamientos térmicos. Se han realizado probetas metalográficas de cortes transversales y longitudinales.

**Conductor unifilar sección 2,5 mm<sup>2</sup>**

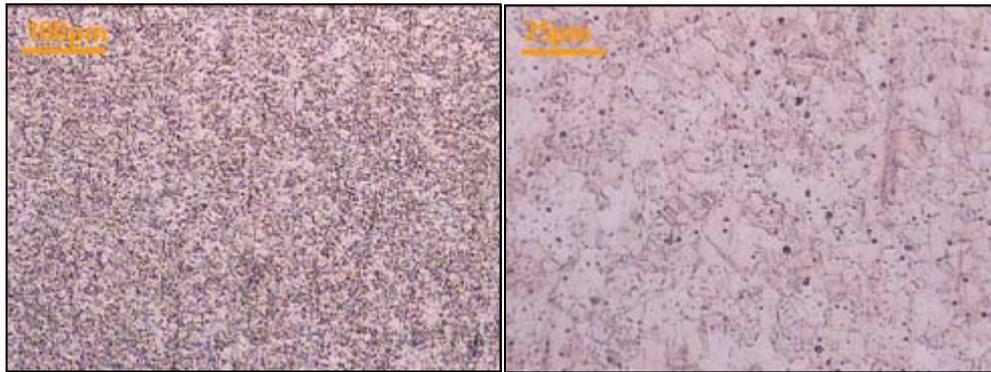


**Fig 21.** Corte transversal, atacada x100 y x400 aumentos, respectivamente.



**Fig 22.** Corte longitudinal atacado x100 y x400 aumentos, respectiva

**Conductor unifilar sección 4 mm<sup>2</sup>**

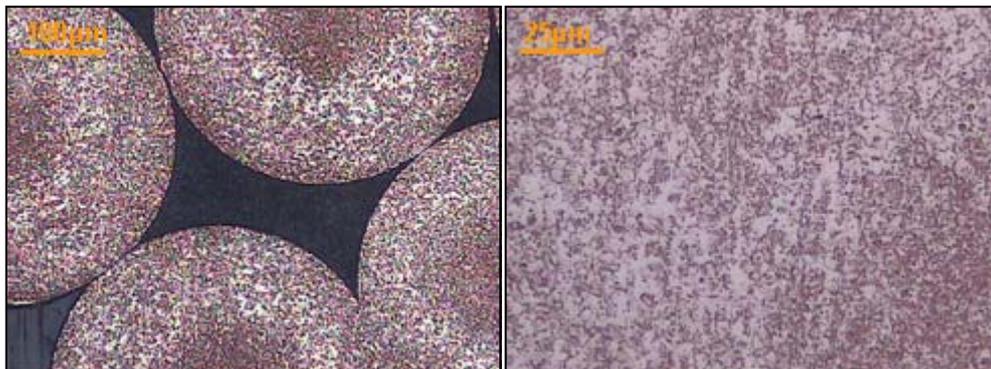


**Fig 23.** Corte transversal atacada x100 y x400 aumentos, respectivamente.



**Fig 24.** Corte longitudinal atacado x100 y x400 aumentos, respectivamente.

**Conductor multifilar (113 hilos) sección 13 mm<sup>2</sup>**



**Fig 25.** Corte transversal atacada x100 y x400 aumentos, respectivamente.



Fig 26. Corte longitudinal atacada x100 y x400, respectivamente.

**Conductor multifilar (55 hilos) sección 6 mm<sup>2</sup>**

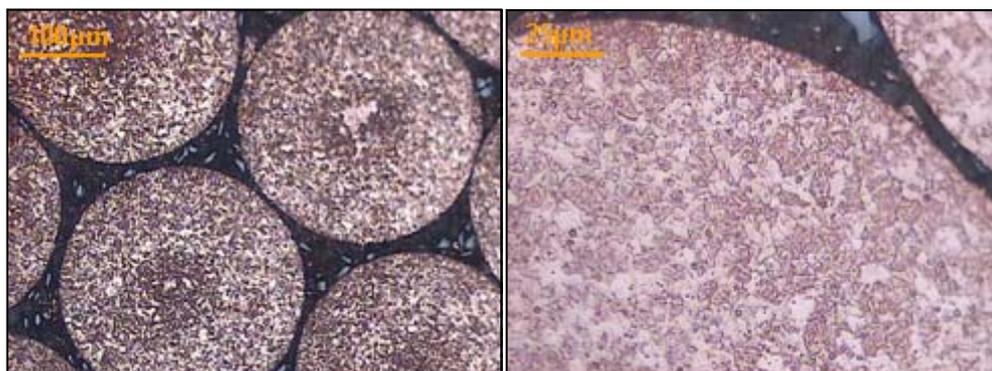


Fig 27. Corte transversal atacada x100 y x400, respectivamente.

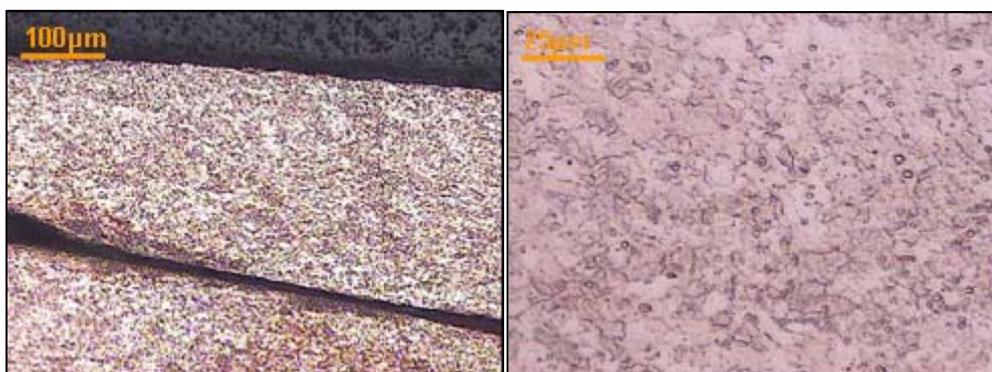


Fig 28. Corte longitudinal atacada x100 y x400, respectivamente.

A continuación se realiza una descripción de los ensayos. Se detallan los objetivos buscados y la metodología seguida.

### 5.3.1. Calentamiento en horno.

Con la intención de comprobar el deterioro del cobre electrolítico cuando se somete a distintas temperaturas, se ha diseñado una serie de ensayos donde se controla la temperatura de exposición de la forma más precisa posible. Para ello se utilizarán un horno de mufla del laboratorio docente del Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales.

No solo se buscará observar y cuantificar los cambios a nivel microestructural sino que se intentará comprobar el efecto del calor sobre las configuraciones en su conjunto. Se pretenderá reproducir el efecto de la sinterización de los hilos de cobre cuando la temperatura (1083°C) es cercana a la de fusión del cobre. También se intentará cuantificar el efecto de la temperatura y el tiempo de exposición en la formación de óxido cuproso superficial. Para ello se prepararán unas muestras de conductor de cobre con distintas configuraciones Fig 29. Las cuatro configuraciones serán sometidas a las mismas pruebas térmicas (temperaturas) de manera que se pueda observar la influencia de la disposición de los conductores.



**Fig 29.** Muestras preparadas para la observación de los efectos del calor en los conductores de cobre.

Las probetas se realizan con los mismos conductores ya analizados en estado inicial. De esta forma se podrá comparar las configuraciones microestructurales obtenidas en los ensayos con las ya obtenidas y que sirven de referencia. En la Fig 29 la foto de la

derecha se ha realizado un trenzado de los cables con el fin de que a 1083°C, que es el punto de fusión del cobre, se produzca sinterización de los cables y se unan unos con otros.

#### 5.3.1.1. Procedimiento experimental.

Dos de los indicadores del deterioro de los conductores eléctricos son el estado de recristalización del cobre y el tamaño de la capa de óxido en su superficie. Con la intención de cuantificar éstos efectos se han propuesto una serie de ensayos que sirvan para intentar relacionar temperaturas y tiempo de exposición con tamaños de grano y grosor de la capa de óxido.

En las muestras obtenidas se podrán estudiar otros tipos de efectos que se espera puedan ayudar a determinar el estado metalográfico del cobre electrolítico así como la sinterización entre los hilos del conductor sobre todo en los incendios reales.

Sobre las muestras obtenidas se realizarán observaciones micrográficas y medidas de microdurezas. Las configuraciones utilizadas son las los expuestas anteriormente:

En la Fig 30 se puede observar el horno en el que se han preparado las muestras, su límite de temperatura se encuentra en 1100° C.



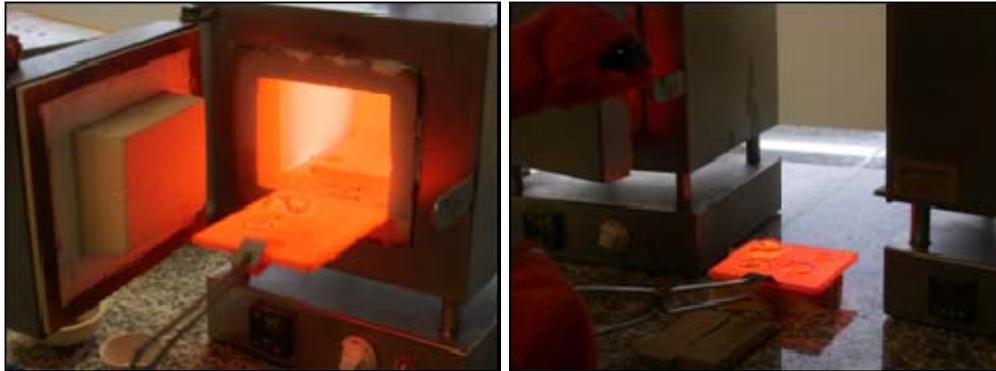
**Fig 30.** Horno mufla laboratorio docente departamento de mecánica y materiales, temperatura limite de temperatura 1100°C.

Las muestras se introducen en el horno sin aislante como se muestran en la Fig 30 y sobre soportes cerámicos con la finalidad de que su superficie esté expuesta lo más homogéneamente posible al calor y a la atmósfera del interior del horno. Las temperaturas que se realizaron en el horno fueron 950, 975, 1000, 1050 y 1083 °C con un mismo tiempo de exposición 45 min.

Hemos considerado 45 min por los estudios anteriores realizados en el departamento, Proyecto fin de carrera “metodología para el análisis del deterioro de conductores eléctricos sometidos a cortocircuitos y sobreintensidades aplicada a la investigación de incendios”. D. Eduardo Loma-Ossorio Blanch, Valencia, 2005, quien utilizó tres tiempos de permanencia 10, 30, 60 min. Viendo los resultados obtenidos hemos decidido coger una temperatura intermedia entre 30 y 60 min ya que se producen notables cambios entre estos tiempos. Al mismo tiempo se consideraron temperaturas no estudiadas en este proyecto con la finalidad de correlacionar sus resultados y los nuestros.

La metodología que se ha utilizado para la obtención de las muestras se resume en los siguientes puntos:

- Las muestras se introducen en el horno ya caliente y a las temperaturas indicadas anteriormente.
- La puerta del horno se abre únicamente para la extracción de las muestras.
- Una vez transcurrido el tiempo de exposición se extraen y se dejan enfriar a temperatura ambiente. Como a continuación se exponen en la Fig 31 se dejan enfriar al ambiente encima de un refractario.



**Fig 31.** Momento en el cual se sacan las muestras del horno y se dejan encima de un refractario para que se enfríen a temperatura ambiente.

- Una vez se ha enfriado las probetas se procede la observación de las misma y procederemos ha tomar fotos de algunas zonas que concederemos de nuestro interés.



**Fig 32.** Muestras después del enfriamiento al aire.

No solo se buscará observar y cuantificar los cambios a nivel microestructural sino que se intentará comprobar el efecto del calor sobre las configuraciones en su conjunto. Se intentará reproducir el efecto de la sinterización de los hilos de cobre cuando la temperatura es cercana a la de fusión del cobre por eso hemos trenzado los hilos para que cuando superen la temperatura de fusión  $1083^{\circ}\text{C}$  se produzcan cuellos de sinterización en estos. Estudiaremos y cuantificaremos el efecto de la temperatura y el tiempo de exposición con la formación de óxido cuproso superficial. Las cuatro configuraciones serán sometidas a las mismas pruebas térmicas (temperaturas y tiempo) de manera que se pueda observar la influencia de la disposición de los conductores.

Sobre las muestras obtenidas se realizarán observaciones micrográficas y medidas de microdurezas. Las muestras se introducen en distintas configuraciones de conductores con la finalidad de disponer de suficientes muestras para comprobar sobre ellos distintos efectos. Las configuraciones utilizadas son las siguientes anteriormente expuestas.

#### **5.4. Manipulación de muestras y análisis micrográfico.**

El procedimiento de manipulación de las muestras, intenta describir de forma clara y precisa la actuación para el estudio y caracterización las muestras tratadas el presente documento pueda servir de guía de ejecución.

La metodología propuesta se estructura como una guía completa de las etapas que deben llevarse a cabo en cualquier laboratorio de investigación, laboratorio de control de calidad, o cualquier empresa que precise de esta práctica, y que disponga de los equipos e instalaciones pertinentes. Aunque debe destacarse, que la metodología que se diseña está enfocada principalmente al estudio y análisis microestructural, por lo que está especialmente indicada para aplicaciones de investigación en cualquier departamento o unidad de materiales.

La metodología propuesta se estructurará básicamente en dos apartados: Identificación e inspección y planificación, caracterización microestructural. Puesto que dentro de la metodología se engloban numerosas técnicas y cada una de ellas precisa unas herramientas determinadas, en cada apartado, en primer lugar se exponen los fundamentos de las mismas y se completa con el planteamiento detallado del procedimiento experimental propuesto.

En general, cuando se obtengan muestras de cobre para analizar, tanto de experimentos como de incendios reales se deberá seguir un protocolo de manejo y preparación de las muestras con la finalidad de no alterar las características que deseamos estudiar. La metodología se resume en las siguientes maniobras:

- En el momento de la recepción de las muestras se preparará un recipiente o bolsa adecuado para almacenar las piezas y una carpeta que se marcarán con un nombre o código que caracterice el ensayo o incendio. La intención es que en todo momento se

pueda tener acceso tanto a las muestras como a la información obtenida hasta ese momento.

- Se procurará mantener cierta reserva sobre los resultados de los estudios de incendios reales ya que es material reservado sujeto generalmente a un proceso judicial.

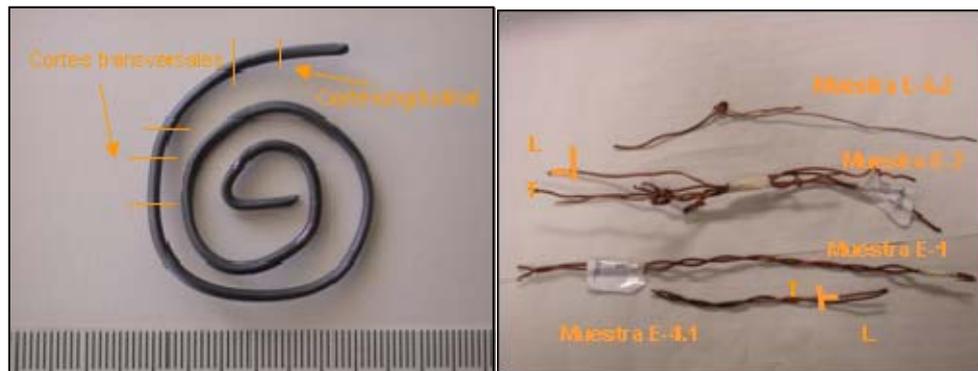
- Visualización de las muestras sin separar ninguna de sus partes, sobretodo si se trata de muestras procedentes de incendios se intentarán identificar los dispositivos eléctricos de los que se trata y sus funciones. Buscaremos marcas de posibles fallos eléctricos en los conductores (en incendios reales). Se buscarán en concreto las siguientes marcas:

- Glóbulos de cortocircuitos terminales, que hayan seccionado el conductor.
- Cortocircuitos de contacto en mitad de los conductores.
- Glóbulos de fundición.
- Gotas o perlas por calentamiento intenso.
- Marcas puntuales de arco eléctrico.
- Marcas o fracturas de origen mecánico.
- Gotas o restos de otros metales.
- Zonas con aleaciones de otros metales.
- Presencia de óxidos de cobre.
- Marcas de fallo de contacto "Glowing contact".

- Fotografiaremos de forma general las muestras y cada una de sus partes de forma que queden perfectamente identificadas. Sobre las imágenes se concretarán los cortes a realizar y los códigos de éstos. Las muestras se clasificarán en bolsas adecuados de manera que queden perfectamente identificadas y resguardadas.

- Tras realizar limpieza de restos se determinará la configuración de los conductores; unifilares, tipo cordón o multifilares. Se tomarán medidas de secciones, de diámetros y número de hilos. También se determinarán los materiales con la intención de conocer las características eléctricas de las líneas estudiadas.

- Se seleccionarán las zonas a analizar y se registrarán los cortes y secciones a realizar en las fotografías de conjunto y detalle, colocando reglas para tener referencias de su tamaño, como se puede apreciar en Fig 33



**Fig 33.** Detalle de los diferentes cortes realizados en las probetas después de un tratamiento y de un incendio real ITM 0608 para la realización de las probetas metalográficas.

Si se separan piezas o contactos eléctricos apuntar la posición que ocupaban por si posteriormente tuviéramos que hacer uso de esa información.

Las secciones se realizarán de la manera menos destructiva posible ya que son muestras muy frágiles (la capa de oxido que se crea alrededor el cobre) y un manejo no adecuado podría conllevar la destrucción en la muestra de una zona de gran interés. Los trozos sobrantes de la obtención de muestras se recogerán de forma que se sepa de que muestra y que zona proceden.

- Se tendrán localizadas e identificadas todas las muestras y piezas producidas de la obtención de éstas.

- Codificar cada muestra extraída de manera que queden perfectamente identificadas. En el caso de pertenece a un incendio, la muestra de donde procede, el código del corte, y las características particulares de la muestra. Si es experimento registraremos el material, el proceso térmico o eléctrico de preparación, tiempo de exposición. Como es el caso de la Fig 33 “Conductor unifilar, sección = 4 mm<sup>2</sup>, horno, 975 °C, 45 minutos”.

- Para la adquisición de imágenes se debe disponer de un adaptador “macro” para acoplarlo a la cámara y es aconsejable que el equipo esté formado por una estructura que permita fijar la cámara a distintas alturas y así como equipo de iluminación auxiliar como se aprecia en la Fig 34. Si la adquisición de imágenes se realiza con cámara digital o de video, cada imagen se debe nombrar de manera que queda identificada y la información se debe archivar informativamente, de manera que en todo momento se pueda acceder con facilidad a resultados del estudio obtenidos hasta entonces.



Fig 34. Detalle del equipo macro

- Tras la inspección visual se deben realizar macrografías de las muestras obtenidas después de cada tratamiento, debidas a la formación de óxidos, así como cualquier imperfección u observación que se considere de interés. Tales fotografías deben realizarse colocando una regla junto con la pieza o tomando una imagen adicional de la regla en las mismas condiciones, para tener referencias de su tamaño.

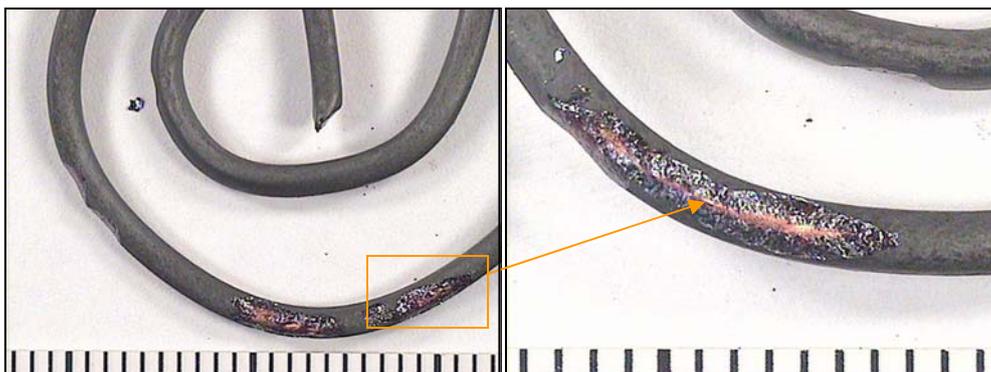


Fig 35. Detalle de conductor unifilar, sección = 4 mm<sup>2</sup>, horno, 975 °C, 45 minutos.

## 5.5. Caracterización microestructural

Una vez realizada la inspección de las muestras y hecha la planificación, se procede a la caracterización microestructural de las muestras obtenidas, tanto de los tratamientos del laboratorio como de las muestras recogidas de incendios reales, que consiste en un examen detallado y un análisis de la microestructura resultante del proceso, estudiando las transformaciones microestructurales que tienen lugar en los distintos tratamientos térmicos.

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.

La caracterización microestructural que se propone utiliza como herramientas la microscopía óptica y electrónica de barrido.

### 5.5.1. Preparación metalográfica.

Para una correcta caracterización microestructural el primer paso consiste en elegir muestras representativas de lo que se pretende estudiar metalográficas, que permita su observación mediante microscopía óptica y electrónica de barrido.

Antes de abordar cada una de las etapas que componen la preparación metalográfica, se tratan algunos aspectos que resultan de interés para entender el objetivo de esta preparación y seleccionar el método adecuado.

En primer lugar, mencionar que la preparación metalográfica viene definida por el tipo de análisis a realizar y por el tipo de material. Una muestra se considera que está preparada satisfactoriamente para su análisis macroscópico o microscópico, cuando presenta una superficie totalmente plana, libre de deformaciones y arañazos y altamente reflexiva.

La preparación metalográfica de las muestras consiste en una serie de etapas que incluyen aparte de la selección representativa de las mismas, la extracción de la muestra en nuestro caso de manera muy cuidadosa ya que como hemos mencionado anteriormente podemos dañar la capa de óxido que se ha y su montaje para facilitar el manejo durante su preparación, el desbaste y pulido para conseguir el acabado necesario para su examen metalográfico y por último una etapa de ataque para revelar la estructura del material.

La Fig 36 muestra un diagrama de las etapas básicas de una preparación metalográfica convencional.



**Fig 36.** Etapas básicas de la preparación metalográfica

#### 5.5.1.1. Corte.

Para el estudio microestructural de las muestras, como se ha comentado, es necesario la previa preparación metalográfica que comienza con una etapa de corte de la muestra que se desea estudiar, en nuestro caso las poseer varios hilos en algunos de nuestras muestras procederemos a encintarlo con cinta aislante para que no corramos el peligro de que dichos hilos se separen. Nuestro objetivo es estudiar la sección transversal y longitudinal de los hilos de cobre tratados.

Realizaremos este corte con especial cuidado, utilizando como herramienta de corte una tronzadora con refrigeración automática que evite que la muestra se caliente, produciéndole alteraciones en la misma. La Fig 37 muestra una modelo de tronzadora refrigerada con agua.

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



**Fig 37.** Tronzadora Struers Labotom.

En algunos casos donde el corte de una muestra tenga que ser mas preciso como para ello se debe utilizar una cortadora de precisión como la mostrada en la Fig 38, en la cual el posicionamiento de la muestra, la velocidad de giro del disco, la presión de corte y la velocidad de avance se controlan a través de un microprocesador, lo que permite cortes de gran precisión dimensional y de elevada repetibilidad.



**Fig 38.** Cortadora automática de precisión de la casa Struers, modelo Accutom 5.

El espesor del corte debe de ser inferior a 5 mm, ya que probetas de excesiva altura son más difíciles de desbastar y pulir correctamente.

#### **5.5.1.2. Montaje de las muestras.**

Las técnicas propuestas para la caracterización microestructural de los hilos tratados térmicamente requieren la embutición de las muestras para su mejor manipulación y preparación en las etapas de desbaste y pulido.

La embutición en caliente se realiza en una prensa hidráulica, en la cual se introduce la muestra a estudiar y la resina sintética en polvo que polimeriza a alta temperatura. Estas máquinas aplican una carga, variable con la resina a utilizar, durante el proceso de calentamiento, y posteriormente refrigeran la muestra con agua durante un tiempo determinado. La Fig 39 muestra un modelo de embutidora en caliente.



**Fig 39.** Embutidora Struers, modelo Labopress 3

- Procedimiento experimental

A continuación se describe el procedimiento experimental recomendado para la correcta embutición en caliente de las piezas, utilizando un sistema de embutición como el mostrado en la Fig 39 aunque el modo de actuación puede variar en función del equipo empleado. Los parámetros del proceso, temperatura, carga y tiempo de calentamiento y de enfriamiento dependen de la resina empleada.

En primer lugar se debe colocar la muestra en el cilindro de la prensa en posición adecuada, en este caso de manera que el corte transversal de la soldadura quede apoyado en el cilindro. A continuación se baja el cilindro lo suficiente para adicionar la resina en polvo, se añade la cantidad apropiada para que el espesor final de la probeta sea adecuado (5-6 mm), se coloca una etiqueta identificativa y se añade resina hasta cubrirla por completo. Después se coloca el cierre, se aprieta, se rosca y se pone en marcha.

Una vez terminado el proceso suena un aviso acústico, por lo que se procede a su desmoldeo tras desenroscar convenientemente la tapa. Por último, se limpia el cilindro de posibles restos de resina y se deja preparado para su uso posterior.

#### **5.5.1.3. Desbaste**

El desbaste es el primero de los procesos necesarios en la preparación de la superficie del material para su observación en el microscopio.

Consiste en la eliminación de material de la superficie de la muestra por abrasión superficial, con el fin de reducir las deformaciones y defectos producidos durante el proceso de corte. El material se desprende al someterlo a fricción con un abrasivo, siendo el más utilizado el papel esmeril de carburo de silicio. Generalmente se debe comenzar el desbaste con un papel de 220 mallas. Posteriormente se va desbastando el material con lijas más finas, siendo la secuencia habitual pasar de 220 mallas (68  $\mu\text{m}$ ) a 500 mallas (30,2  $\mu\text{m}$ ), y de ésta a 1000 mallas (18,3  $\mu\text{m}$ ).

Un modelo de equipo de desbaste se presenta en la Fig 40, posee lijas de carburo de silicio que están sujetas a unos platos giratorios refrigerados con agua, de forma que al apoyar la probeta sobre ellos ejerciendo una ligera presión, la pieza se desbasta fácil y cómodamente.



**Fig 40.** Equipo de desbaste Struers Labopol-21

- Procedimiento experimental

Para nuestro material objeto de caracterización, se debe comenzar con mallas de 220 (68  $\mu\text{m}$ ), pasando a 500 (30.2  $\mu\text{m}$ ), y finalmente por la de 1000 (18.3  $\mu\text{m}$ ), y se debe girar la probeta 90° al cambiar de malla. Para que el proceso sea objetivo, se debe observar la muestra en el microscopio óptico tras cada etapa, comprobando que se han eliminado las marcas del anterior escalón y no existan defectos. Previo a cada observación se debe limpiar la muestra con jabón bajo una corriente de agua, sumergir en alcohol y secar con un secador de aire caliente.

Es recomendable, antes de comenzar el proceso redondear los cantos de la probeta en el propio disco abrasivo, ya que resulta más cómoda su sujeción, facilitando una buena ejecución de las etapas de desbaste y posterior pulido.

Para obtener una superficie plana con mínimas deformaciones se debe colocar la probeta sobre el disco abrasivo ejerciendo una presión moderada y uniforme. Si la presión es demasiado ligera no se desprende material, y si es excesiva, origina problemas como rayas no uniformes o partículas embebidas en la matriz del material. La presión debe aplicarse uniformemente para evitar que se bisele la superficie, lo que dificultaría su enfoque en el microscopio.

Para que el abrasivo se desgaste por igual en toda la superficie del disco, se mueve la muestra alternativamente desde el borde al centro del disco, manteniéndola en la misma posición durante las últimas vueltas con el fin de que las rayas sean uniformes.

El tiempo necesario para cada etapa de desbaste, depende además del tipo de material, de la velocidad de giro de los discos y de la presión ejercida. A una velocidad de 300 r.p.m, que suele ser habitual en estos equipos, los tiempos necesarios para cada etapa son aproximadamente de cinco minutos. Es aconsejable, comprobar el estado de los discos abrasivos antes de su utilización, para evitar cualquier contaminación u otros defectos. Es nuestro caso si estuvieran contaminados por materiales mas duros estropearíamos la muestra.

#### 5.5.1.4. Pulido.

El pulido es el paso siguiente al desbaste dentro de la preparación superficial del material, ya que permite la eliminación de aquellas irregularidades que el desbaste ha dejado sobre la superficie del material. Para ello se utiliza un equipo de pulido similar al de la Fig 41, que consiste en un plato giratorio cubierto por un paño sobre el cual se vierte un abrasivo. Se utiliza una serie escalonada de abrasivos de tamaño cada vez más fino, de forma que la huella producida se va reduciendo, hasta obtener una superficie sin rayas o casi sin rayas ya en nuestro caso eso es casi imposible y altamente reflexiva, lo que se conoce como acabado espejo.



Fig 41. Equipos de pulido Struers Labopol-21.

- Procedimiento experimental

Para nuestras piezas, como es el caso de la presente caracterización, se recomienda como abrasivo pasta de diamante, primero de 3 micras de diámetro y posteriormente 1 micras de diámetro, utilizando aceite como lubricante. Debido a la

fragilidad de nuestras muestras, tenemos que tener especial cuidado en la presión que ejercemos en la misma. Se puede realizar un último paso utilizando como abrasivo pasta de diamante de 0.25 micras y como lubricante aceite, pero a veces es mejor pasar directamente a sílice coloidal y esta mucho más tiempo. Para intentar dejar la superficie de la muestra lo más limpia posible, realizaremos un pulido donde utilizaremos como abrasivo una disolución básica de sílice coloidal de 0,05 micras de diámetro (OP-S suspensión). En esta etapa se debe tener especial cuidado, dada la tendencia de cristalización de la suspensión abrasiva, por ello se debe limpiar el paño con agua destilada antes de su utilización, y es conveniente ir pulverizando agua destilada en el paño durante el proceso.

En las etapas de pulido, el modo de actuación es el mismo que en las etapas previas de desbaste, se debe colocar la probeta sobre el paño ejerciendo una presión uniforme (en nuestro caso mucho menos que en el desbaste). Es recomendable para obtener un buen acabado mover la muestra con un movimiento de rotación contrario al sentido de giro del disco.

El tiempo empleado en cada etapa, al igual que en las etapas de desbaste, depende de la velocidad de giro, en gran medida del operador y de la experiencia del mismo, ya que el cobre electrolítico es un material blando y difícil de preparar al tener tratamientos térmicos las cosas se complican.

En el caso del pulido con sílice coloidal se recomiendan velocidades de giro en torno a los 100 r.p.m y se requieren tiempos muy superiores al resto de etapas de pulido, e incluso no se descarta la cristalización del mismo y tener que volver a pasos anteriores, en este paso el objetivo es dejar una superficie lo más limpia posible e intentar quitar las rayas pequeñas que nos hayan quedado del paso anterior, son unas muestras muy difíciles de preparar y obtener unos resultados óptimos es considerablemente difícil.

Al finalizar cada etapa de pulido, al igual que en el desbaste, se debe revisar la muestra utilizando el microscopio, para poder determinar si se han eliminado completamente las marcas de la etapa anterior. Además, se debe limpiar la muestra con la finalidad de no contaminar los siguientes paños, de abrasivos de mayor tamaño. Debido a las sustancias que acompañan al abrasivo y al lubricante utilizado, es necesario limpiar la muestra con jabón bajo una corriente de agua, a continuación sumergir la muestra en alcohol y secarla con un secador de aire caliente.

#### **5.5.1.5. Ataque.**

El término “ataque” aplicado a la metalografía comprende todos los procesos utilizados para revelar las características estructurales del material que no son evidentes en la condición de pulido. El ataque tiene como objetivo revelar la estructura con suficiente contraste para mostrarla con el mayor detalle posible.

Tras el pulido la superficie puede mostrar ciertos aspectos estructurales como microporosidad, borde de grano, zona eutécticas, pero la microestructura se hace visible solamente tras el ataque.

- Ataque químico

El ataque superficial de muestras metálicas mediante reactivos químicos es una herramienta muy utilizada cuando se desea revelar alguna característica o morfología del material, con la finalidad de desvelar la microestructura del material, éste es sometido a un ataque químico empleando para ello un reactivo que posibilitará la diferenciación de las distintas fases y de los bordes de grano. Para el ataque químico del cobre electrolítico hemos empleado medio crisol de dicromato potásico con una gota de ácido clorhídrico.

El ataque se realiza sumergiendo la muestra durante unos segundos y frotando con un algodón humedecido en el electrolito. Inmediatamente después se lava con abundante agua, se sumerge en alcohol y se seca con aire. La muestra está, finalmente, lista para su observación en el microscopio óptico y la toma de fotografías.

#### **5.5.2. Microscopía óptica.**

La microscopía óptica es la técnica sobre la que se han desarrollado las bases fundamentales de la metalografía. Esta técnica es la herramienta más utilizada en la determinación microestructural de los metales.

Además de ser imprescindible para la correcta preparación metalográfica de las muestras, permite obtener gran información de las mismas tras su preparación metalográfica y revelado mediante el ataque químico.

En primer lugar se explican brevemente los fundamentos de la técnica y posteriormente se describen los pasos a seguir para la correcta utilización del equipo.

### 5.5.2.1. Microscopio óptico de reflexión.

En un microscopio óptico de reflexión, como la muestra a observar es opaca a la luz, esta debe ser iluminada por luz reflejada. Así, un haz de luz horizontal proveniente de una fuente es reflejado hacia abajo por medio de un reflector de vidrio a través del sistema inferior de lentes (el objetivo) del microscopio sobre la superficie de la muestra. Una fracción de esta luz incidente reflejada desde la superficie de la muestra se amplifica al pasar a través de dicho sistema inferior de lentes y continua hacia arriba a través del reflector de vidrio plano. Luego, el sistema superior de lentes (el ocular) se encarga de amplificarlo de nuevo.

Se denomina aumento del microscopio a la relación entre el tamaño de la imagen y el del objetivo.

La profundidad de campo, penetración, o resolución vertical del objetivo, es la capacidad de dar imágenes nítidamente enfocadas cuando la superficie del objeto no es completamente plana.

El poder de resolución de un microscopio se define como la capacidad de un objetivo para producir imágenes separadas y distintas de dos detalles del objeto muy próximos. En microscopía óptica suelen emplearse tipos de iluminación distintos a la luz blanca que, si bien, no aportan una mayor resolución, si permiten facilitar la separación de dos incidentes observables. La técnica de iluminación utilizada son en nuestro caso es:

- Campo claro: En el campo claro la superficie de la muestra está posicionada perpendicularmente con respecto al eje óptico del microscopio y se utiliza luz blanca. Esta técnica de iluminación es generalmente suficiente para muestras que posean un contraste inherente.

La Fig 42 muestra un modelo de microscopio óptico que trabaja con cuatro aumentos (50x, 100x, 200x y 400x) y que permite acoplar un dispositivo de adquisición de imágenes.

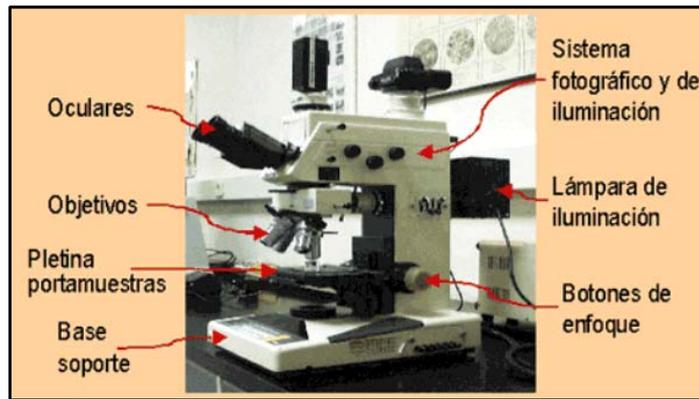


Fig 42. Microscopio óptico Nikon Microphot FX

- Procedimiento experimental

Para la observación y adquisición de imágenes mediante el microscopio óptico se coloca la muestra lo más perpendicularmente posible al rayo de luz proyectado para que la imagen sea clara. En caso de tener problemas de biselado se recomienda utilizar un soporte adicional que permita la colocación de la superficie lo más horizontal posible.

Después se ajusta el número de aumentos necesarios y el tipo e luz a utilizar, según la muestra. A continuación se enfoca el visor hasta conseguir una imagen nítida de la muestra, el sistema permite colocar rejilla cuadriculada de división conocida en el ocular.

Fotografiar las configuraciones que se consideran interesantes para el estudio. Las micrografías se grabarán de manera que se puedan identificar posteriormente. Deberá constar en el nombre de imagen: El experimento o incendio, la muestra de donde procede, la identificación del corte, la posición en la probeta, la escala y el número de micrografía, en caso de que se haga más de una y los datos de interés. Por ejemplo la fig 11 "2,5 mm<sup>2</sup> con tratamiento de 1083°C-45min atacada x200.

De las muestras preparadas se determinará de forma general los siguientes parámetros:

- Tamaño de grano.

- Variabilidad del tamaño del grano.
- Grosor de las capas de óxido.
- Microdurezas.
- Pérdidas de sección de los conductores.

Se completa el proceso superponiendo (mediante un programa multimedia) la fotografía de la muestra con la con la distancia patrón tomada anteriormente. De esta forma se tienen las imágenes con una línea calibrada indicativa de las dimensiones de los elementos observados.



**Fig 43.** Imagen microscopía óptica de cobre electrolítico de 2,5 mm<sup>2</sup> con tratamiento de 1083°C-45min atacada x200.

### 5.5.3. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido es una herramienta fundamental en la caracterización microestructural de los materiales metálicos.

El microscopio electrónico SEM es capaz de hacer magnificaciones desde 5 hasta 240.000 aumentos, con un límite de resolución de alrededor de 100 Å. La profundidad de campo es 300 veces mayor que la del óptico: 1.000 µm a 100 aumentos y 10 µm a 10.000 aumentos. El poder captar imágenes a mayores aumentos resulta de gran interés en el caso de el cobre electrolítico, ya que permite obtener detalles microestructurales con gran

resolución, para el estudio de interfases, bordes de grano, el análisis de los óxidos formados y otras observaciones que sólo pueden realizarse con esta técnica.

#### **5.5.3.1. Microscopio electrónico de barrido:**

El principio de funcionamiento de este microscopio se puede describir de un modo sencillo: Un haz de electrones procedente de un filamento es acelerado y focalizado mediante una serie de lentes electromagnéticas hacia una muestra, sobre la cual se va desplazando lentamente. Debido a la interacción que sufren estos electrones con la muestra, se generan una serie de señales que, convenientemente recogidas y amplificadas permiten obtener información de ésta tanto desde un punto de vista microscópico como de su composición química.

De este modo se establece una correspondencia entre el lugar de la muestra en que se encuentra el haz incidente en un momento determinado y el brillo luminoso del haz generado por la muestra, que incide sobre una pantalla fluorescente de TV. Este haz emitido por la propia muestra está compuesto de numerosos tipos de señales, y cada una de ellas proporciona información sobre diferentes aspectos del material.

Las tres señales más importantes en la microscopía electrónica de barrido son:

- Electrones retrodispersados (Backscattered electrons). Son los electrones procedentes del haz incidente que son dispersados por la superficie del material en la misma dirección de llegada. La intensidad de retrodispersión del electrón es directamente proporcional a su masa atómica, por lo que elementos diferentes se observan con más o menos brillo según sean más o menos pesados.

- Electrones secundarios. Son los electrones que la muestra emite debido a la interacción con el haz incidente. El número y la intensidad con que estos electrones alcanzan la pantalla fluorescente son inversamente proporcionales a la distancia que han recorrido desde su punto de emisión. Por tanto, su proyección sobre la pantalla representa fidedignamente la topografía de la muestra.

- Espectros de Rayos X. Son los fotones que la muestra emite en forma de radiación X debido a la interacción con el haz incidente. Estas señales son recogidas en un espectrómetro de RX, que separa las líneas de energía emitidas por los diferentes

elementos contenidos en la muestra, y por comparación con patrones, permite identificar dichos elementos tanto de forma cualitativa como cuantitativa, ya que la intensidad de la radiación es proporcional a la concentración del elemento. Esta técnica nos servirá de ayuda para obtener las composiciones de los dos óxidos que se forman en la superficie.

Así pues, desde un punto de vista práctico estas imágenes aportan información microestructural mediante imágenes electrónicas, bien de electrones secundarios o de electrones retrodispersados e información analítica o composicional mediante la señal de rayos X característicos.

En este último caso se puede obtener un espectro de rayos X de la zona en observación o bien, seleccionando una línea característica de un determinado elemento es posible observar en la pantalla, mediante una imagen de puntos, la distribución del elemento de la zona de observación. Esta imagen se conoce también como mapa de rayos X.

Así pues, es recomendable que el microscopio utilizado esté equipado con un detector de elementos ligeros para la realización de microanálisis mediante energías dispersivas de Rayos X (EDX). En la Fig 44 se muestra el microscopio utilizado en la comprobación experimental de la metodología.



**Fig 44.** Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 6300, que incorpora el detector de elementos ligeros ISIS Link de la casa Oxford.

Los componentes esenciales del microscopio SEM son:

- Cañón de electrones
- Columna de aceleración
- Los objetivos y lentes concentradoras
- Sistema de vacío
- Bobinas de rastreo
- Sistema colector de electrones
- Sistema generador de barrido
- Amplificadores de señal
- Tubo indicador de rayos catódicos.
- Soporte informático.

#### **5.5.3.2. Sistema fotográfico**

El cañón electrónico, en lo alto de la columna de aceleración, emite electrones desde un filamento de wolframio incandescente y los impulsa en trayectoria descendente en forma de haz. Anteriormente, la muestra ha sido situada en la parte inferior de la columna y se ha efectuado un vacío profundo ( $10^{-6}$  a  $10^{-8}$  torr).

El flujo electrónico es guiado y controlado gracias a lentes electromagnéticas que focalizan el haz hacia la probeta. Las bobinas de rastreo van a hacer que el haz se desvíe de su trayectoria inicial, con el fin de explorar una zona más amplia.

#### **5.5.3.3. Equipo de metalización**

Un requisito esencial que debe cumplir una muestra para analizarla con un microscopio electrónico de barrido es que permanezca a potencial cero durante su observación. Si la conductividad eléctrica de la muestra es pequeña, se recubre con una película conductora, metálica o de carbono, que facilita su descarga eléctrica a través del soporte metálico y permite que permanezca a potencial cero durante su observación.

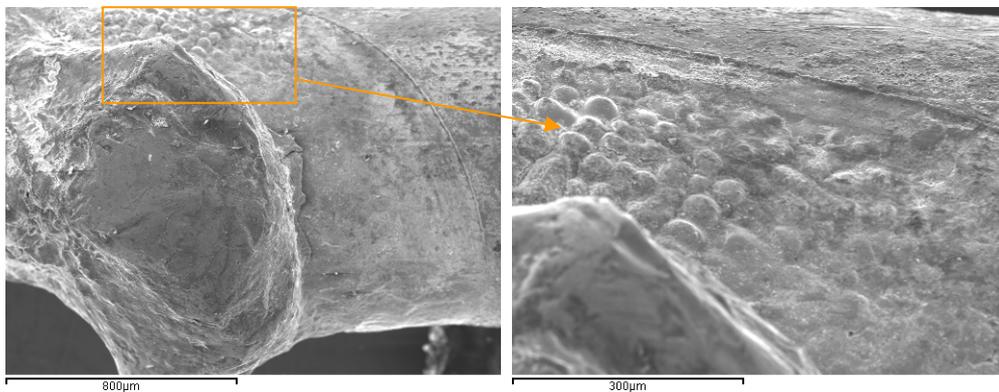
Además se coloca un cordón de plata (puente de Ag) que une la muestra con el portamuestras, para asegurar que se produce la descarga.

#### Procedimiento experimental

Como ya se ha comentado el principal objetivo del uso de la microscopía electrónica de barrido, es obtener detalles microestructurales que no se pueden apreciar mediante microscopía óptica, de modo que se puedan estudiar interfases, bordes de grano, fases secundarias y otras observaciones que resulten de interés. También resulta aconsejable realizar análisis químicos (semicuantitativos) generales y/o puntuales de algunas de las zonas observadas, ya que resultan de interés en la identificación de fases, y aportan información acerca de la distribución de constituyentes.

En primer lugar se sitúa la muestra en el portamuestras colocando el puente de plata, y en caso de ser necesario, se realiza el metalizado de la misma. A continuación se colocan los portas en el portamuestras del SEM y se realiza un esquema de la ubicación de las muestras. Se dejan las muestras en la cámara sometida a vacío (en la parte inferior de la columna), donde se va a llevar a cabo el análisis y se retira el instrumento usado para introducir muestras. Por último, se procede a la obtención de resultados, en este caso imágenes y análisis químico semicuantitativo general y puntual, con la ayuda del software suministrado por el proveedor.

Se presenta un ejemplo de imagen de SEM, que corresponde al incendio ITM0608.



**Fig 45.** Aspecto general de la superficie de la pegadura de latón en el extremo de uno de los conductores en la muestra E4x75 imagen de electrones secundarios ITM 0608.

#### 5.5.4. Ensayo de microdureza.

El objetivo de este ensayo es el de determinar la resistencia que opone un cuerpo a ser rayado o penetrado por otros con los que se compara. Para ello se apoya sobre la probeta a estudiar un determinado penetrador, que ejerce una fuerza  $P$  durante un tiempo  $t$ , dejando una huella característica sobre el material ensayado. La superficie de la huella permite determinar la dureza del material, y por tanto la resistencia mecánica del mismo. El tipo de ensayo de dureza utilizado es vickers:

Ensayo Vickers: utiliza como penetrador una pirámide de diamante de base cuadrada, que deja una huella cuadrada de diagonal  $d$ . La dureza Vickers se define como:

$$\text{Ecuación 2. } HV = \frac{1.854 \cdot 1000 \cdot P}{d^2}$$

El ensayo de microdureza constituye un subgrupo dentro de los ensayos de determinación de dureza, caracterizado por la aplicación de cargas relativamente bajas (entre 0.01 y 10 N) y por el uso de técnicas de microscopía óptica para la medida de las huellas. El ensayo de microdureza permite obtener un valor numérico relativo a la capacidad del material para resistir la penetración controlada del indentador. La medida obtenida en este ensayo no puede considerarse como una propiedad básica del material sino que depende de un complejo conjunto de propiedades como son el módulo elástico, límite elástico, capacidad de endurecimiento por precipitación, etc.



Fig 46. Microdurómetro Matsuzawa MHT2

Se realizara un barrido de microdureza sobre la sección transversal y longitudinal de cada clase de cable tanto de la preparación metalográfica del corte transversal como el longitudinal. De este modo es posible conocer con detalle las características de las distintas microestructuras dependiendo de la temperatura del tratamiento térmico.

- Procedimiento experimental

Los parámetros del ensayo, carga y tiempo vienen dados por la norma en función del tamaño de huella que se debe obtener. Para el cobre se recomienda una carga de 100 g ejercido durante un tiempo de 15 s de modo que la huella sea fácilmente medible y utilizar un espaciado mínimo de cinco veces el valor de la diagonal. Para cada huella se miden las dos diagonales y se toma el valor medio, con este dato y los parámetros de carga y tiempo, se obtiene el valor de dureza en ese punto, utilizando tablas o calculándolo con la fórmula matemática correspondiente.

Obtendremos la variación de microdureza producida por los cambios microestructurales en las diferentes temperaturas.

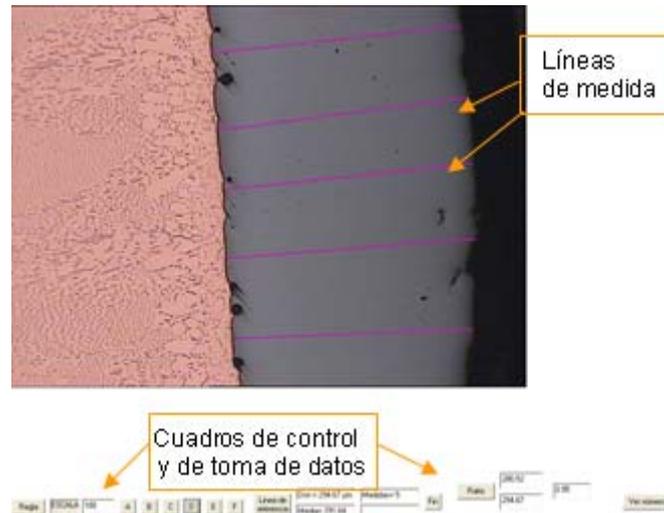
#### **5.5.5. Medición del espesor de la capa de óxido**

Una vez terminados todos los ensayos comenzó el proceso de preparación de las muestras para su observación mediante lupa estereoscópica y el microscopio óptico. Aunque para la medición de la capa de óxido solo era necesaria la presentación de las muestras de conductor en el sentido transversal, también se prepararon en sentido longitudinal para la obtención de medida del espesor de la capa de óxido con el cambio de las temperaturas.

A continuación se explica la metodología utilizada para la realización de las medidas de tamaños de capa de óxido de las muestras. Para ello se utiliza el programa de medida desarrollado en el proyecto fin de carrera anteriormente citado.

En la Fig 47 se observa la pantalla del programa de toma de distancias donde se observa que se han realizado 5 medidas sobre la capa de óxido. El programa obtiene la media aritmética de las medidas que realicemos sobre una imagen y nos la muestra en un control de la pantalla. Otra utilidad que tiene es que memoriza en un fichero todas las medidas realizadas por si las queremos procesar en una hoja de cálculo. En este caso se

observa que la media obtenida de las cuatro medidas realizadas es de 292.98 micras. Con esta medidas obtendremos resultados de cómo varía la capa de oxido con la temperatura.



**Fig 47.** Ejemplo de la toma de medida del espesor de la capa de oxido mediante el programa de medida anteriormente citado.

#### 5.5.6. Medición del tamaño de grano

Otro factor a medir es el tamaño de grano con respecto a la temperatura, para ello se utilizaremos el método de intersección, que describiremos a continuación. En varias fotografías que muestran la estructura granular, se trazan líneas rectas de la misma longitud. Se cuentan los granos cortados por cada uno de los segmentos; se dividen la longitud de la línea por el número medio de granos cortados por cada segmento. El tamaño del grano se obtiene dividiendo este resultado por los aumentos lineales de las micrografías.

El programa utilizado para estas mediciones es el mismo que para el espesor de la capa de oxido anteriormente expuesto.

Para la toma de las medidas se seguirán las siguientes reglas:

- Tomaremos las muestras donde el conductor se observe transversalmente.

- Tomaremos una micrografía que por su contraste muestre el borde de grano claramente.
- Se elegirá la escala adecuada para realizar las medidas en el programa informático de medida.
- Si se dispone de otra micrografía de la misma muestra se tomarán las medidas y se promediará con la anterior.

## 5.6. Análisis de incendios reales.

En el caso de incendios reales, las muestras se recogen una vez examinado el escenario del incendio y encontrado el foco inicial u origen del incendio. Se recogen tanto en el propio lugar del foco inicial como en las partes de la línea donde se espera que se confirme la sobrecarga. Se recoge 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 confirmaran la teoría propuesta.



**Fig 48.** Imágenes del lugar de donde se han extraído las muestras del incendio real de una fabrica, con código ITM 0725.

Antes de su recogida las muestras se fotografían en la posición en que quedaron tras el incendio, con la intención de que no haya una pérdida de información en ninguna operación. Se recogen utilizando las tenazas de corte, sin realizar tracciones o flexiones ya que sino se podría modificar la micro-estructura del cobre. Se ha procurado no golpearlas ni doblarlas ya que pueden desprender las películas superficiales de óxidos o de otros elementos que tuvieran adheridos.

Las muestras recogidas se empaquetan en bolsas de plástico con sistema de cierre hermético de manera que queden preservadas de la humedad o de otros materiales que pudieran contaminarlas. Cada bolsa se etiqueta con un código que indica el tipo de muestra, la zona de recogida y la imagen en la que está incluida la muestra. Muchas de estas muestras es tan selladas por el notario.

Estas muestras nos son enviadas para su posterior análisis. En primer lugar se procede a la fotografiar las muestras recibidas tal cual, sobretodo si dichas muestras están selladas ante notario, en dicho caso se fotografiará la firma del mismo. Una vez hecha la foto inicial se abrirá cada bolsa y fotografiaremos todas las muestras. Se observarán como hemos explicado en el apartado 5.3 *metodología y manipulación de las muestras*. Tras una inspección visual detallada se identifican varios puntos que pueden aportar información y que se prepararán para su observación. Se procederá a tomar fotografías de detalles descrito en el punto anteriormente citado.



**Fig 49.** Aspecto general de las piezas recibidas en el incendio ITM 0725.

Una vez realizadas la fotografías pertinentes, se elegirán las muestras más representativas, es decir las que contengan perlas, más oxidación, estén más deterioradas, y una que no esta deteriorada la cual no servirá de patrón.

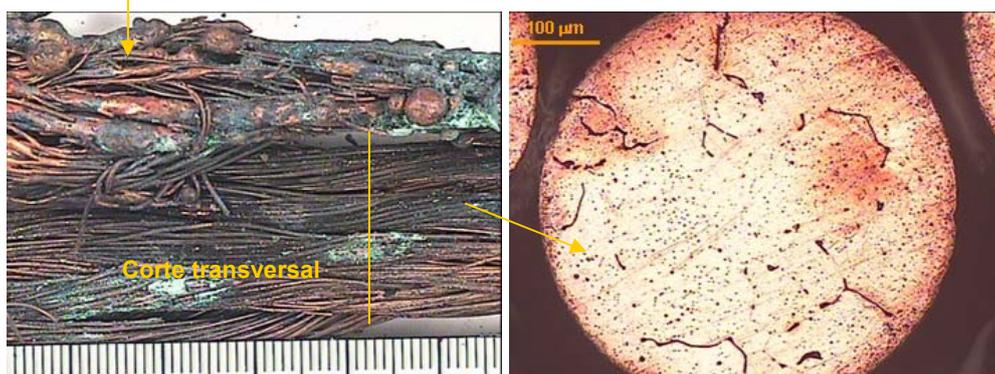
En la Fig 49 se observa algunas de las muestras recogidas de una fábrica. Todas las muestras presentan zonas de fusión en los hilos de los cables, con fuerte deterioro superficial, por lo que se decide realizar preparaciones metalográficas de cortes transversales de cada uno de los cables. Indicando donde hacemos los cortes en las fotografías al hacer el informe final del incendio.

Dichas preparaciones metalográficas se prepararan siguiendo los pasos anteriormente descritos en el apartado 5.4.1 *Preparación metalográfica*.

Una vez preparadas las probetas metalográficas se procede a la observación por el microscopio detallada en el apartado 5.4.2 *Microscopia óptica*. Y si es necesaria se llevaran a microscopia electrónica de barrido., descrita en el apartado 5.4.3 *Microscopia electrónica de barrido*.



**Fig 50.** Detalles de la muestra 1(2-3) del incendio ITM 0725 y detalle macro de una zona de la misma.



**Fig 51.** Detalles macro de la zona donde se realizó el corte transversal. y la microestructura con fragilización en borde de grano de los hilos en la muestra 1(2-3), x 100.

Una vez realizado todo el estudio microestructural se procede a la realización del informe del incendio con las correspondientes conclusiones.

## **RESULTADOS Y DISCUSION**

## 6. Resultados y discusión.

Se analizarán varios factores observados en las muestras preparadas en los ensayos descritos en el capítulo anterior. Del estudio de dichos factores se obtendrá información útil para establecer el estado de deterioro de los conductores de cobre. A su vez se intentará comparar las microestructuras de diferentes incendios reales analizados anteriormente en el Instituto de Tecnología de Materiales de la Universidad Politécnica de Valencia.

De las muestras preparadas se determinarán los valores de los siguientes factores:

- Espesor de las capas de óxido.
- Tamaño de grano
- Análisis químicos superficiales para la identificación del tipo de óxido mediante SEM.
- Microdurezas.
- Observación de microestructuras.

A continuación se analizarán casos de incendios reales, estudiados en el Instituto de tecnología de materiales, de la universidad politécnica de valencia.

### 6.1. Estudio de la capa de óxido de cobre.

La capa de óxido es un indicador del deterioro en un conductor eléctrico por la presencia de óxidos de cobre, principalmente óxido cuproso,  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Su estudio puede suministrar información sobre el estado actual del cobre y sobretodo de los procesos térmicos que ha debido de soportar. Como se comprobará durante el ensayo, también obtendremos información del tipo de atmósfera en la que se encontraba el conductor durante su calentamiento.

### 6.1.1. Medición del espesor de la capa de óxido

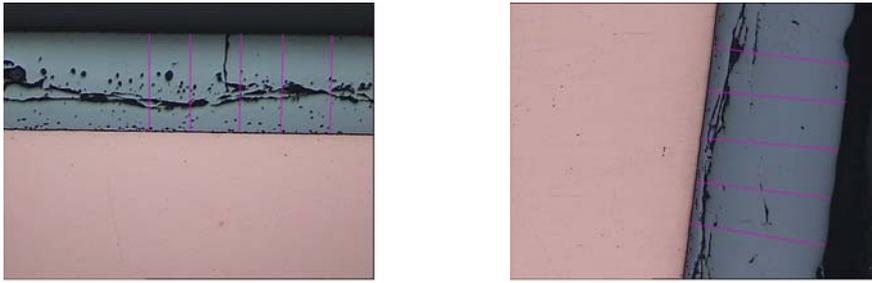
De los ensayos realizados vamos a estudiar las configuraciones que forman los óxidos superficiales.

Según se explica en el apartado 4.1.5.3.3, *Capa de óxido superficial* a la 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  $150^\circ\text{C}$  ésta película crece, y a medida que aumentamos temperatura la película de  $\text{Cu}_2\text{O}$  formada aumenta su espesor.[3] El tamaño que llegue a alcanzar la capa de óxido depende de la temperatura, del tiempo de exposición y de la composición de la atmósfera en contacto con el conductor (concentración de oxígeno). A pesar de que la composición de la atmósfera puede variar en el interior de los hornos, para esta primera serie de ensayos, la tomaremos como constante. Se relacionan 2 factores, temperatura, y espesor de la capa de óxido, ya nuestro tiempo de exposición es constante de 45 minutos.

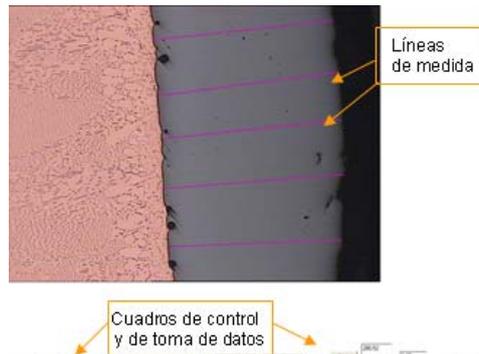
Se diseñaron unos ensayos donde se varió la temperatura de exposición teniendo constante la temperatura del horno de mufla del Laboratorio de Docente del Departamento de Ingeniería de Mecánica y de Materiales. Una vez obtenidas las muestras se aplicará la metodología de análisis desarrollada en el apartado 5.3 *Metodología de preparación y de muestras*. En este caso las muestras se preparan de manera que se pueda medir el grosor de la capa de óxido por lo que se prepararon haciendo un corte longitudinal en el hilo. Tras pulirlas y atacarlas se medirá el grosor de la capa de óxido y se representarán los datos en una tabla con la intención de obtener relaciones entre los parámetros: espesor de capa, temperatura.

Las muestras que se obtengan también servirán para estudiar los cambios microestructurales en el cobre electrolítico, principalmente el crecimiento del tamaño de grano y propiedades mecánicas (microdurezas).

En la Fig 52 y Fig 53 se observa como se han tomado las micrografías para tomar medidas sobre ellas. Las medidas se realizarán mediante un software desarrollado por el del proyecto fin de carrera anteriormente citado para la obtención de diferentes medidas en las micrografías obtenidas en formato JPG.



**Fig 52.** Las medidas del espesor de la capa de oxido mediante el programa de medida anteriormente citado, conductor de 4mm<sup>2</sup> con tratamiento térmica de 950 °C y 1000°C



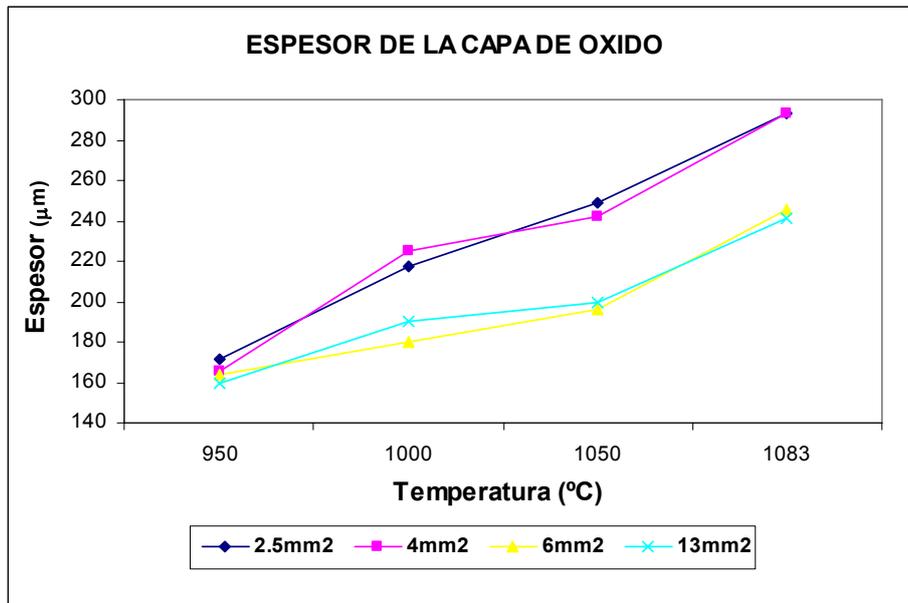
**Fig 53.** La toma y comparación de las medidas del espesor de la capa de oxido mediante el programa de medida anteriormente citado, conductor de 4mm<sup>2</sup> con tratamiento térmica de 1083°C.

La correlación de la capa de oxido con la temperatura del tratamiento es importante para comprobar la temperatura a la que se ven sometida los conductores en incendios reales. No obstante hay que tener en cuenta que solo se trata de una primera aproximación, puesto que la atmosfera de un incendio puede estar contaminada con distintos elementos y el proceso no sucede en condiciones controladas.

A continuación se exponen los resultados de los diferentes tamaños de las capas de oxido para los 4 tipos de conductores analizados:

Temperatura	2.5 mm <sup>2</sup>	4 mm <sup>2</sup>	6 mm <sup>2</sup>	13 mm <sup>2</sup>
950	171.074	165.62	159.450	163.528
1000	217.39	224.94	179.89	190.25
1050	249.07	242.32	196.30	199.95
1083	293.30	292.98	245.90	240.90

**Tabla 5.** Variación de la capa de oxido con el aumento de la temperatura en las diferentes secciones.



**Gráfica 11.** Comparación del espesor de la capa de oxido formado con el aumento de la temperatura, en las diferentes secciones de cable.

Como se puede apreciar en la Gráfica 11 todos los conductores presentan un aumento del espesor de la capa de oxido mas o menos lineal, con espesores significativamente mayor en los conductores unificares. Esto puede ser debido excesivamente a la masa o al espesor del cable.

La oxidación es un proceso que requiere que los átomos de oxígeno presentes en la atmosfera difundan hacia el interior del cobre antes de producirse la reacción química.

Asumiendo que el proceso controlante, es precisamente esta difusión la que se puede correlacionar con el espesor de la capa de oxido, a través de la difusividad del oxígeno en el material.

Según la segunda ley de Fick, la difusividad depende de la temperatura según la ecuación [19] :

$$\text{Ecuación 3. } D = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}$$

Tomando logaritmos neperianos:

$$\text{Ecuación 4. } \ln(D) = -\frac{Q}{RT} \cdot \ln(D_0)$$

Y sabiendo que la difusión puede expresarse en función del espesor y el tiempo de la forma:

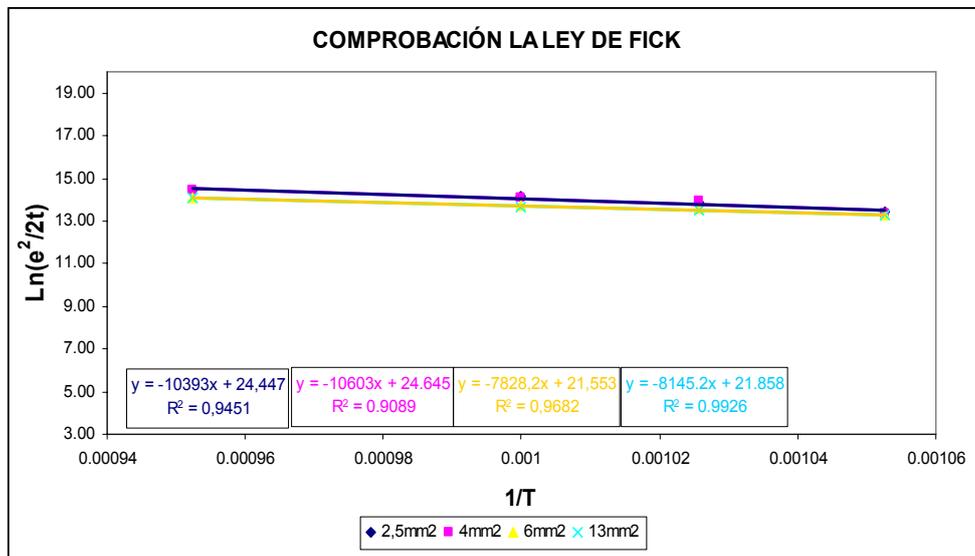
$$\text{Ecuación 5. } D = \frac{\text{espesor}^2}{2 \cdot t}$$

Queda:

$$\text{Ecuación 6. } \ln\left(\frac{\text{espesor}^2}{2 \cdot t}\right) = -\frac{Q}{R} \cdot \ln(D_0) \cdot \frac{1}{T}$$

Siendo: D la difusividad para la temperatura del tratamiento ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $D_0$  la difusividad inicial ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) a temperatura ambiente, Q (Kj/mol) la energía de activación del proceso, R la constante de los gases ideales (J/mol K) y T la temperatura (K) [19].

Por tanto, si representamos  $\ln(e^2/2t)$  frente  $1/T$  siendo "e" el espesor de capa medida de la capa de óxido, "t" el tiempo de tratamiento y "T" la temperatura se obtiene la siguiente gráfica:



**Gráfica 12.** Comprobación de la ley de Fick.

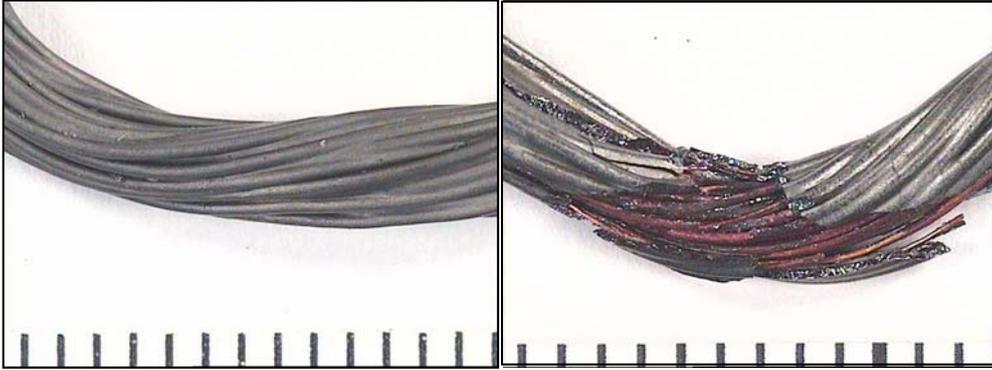
Dados los resultados obtenidos, puede decirse como era lógico esperar, que la difusión de la capa de óxido aumenta cuando aumenta la temperatura. Algo muy normal, pues la difusión en estado sólido de los materiales es directamente proporcional a la temperatura que esté sometido en el proceso.

Con los resultados obtenidos, se podría realizar el cálculo aproximado de la temperatura media a la que ha estado expuesto el material durante el incendio, siendo las condiciones del incendio las de un incendio en atmósfera oxidante y no influyeran otros factores, es decir, sin la presencia de otros agentes químicos o físicos, que produjeran algún efecto en la difusión del óxido.

Además, en el gráfico se pueden apreciar una ligera diferencia entre las tendencias de difusión de los dos tipos de conductores, siendo algo superior para los para los cables unifilares.

### 6.1.2. Análisis de la capa de óxido por SEM.

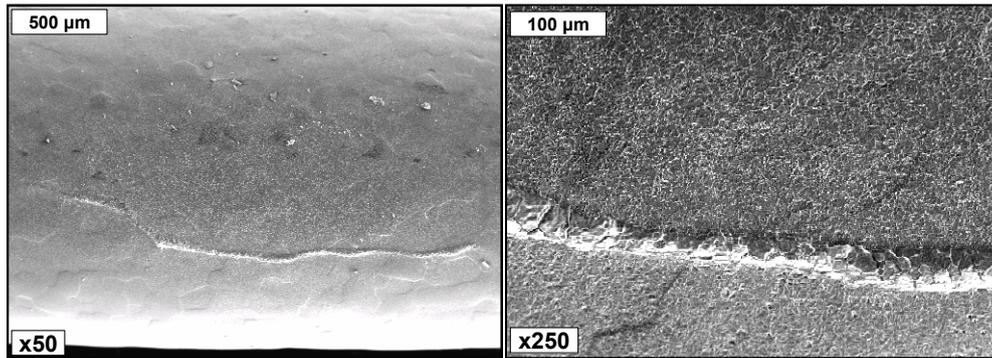
La primera muestra analizada es un tramo de conductor de cobre recubierto de óxido cúprico, de color negro, que recubre un conductor oxidado en el horno a 950°C.



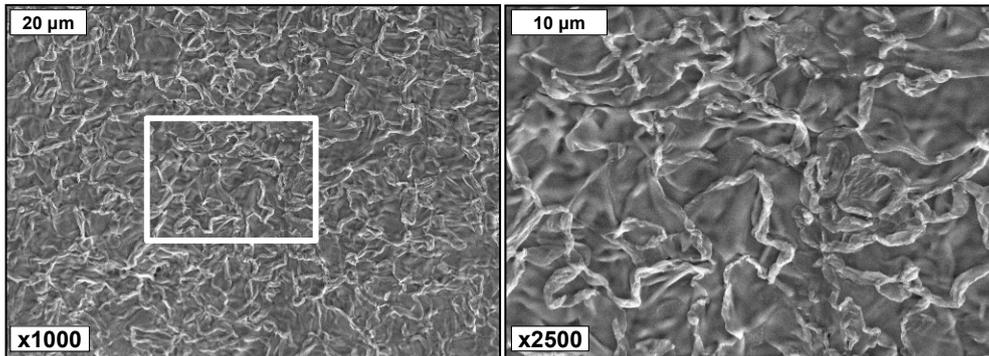
**Fig 54.** Conductor de cobre donde se observa el óxido cúprico (negro) que recubre al óxido cuproso (rojo) como se puede observar en la figura de la derecha aprovechando una rotura de dicha capa.

El cobre puro forma dos tipos de óxido el óxido cuproso,  $\text{Cu}_2\text{O}$ , y el óxido cúprico,  $\text{CuO}$ . El primero crece desde la superficie del cobre a temperaturas superiores a 400°C y el segundo se forma a esas mismas temperaturas en la superficie del anterior. Según se observa en la Fig 54 el óxido cúprico es de color negro mientras que el óxido cuproso está formado por cristales de tonalidades rojas, en la figura de la derecha de ve claramente los dos óxidos gracias a la rotura de la misma.

En las siguientes imágenes SEM se observa la superficie de un conductor expuesto a tratamiento térmico en horno.



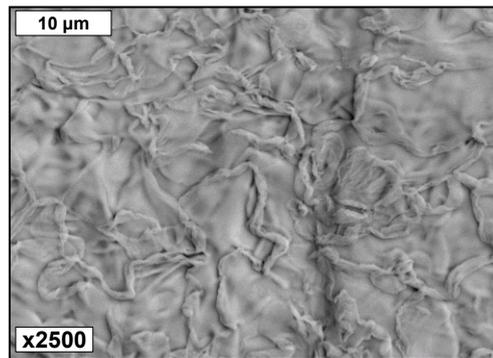
**Fig 55.** Imagen por SEM de la superficie de un conductor de cobre oxidado x50. Vista general de un conductor de cobre con óxido cuproso, se observa la forma del grano de óxido cuproso x250.



**Fig 56.** Capa exterior de óxido cúprico x1000. Detalle de la estructura que forma el óxido cúprico x2500.

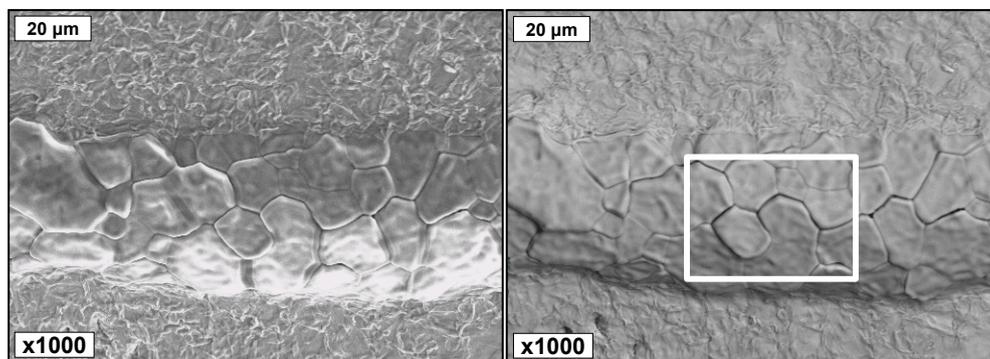
En la Fig 56 se observa la zona de análisis cuantitativo de la concentración de elementos químicos de la Gráfica 13.

En la Fig 57 se observa la estructura del óxido cúprico mediante BSE en la misma zona que la Fig 56. Se observa de forma clara la zona de unión entre dos granos del óxido cuproso inferior.



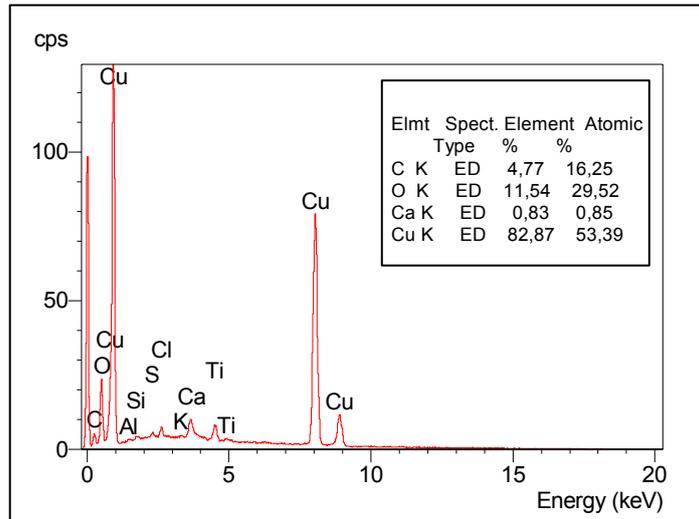
**Fig 57.** Imagen BSE donde se observa la zona de unión entre dos granos de óxido cuproso por debajo del óxido.

En las Fig 58 se observa el detalle de una fractura donde el óxido cuproso sobresale del óxido cúprico superficial. Se observa la estructura granular de óxido cuproso.

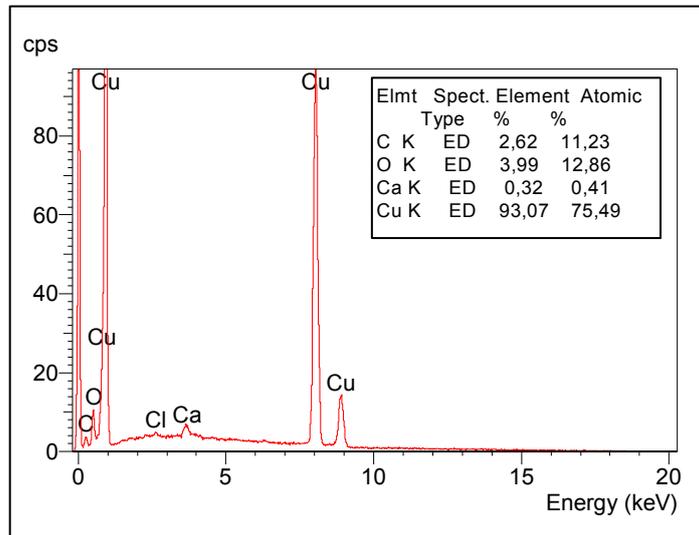


**Fig 58.** Imagen de SEM, detalle de la fractura en la superficie del conductor oxidado. Se observan granos de óxido cuproso x1000. Imagen de SEM, bse de la zona de la de la micrográfica de la izquierda. Se encuadra la zona analizada con EDX.

A continuación se exponen los análisis cuantitativos de los análisis químicos realizados de los dos micrográficas anteriores de las zonas que están encuadradas.



**Gráfica 13.** Resultado del análisis químico realizado en la imagen de Fig 56. Se observa mayor concentración de oxígeno que en el análisis de la Fig 58.



**Gráfica 14.** Análisis de concentración de elementos químicos de la Fig 58 . Se comprueba como los cristales de la zona analizada son de oxido cuproso  $\text{Cu}_2\text{O}$  ya que su concentración es inferior a la de da en el oxido cúprico  $\text{CuO}$ .

En las Gráfica 13 y Gráfica 14 se muestran los análisis realizados en las muestras de las Fig 56 y Fig 57 en la zona encuadrada. Se comprueba como en el primer análisis Gráfica 13 la concentración de oxígeno (11,54) es muy superior a la del segundo 0 que da un valor de 3,99. Esto es debido a que en el primero se detecta el óxido cuproso,  $\text{Cu}_2\text{O}$ , mientras que en el segundo se analiza una zona con óxido cúprico,  $\text{CuO}$ .

## 6.2. Tamaño de grano

Se propone analizar el crecimiento del tamaño de grano. Para la toma de los tamaños de grano se utilizará el mismo programa que hemos utilizado anteriormente para la medida de espesor de la capa de óxido. Se tomarán las medidas sobre las micrografías 5 de cada tipo de conductor y temperatura, obtenidas en sentido longitudinal al conductor. De las muestras introducidas en el horno se tomarán medidas sobre las 4 secciones diferentes.

En las figuras siguientes se puede observar el incremento del tamaño de grano del conductor de sección  $4\text{mm}^2$  los efectos que tienen sobre el grano con el incremento de la de temperatura y hasta llegar a  $1083^\circ\text{C}$  que tenemos la fusión del material, donde apreciamos los granos columnales y los granos dendríticos como consecuencia de la fusión y enfriamiento de material.



**Fig 59.** Microestructura de conductor  $4\text{mm}^2$  de sección en estado de suministro y con un tratamiento de  $950^\circ\text{C}$  durante 45 min, y enfriamiento al aire.



**Fig 60.** Microestructura de conductor 4mm<sup>2</sup> con un tratamiento de 975°C y 1000°C respectivamente, durante 45 min, y enfriamiento al aire.



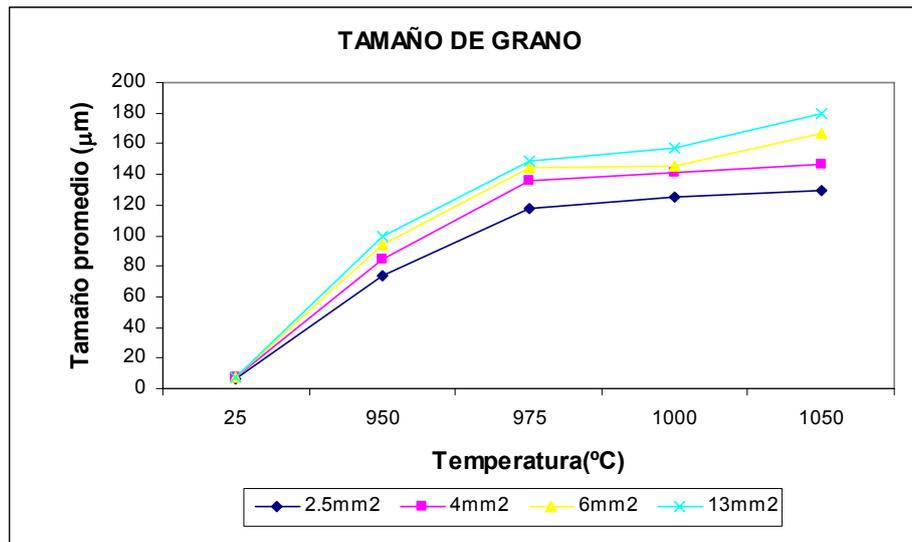
**Fig 61.** Microestructura de conductor 4mm<sup>2</sup> con un tratamiento de 1050°C y 1083°C respectivamente, durante 45 min, y enfriamiento al aire.

En la tabla siguiente se observan los resultados de las mediciones de granos en cada una de las temperaturas para las diferentes secciones de conductores:

Temperatura	2.5 mm <sup>2</sup>	4 mm <sup>2</sup>	6 mm <sup>2</sup>	13 mm <sup>2</sup>
25°C	6.653μm	7.563μm	7.876μm	7.493μm
950°C	74.319μm	84.824μm	93.705μm	99.159μm
975°C	117.833μm	135.478μm	144.598μm	149.056μm
1000°C	125.08μm	140.655μm	145.971μm	156.74μm
1050°C	129.257μm	146.67μm	167.236μm	179.249μm

**Tabla 6.** Variación del tamaño de grano con el aumento de la temperatura en las diferentes secciones.

A continuación se grafican los datos de la tabla anterior:



**Gráfica 15.** Comparación del tamaño de grano con el aumento de la temperatura, en las diferentes secciones de cable.

Se aprecia para todos los conductores una mayor velocidad de crecimiento hasta aproximadamente los 975°C, a partir de la cual el tamaño de grano se mantiene prácticamente constante para los unifilares, mientras que los multifilares experimentan un ligero aumento en el tramo (1000-1050°C).

Para ambos tipos de conductores se tiene mayor tamaño de grano al aumentar la sección del mismo, debido a la menor velocidad de enfriamiento que justifica el mayor engrosamiento de grano. Estas diferencias de velocidad de crecimiento, debidos a la diferencia de espesor de los conductores, justificarían un mayor tamaño de grano para los conductores unifilares. Sin embargo para todas las temperaturas se tiene un mayor tamaño de grano en los conductores multifilares lo que podría deberse a una mayor cinética de crecimiento de grano debido a un estado de mayor deformación inicial.

Si se relaciona el tamaño de grano con la temperatura de tratamiento, asumiendo que el crecimiento de grano sigue una relación del tipo Arrhenius:

$$\text{Ecuación 7. } D = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}$$

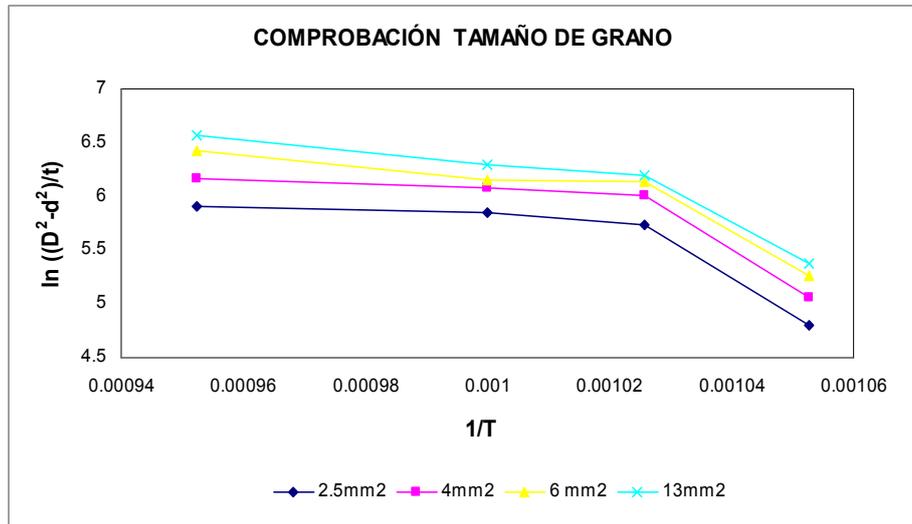
Donde D es el tamaño de grano a temperatura de tratamiento y  $D_0$  es el tamaño de grano inicial, t es el tiempo de tratamiento en nuestro caso es constante (45min) y K es una constante igual  $k=k_0 \cdot \exp(-Q/RT)$ .

Si tomamos logaritmos neperianos a ambos términos se tiene:

$$\text{Ecuación 8. } \ln\left(\frac{D^2 - D_0^2}{t}\right) = \ln k_0 - \frac{Q}{RT}$$

Representando  $\ln\left(\frac{D^2 - D_0^2}{t}\right)$  frente a  $1/T$  para todos los conductores se tiene

dos pendientes diferentes en función de la temperatura, con un primer tramo de mayor energía de activación hasta los 975°C, tal y como se muestra en la Gráfica 16



**Gráfica 16.** Comprobación del tamaño de grano.

Si analizamos el primer tramo de bajas temperaturas que cada tipo de conductores presentan la misma pendiente independientemente del espesor. Los conductores multifilares presentan una menor pendiente, lo que representa menor energía de activación

del proceso de crecimiento de grano. Esto corrobora la hipótesis planteada de un mayor estado de deformación, mayor densidad de dislocaciones.

### 6.3. Microdureza.

Se han realizado ensayos de microdureza en muestras de cobre sometidas a los diferentes tratamientos térmicos.

En primer lugar se hicieron mediciones de microdureza en probetas de cobre nuevo (cobre estándar-1) para tenerlas como referencia. Las medidas se realizaron a lo largo de las probetas donde el cobre está dispuesto de forma longitudinal como se puede ver en el dibujo y la figura siguientes.

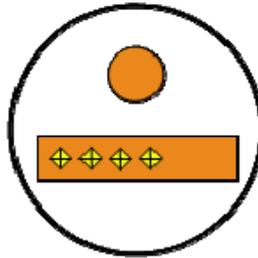


Fig 62. Esquema de la distribución de las indentaciones sobre las muestras.

Las penetraciones se hicieron a unas cinco diagonales entre ellas para que las medidas no interfirieran entre sí. Se evitó penetrar cerca de los bordes del metal.

Se realizaron con una fuerza de 100 gramos.

El tiempo se fijó en todas las pruebas en 15 segundos.

En cada indentación se miden las dos diagonales y se saca la media lo que constituirá una medida.

En cada probeta se midieron unas 5 penetraciones para cada fuerza (100 gr).

Para cada penetración se obtiene los Vickers a partir de la media de las dos diagonales mediante la ecuación siguiente:

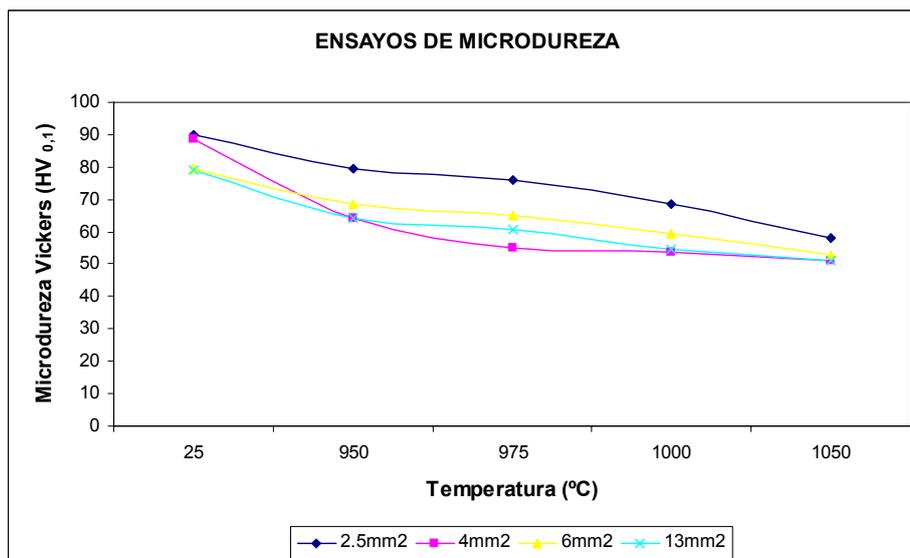
$$\text{Ecuación 9. } HV = \frac{1.854 \cdot 1000 \cdot P}{d^2}$$

Donde **P** es la carga a la que se programa el microdurómetro y **d** es la media de las dos diagonales de la marca realizada por la punta Vickers dadas en micras. Con las cinco microdurezas de cada probeta se obtiene la media aritmética y ese valor se toma como la dureza del material. Los resultados obtenidos los exponemos en la tabla siguiente:

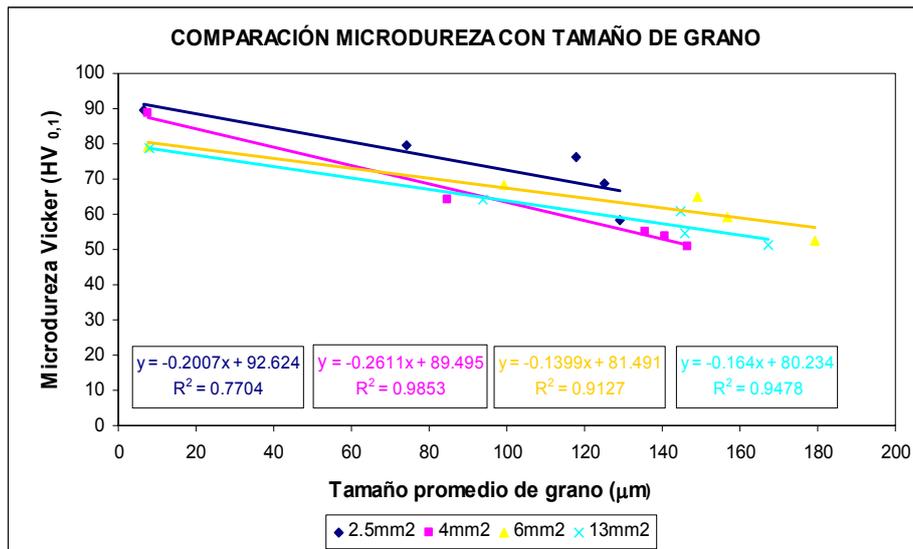
Temperatura °C	2.5 mm <sup>2</sup>	4 mm <sup>2</sup>	6 mm <sup>2</sup>	13 mm <sup>2</sup>
25°C	89,75 HV	88,807HV	79,334HV	78,889HV
950°C	79,585HV	64,156HV	68,443HV	64,205HV
975°C	76,063HV	55,163HV	65,01HV	60,73HV
1000°C	68,544HV	53,824HV	59,213HV	54,468HV
1050°C	58,211HV	50,989HV	52,666HV	51,113HV

**Tabla 7.** Variación de la dureza del con el aumento de la temperatura en las diferentes secciones.

Mediante los siguientes datos se realiza una grafica donde se pueda seguir la evolución de la dureza en función de la temperatura a la que ha estado sometido el conductor.



**Gráfica 17.** Comparación del cambio de dureza con el aumento de la temperatura, en las diferentes secciones de cable



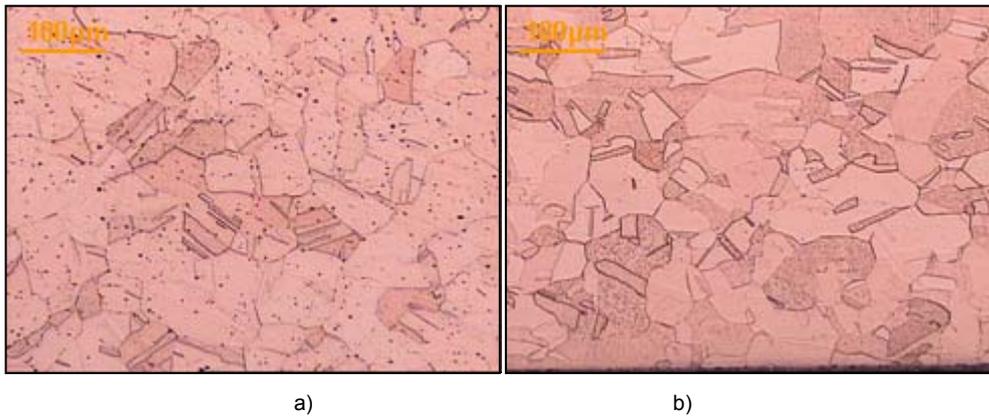
**Gráfica 18.** Comparación de la microdureza con el tamaño promedio de grano.

Como se puede apreciar en la grafica hay un descenso significativo en las microdureza de los conductores, a medida que aumentamos la temperatura se produce un descenso en las propiedades mecánicas del material, esto es debido a que como antes hemos explicado, hay un aumento del tamaño de grano inicial, a medida que el tamaño de grano aumenta las propiedades mecánicas del material disminuyen, como podemos apreciar en la Gráfica 18.

#### 6.4. Observación de las diferentes microestructuras.

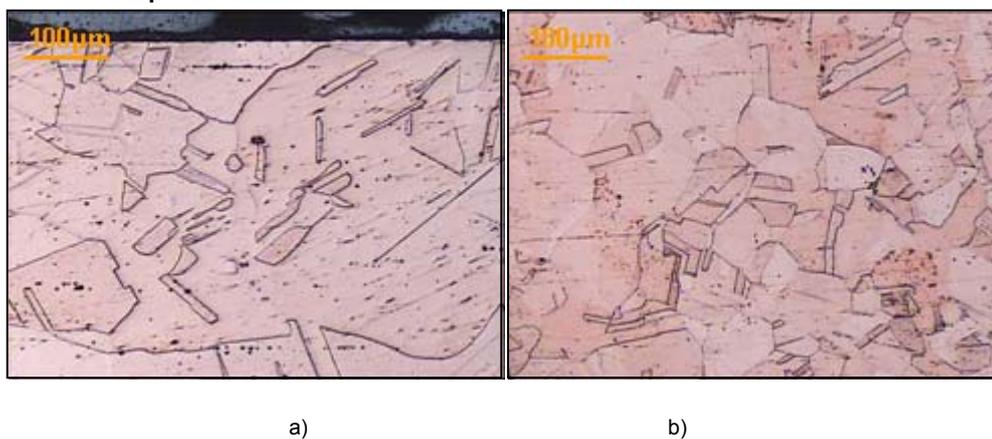
A continuación expondremos los microestructuras de los conductores de diferentes secciones expuestos a las diferentes temperaturas:

**Temperatura de 950°C:**



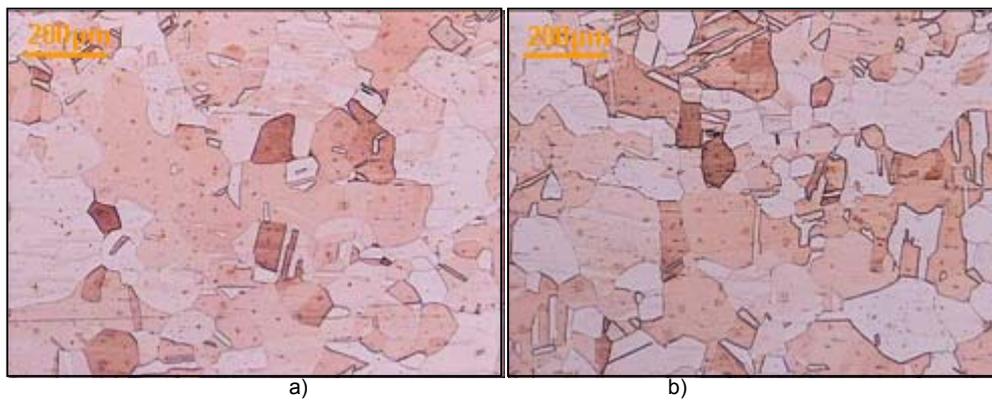
**Fig 63.** Microestructuras de los conductores a) 2,5mm<sup>2</sup> y b) 4 mm<sup>2</sup>, con el tratamiento térmico de 950°C y mantenimiento en el horno 45 min x 100.

**Temperatura 975°C:**



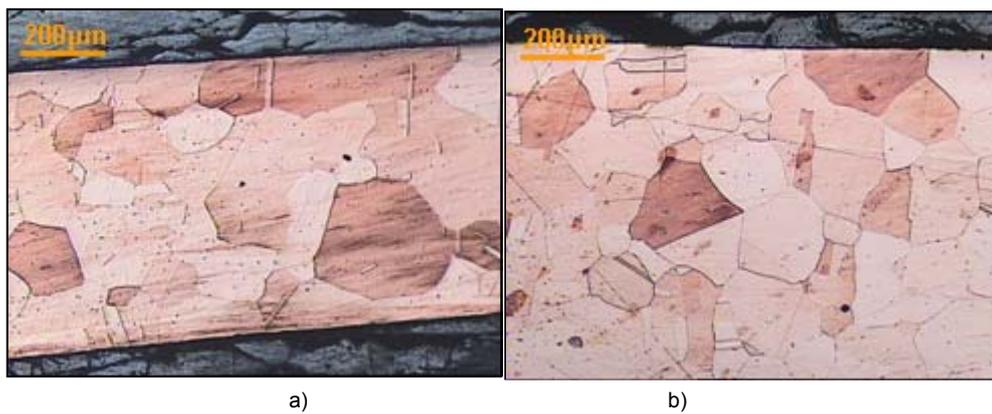
**Fig 64.** Microestructuras de los conductores a) 2,5mm<sup>2</sup> y b) 4 mm<sup>2</sup>, con el tratamiento térmico de 975°C y mantenimiento en el horno 45 min x 100.

**Temperatura 1000°C**



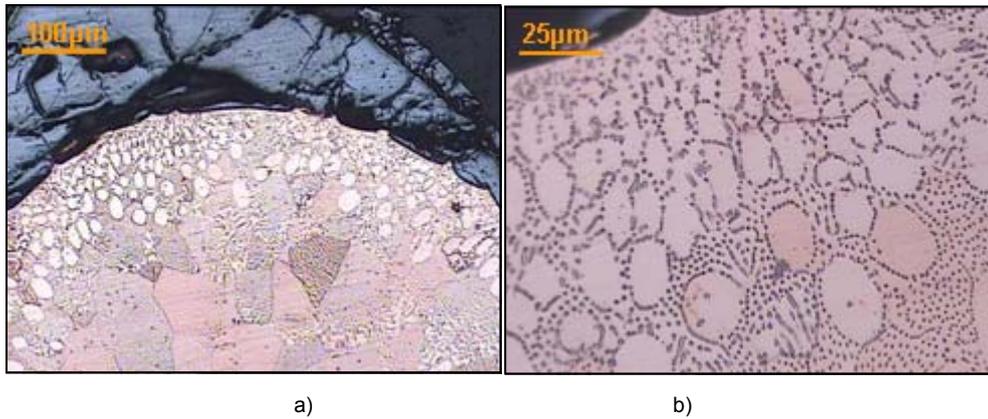
**Fig 65.** Microestructuras de los conductores a) 2,5mm<sup>2</sup> y b) 4 mm<sup>2</sup>, con el tratamiento térmico de 1000°C y mantenimiento en el horno 45 min x 100. Detalle del engrosamiento de grano y maclas.

**Temperatura. 1050°C**



**Fig 66.** Microestructuras de los conductores a) 2,5mm<sup>2</sup> y b) 4 mm<sup>2</sup>, con el tratamiento térmico de 1050°C y mantenimiento en el horno 45 min x 100. Detalle de engrosamiento de grano.

Temperatura 1083°C:



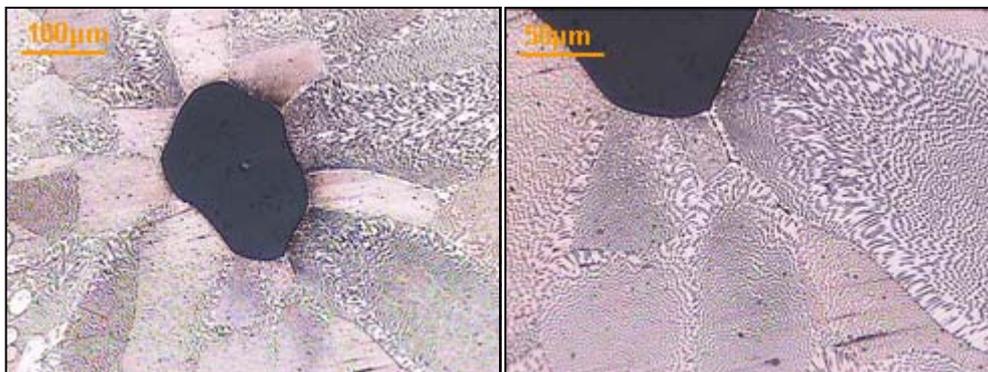
**Fig 67.** Microestructuras del conductor 2,5mm<sup>2</sup>, con el tratamiento térmico de 1083°C y mantenimiento en el horno 45 min x 100 y 400 . Detalle de la abundante formación de eutéctico en el borde de los hilos de los conductores



**Fig 68.** Montaje de toda la sección del conductor de sección 2,5 mm<sup>2</sup> a temperatura 1083°C y 45 min en el horno x 100. Montaje de la abundante formación de eutéctico en el bordes y la sodificación de los conductores



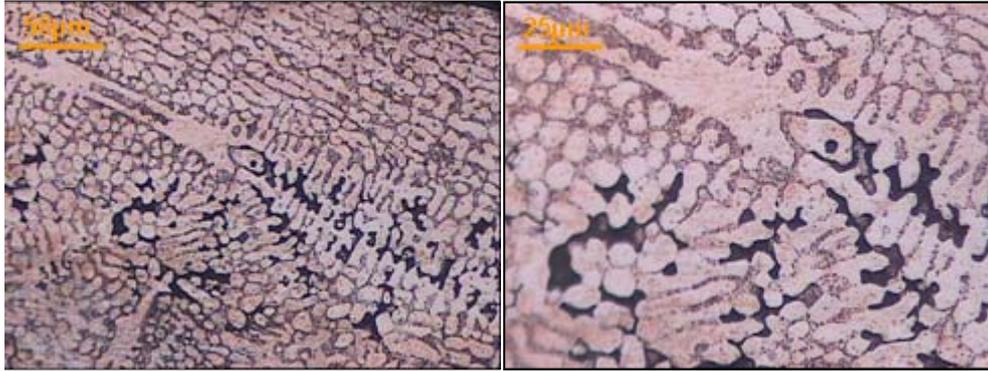
**Fig 69.** Montaje de toda la sección del conductor de sección 4 mm<sup>2</sup> a temperatura 1083°C y 45 min en el horno x 50. Montaje de la abundante formación de eutéctico en el bordes y la sodificación de los conductores



a)

b)

**Fig 70.** Microestructuras del conductor 2,5mm<sup>2</sup>, con el tratamiento térmico de 1083°C y mantenimiento en el horno 45 min a) x 100 y b) 200 Ctrans .Detalle del engrosamiento de grano y de la abundante formación de eutéctico.



a)

b)

**Fig 71.** Microestructuras del conductor 13mm<sup>2</sup> multisección, con el tratamiento térmico de 1083°C y mantenimiento en el horno 45 min x 200 y 400 C long. Detalle de la sodificación de los conductores, con crecimiento dendrítica perpendicular a la isoterma de enfriamiento

Todas estas microestructuras nos servirán para describir y evaluar los cambios microestructurales observados en el caso de incendios reales donde aparecen, en muchos de los casos, microestructuras derivadas de la exposición a diferentes condiciones ambientales que pueden llegar a presentar cambios muy significativos que pudieran explicarse con las micrografías obtenidas en el laboratorio. Por eso, se analizará, a continuación, algunos casos reales que nos confirmen lo obtenido en el laboratorio y nos sirvan de comprobación experimental de los modelos obtenidos.

### **6.5. Casos de incendios reales.**

En este apartado analizaremos algunos casos de incendios reales de los estudiados en el Instituto de Tecnología de Materiales, usando, como identificación de los mismos, los códigos utilizados en su día. Debido a la reserva o confidencialidad necesaria, pues algunos de ellos están sujetos a posibles comparecencias judiciales, en algunos no se podrá describir con mucho detalle el lugar de procedencia u otras referencias al suceso.

### 6.5.1. Caso 1 incendio con código ITM 0620.

Se trata de un incendio con fecha de abril de 2006, tal como queda reflejado en la figura, el vehículo se ha visto afectado hasta perder completamente los elementos combustibles que han podido afectar enormemente a la integridad microestructural de los materiales lo que puede dificultar enormemente su tratamiento posterior y su estudio.

La 0 se muestra el aspecto del vehículo Nissan Terrano 4x4 muy afectado por su lateral derecho.



Fig 72. Aspecto del vehículo Nissan Terrano 4x4.

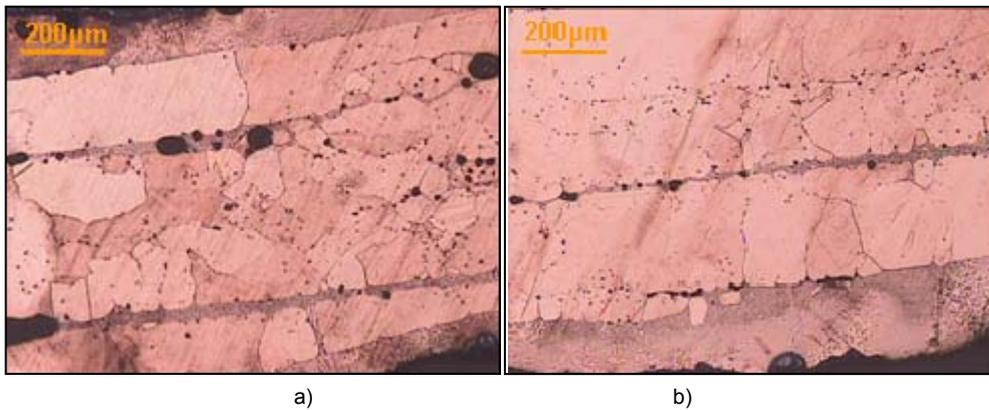
En el ITM 0620 se intentó determinar la temperatura alcanzada por los diferentes materiales y establecer si fuera posible la cinética o velocidad de incremento de la temperatura en los materiales. Para ello se realizarán unos cortes transversales de las muestras suministradas con el objeto de realizar el correspondiente análisis metalográfico, en nuestro caso nos centraremos solo en las muestras de cobre.

Y esa muestra es la 4. Cableado eléctrico tomado del portón trasero, maletero, del vehículo Nissan 4x4 Terrano.

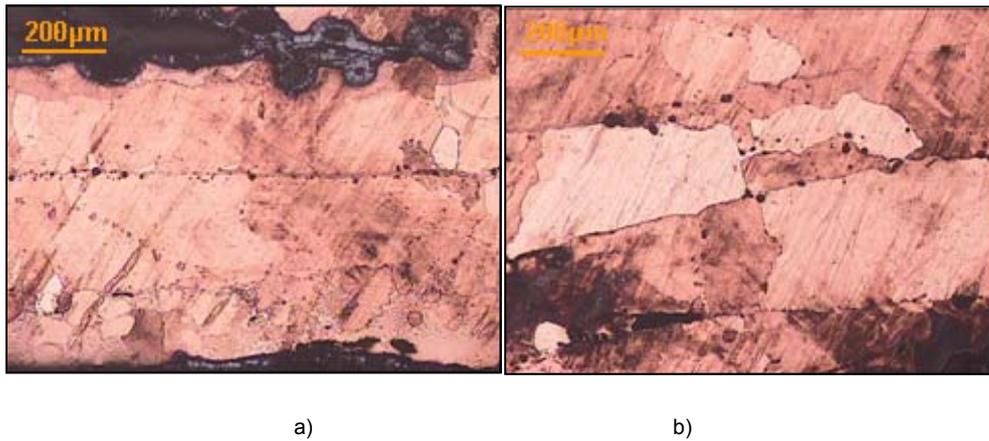
Para la preparación de las muestras me remito al punto 5.3 *Metodología y manipulación de muestras*, así como el punto 5.4 *Caracterización microestructural* donde se explica como se preparan las probetas metalográficas.



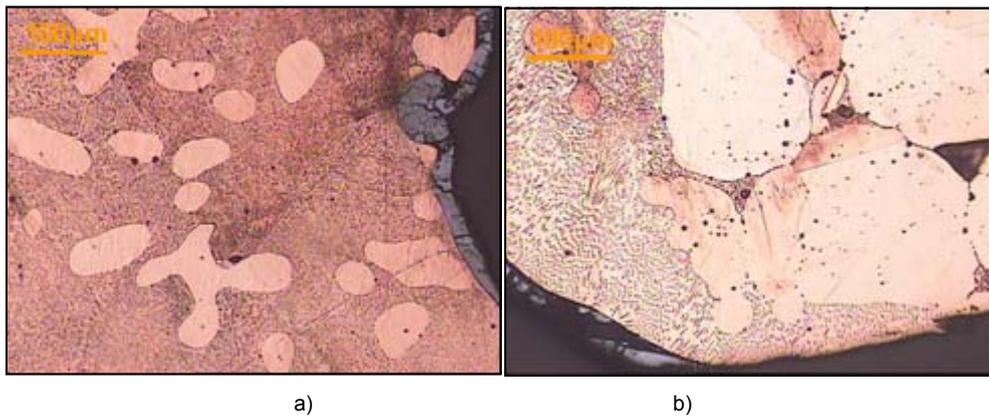
**Fig 73.** Detalle del extremo de la muestra 4 en el que aparece una perla de fusión con posterior solidificación.



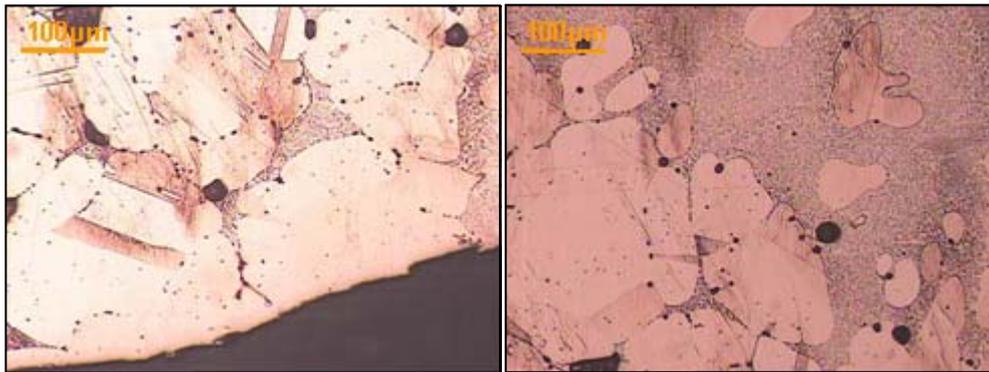
**Fig 74.** Muestra 4, corte longitudinal, a) microestructura general de la zona con fusión parcial del material por formación de eutéctico. X50. b) Detalle de la formación de eutéctico en los hilos más externos con formación de eutéctico entre hilos X50.



**Fig 75.** . Muestra 4, corte longitudinal .a) Detalle de la fusión rápida casi completa en la superficie de los hilos de cobre. X50. b) microestructura con fuerte aumento del tamaño de grano en los hilos X50.



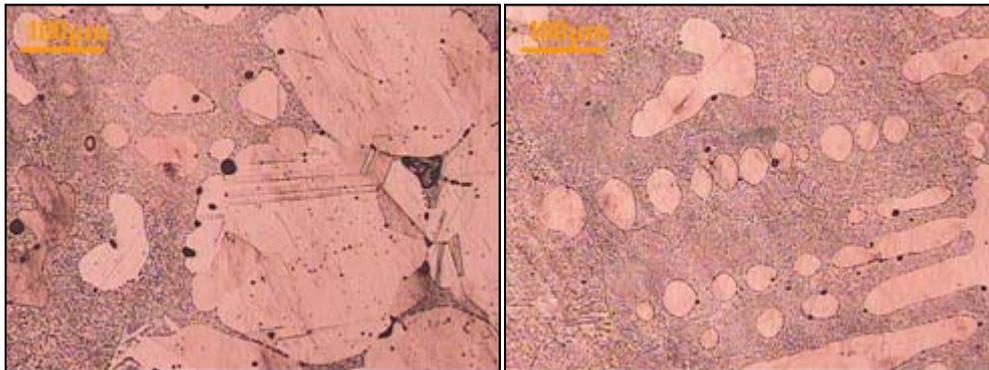
**Fig 76.** Muestra 4, corte transversal .a) Detalle de formación del eutéctico, con formación de oxidación en la superficie. X100. b) Detalle de la fusión de los hilos e infiltración del eutéctico en el espacio entre hilos X100.



a)

b)

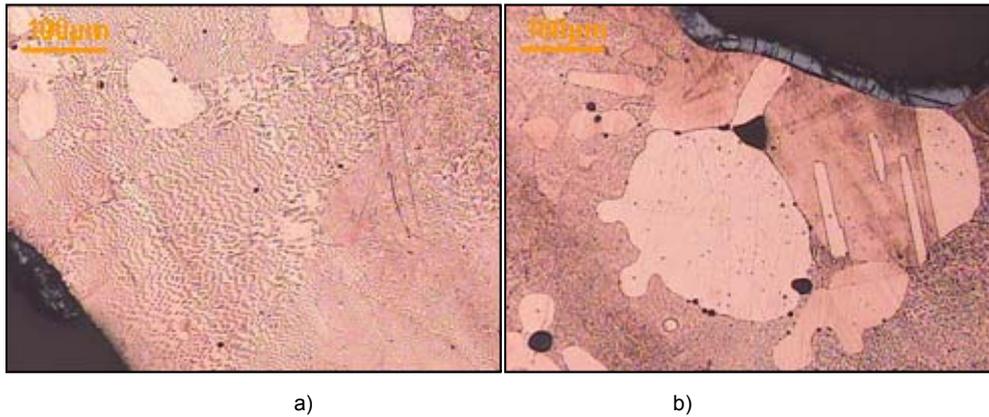
**Fig 77.** Muestra 4, corte transversal. a) Detalle de la unión entre los hilos conductores con la formación de los poros redondeados. X100. b) Detalle de la abundante formación de eutéctico en los conductores X100.



a)

b)

**Fig 78.** Muestra 4, corte transversal. a) Detalle de la fusión y unión entre los hilos X100. b) Detalle de la abundante formación de eutéctico en el centro de los conductores X100.



**Fig 79.** Muestra 4, corte transversal. a) microestructura de solidificación de composición casi eutéctica en la superficie X100. b) Detalle de la formación de algunas maclas residuales tras la solidificación del material fundido X100.

#### 6.5.1.1. Análisis de las imágenes

La muestra 4, en la Fig 73, correspondiente a un cable eléctrico tomado del portón trasero del vehículo Nissan 4x4 Terrano, muestra una superficie con fuerte deterioro en los hilos con fuerte reducción de los óxidos superficiales que provoca la importante pérdida de material como la que puede apreciarse en dicha figura.

Las condiciones necesarias que provocan un aspecto de este tipo pueden dividirse en dos etapas: la primera de ellas requiere de elevadas temperaturas y atmósferas fuertemente oxidantes, capaces en este caso incluso de fundir superficialmente la superficie de los hilos conductores de cobre que observen gran cantidad de gases y se produce la fuerte oxidación del material con formación especialmente de su eutéctico, estas formaciones laminares o punteadas que aparecen en las microestructuras y principalmente son notables en las Fig 76 a) ,Fig 78b) y Fig 79 a) La segunda condición, y siempre con posterioridad a esta primera indicada, requiere de atmósferas reductoras que provocarán la reducción de los óxidos previamente formados, al menos a nivel superficial. Esta segunda condición se produce cuando el material se encuentra en el interior de la llama.

Si se analiza las condiciones del vehículo, en la 0, se observará que el interior del mismo, con abundante material combustible en su interior, asientos, moquetas de

revestimiento y maletero y materiales plásticos diversos pueden ocasionar con su combustión las condiciones reductoras necesarias para actuar con posterioridad a los efectos ocasionados por el frente de llama y la rápida oxidación superficial provocada por el aumento de la temperatura.

Sin embargo, el análisis de la microestructura de los hilos de cobre de la muestra 4, tanto en su corte y preparación longitudinal, en las Fig 74 y Fig 75, como en los cortes transversales observados, en las Fig 76 a Fig 79, nos indica una fuerte formación de eutéctico cobre-oxígeno, con punto de fusión de 1064°C, tanto en la superficie de los hilos, véase la parte inferior de la Fig 74 b), como en los espacios entre hilos, por infiltración del material fundido, véase en la Fig 74 a).

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, tal como puede observarse en las Fig 77 b) y Fig 78 a). El corte transversal, en casi todas sus imágenes, desde la Fig 76 a Fig 79, presenta una microestructura de fuerte sinterización entre los hilos con una importante formación de fase líquida que proporciona con su posterior solidificación aspectos en los granos como los de la Fig 79 b), y una más que notable formación de cuellos de unión ya que los espacios interhilos aparecen en las imágenes como si de verdaderos poros se tratara, véase para mayor claridad las Fig 77 a) Fig 78 a) y Fig 79 b), por lo que puede apuntarse como temperatura alcanzada la que se encontraría entre la transformación eutéctica, 1064°C y la de formación de líquido para las aleaciones hipoeutéctica Cu-O, alrededor de los 1075°C.

Sin embargo y tal como se ha apuntado anteriormente el tiempo de permanencia a estas temperaturas ha sido escaso pues de otro modo las reacciones hubieran alcanzado la totalidad de la sección de los hilos y éstos todavía permanecen diferenciados tal como se aprecia en el corte longitudinal observado

#### **6.5.1.2. Conclusión**

En conclusión, se encuentra efectos térmicos muy variables en las diferentes muestras analizadas. A la vista de las mismas todo parece indicar que el mayor efecto térmico lo sufrió el Nissan Terrano, pero esto puede resultar engañoso si no se considera

que finalmente se han analizado un pequeño número de muestras y no se ha dibujado un mapa térmico del estado de cada uno de los vehículos.

Lo que si es notable es que en ambos casos se encuentra un fuerte efecto térmico en la parte inferior del vehículo siendo este efecto mucho menor en la parte superior de los mismos, a pesar de que aparece una fuerte combinación de efectos por la combustión de los elementos decorativos de los vehículos que afectan a su vez las condiciones finales de exposición de los materiales.

De todas formas se ha podido determinar en algunos casos temperaturas, o los 1070°C en el cable de cobre analizado, pero en todo caso siempre se ha constatado que el tiempo de exposición a cualquiera de las temperaturas ha sido escaso, salvo quizás la muestra de cobre en la que el tiempo ha podido ser sensiblemente mayor y además con modificaciones sustanciales en la atmósfera de exposición.

#### 6.5.2. Caso 2 incendio ITM 0708

Se trata de un incendio de una locomotora de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya ocurrido en febrero de 2007.



**Fig 80.** a) Zonas de donde se han tomado las muestras, b) Detalle de algunas de las muestras indicando donde se realizó la preparación metalográfica y la MEB.

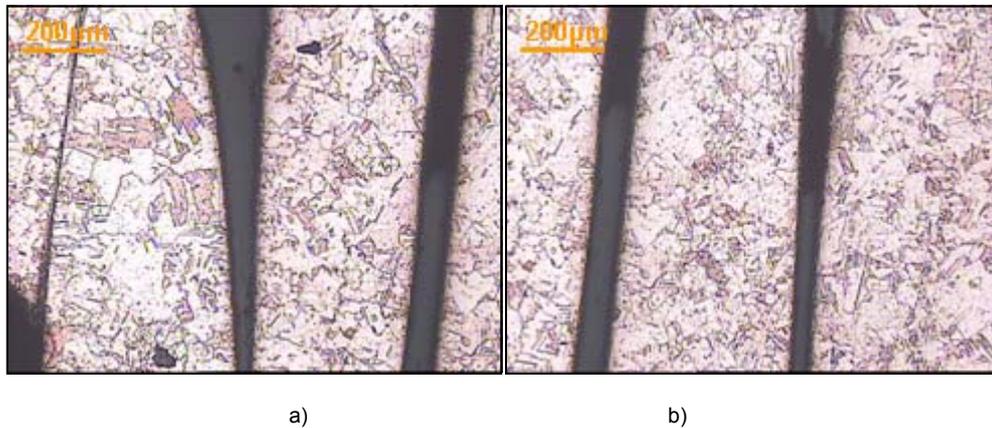
Se trajeron cuatro trozos de cable eléctrico con fuerte deterioro en su extremo, tal como puede apreciarse en la Fig 80 a), nos centraremos en la muestra P1, ya que se

realizaron más preparaciones metalográficas e incluso había mas muestras como se puede apreciar en la imagen anterior.

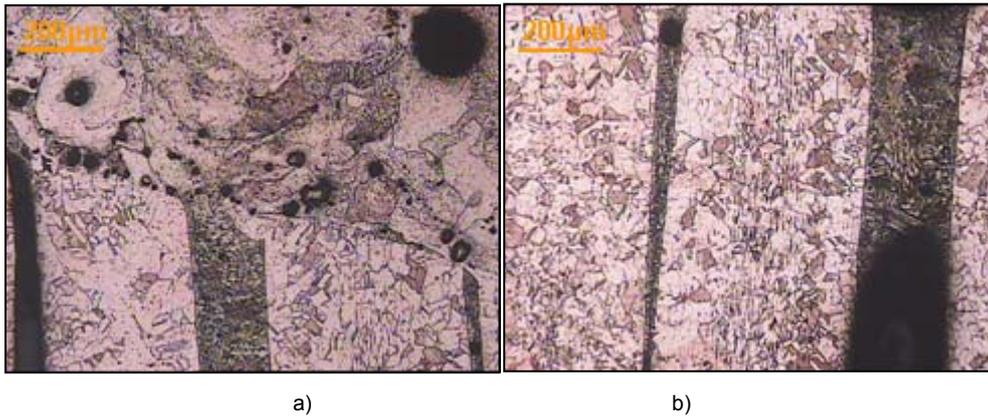
Los cables se han marcado como P1, P2, tal como se marcan en la Fig 80.

El objetivo del informe es realizar un análisis metalográfico de los extremos deteriorados de los cables para observar si el material ha sufrido cortocircuito, o calentamiento interno al apreciar las diferencias microestructurales presentadas por las muestras. A petición expresa de los solicitantes de los ensayos, se analizará las muestras marcadas como P1 y P3 al ser muy semejantes a las otras dos, pero como ya he indicado solo nos centraremos en la muestra P1.

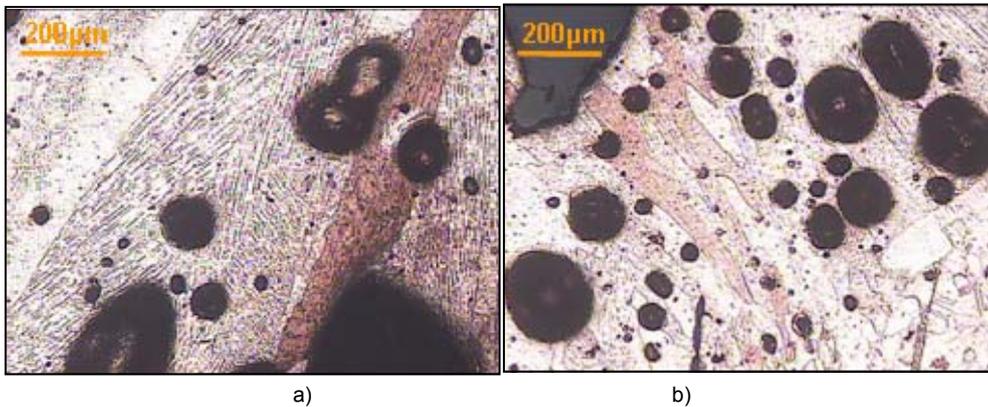
Para la preparación de las muestras me remito al punto 5.3 *Metodología y manipulación de muestras*, así como el punto 5.4 *Caracterización microestructural* donde se explica como se preparan las probetas metalográficas.



**Fig 81.** a) Microestructura del corte longitudinal P1, detalle de la recristalización, x50. b) Microestructura del corte longitudinal P1, detalle de hilos en otra zona, x50.

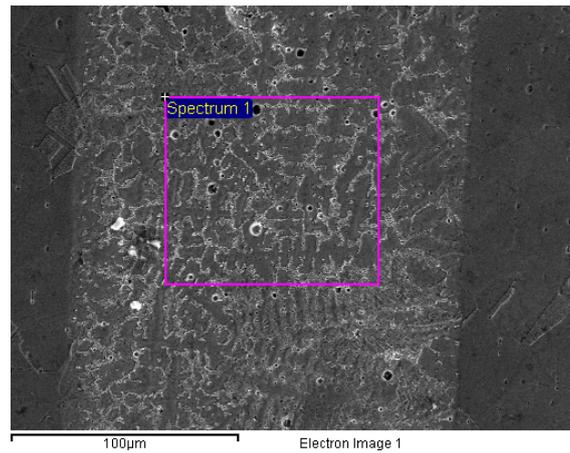


**Fig 82.** a). Microestructura en el corte longitudinal P1, detalle zona fundida, x50. Figura 16. b) Microestructura en el corte longitudinal P1, detalle hilos con fusión, x50.

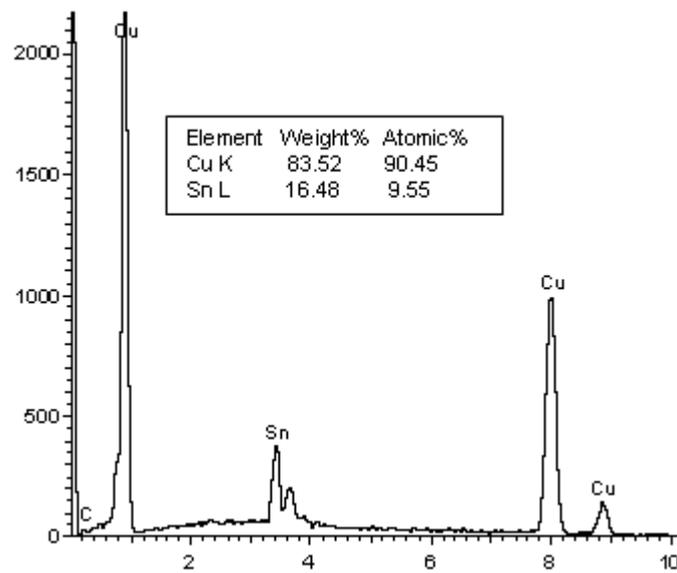


**Fig 83.** a). Microestructura en el corte longitudinal P1, detalle formación de granos por solidificación en zona fundida, x50. b). Microestructura en el corte longitudinal P1, detalle hilos con fusión y gran cantidad de poros, x50

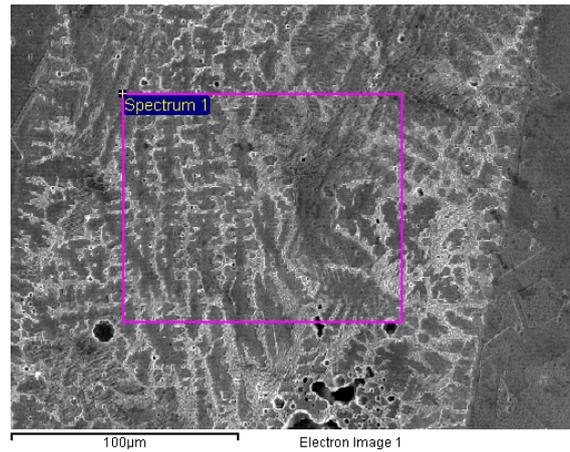
Puesto que es necesario obtener análisis puntuales en alguna de las muestras, las preparaciones metalográficas se metalizaran con una fina película de oro para poder observarlas en un microscopio electrónico de barrido JSM 6300 de JEOL, equipado con un equipo de microanálisis por energías dispersivas de rayos X de Oxford Instruments Ltd.



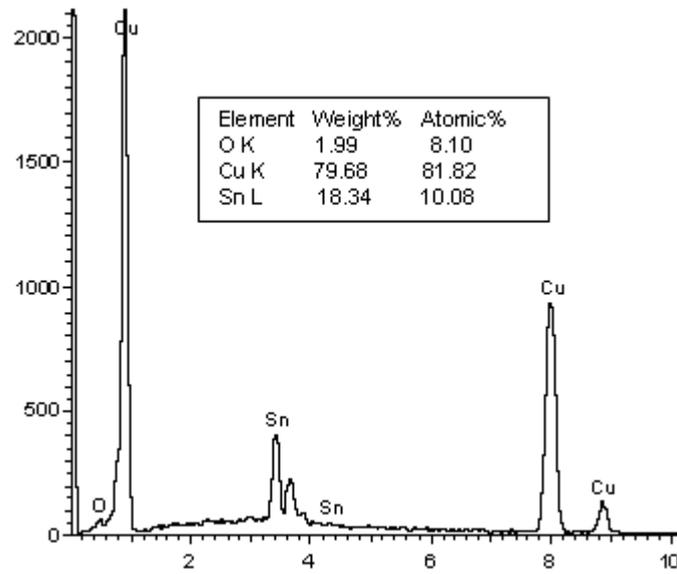
**Fig 84.** . Imagen de electrones secundarios de la zona fundida entre hilos del corte longitudinal P1, con el espectro de análisis por energías dispersivas de rayos X obtenido en la zona marcada en la imagen, x500.



**Gráfica 19.** Espectro de análisis por energías dispersivas de rayos X obtenido en la zona marcada en la imagen anterior..



**Fig 85.** Imagen de electrones secundarios de la zona fundida entre hilos del corte longitudinal P1 zona de fusión entre los hilos del corte longitudinal P1, x500.



**Gráfica 20.** Espectro analítico por energías dispersivas de rayos X obtenido en la zona marcada en la imagen anterior

### 6.5.2.1. Análisis de las imágenes.

En las muestras atacadas en la microestructura, los hilos presentan fenómenos de recristalización, patentes en las figuras donde se observan éstos, en la Fig 81 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, si que por ello variarían significativamente sus propiedades de resistividad eléctrica.

La zona fundida presenta, por su parte, una estructura de granos dendríticos y orientados en el sentido del enfriamiento muy importante, tal como se aprecia en la Fig 83. La importante porosidad se acumula alrededor de las dendritas de solidificación, véase la Fig 83 a), 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.

En la zona más próxima a los hilos conductores, véase la Fig 82 a), 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. Al desconocer cual es la composición de estos materiales que quedan alrededor de los hilos en su parte final se realizan, mediante microscopía electrónica de barrido, los correspondientes análisis por energías dispersivas de rayos X, Fig 84 y Fig 85, que resultan con una composición de cobre y estaño con un contenido entre el 16 y 18 de estaño, con muy pequeñas cantidades de oxígeno. Este material, muy probablemente procedente de la fusión de alguna pieza de bronce o de soldadura blanda base estaño, debería incluir dependiendo de su composición inicial pequeñas cantidades de plomo u otros elementos utilizados mayoritariamente en las aleaciones descritas pero que no se han detectado en los análisis. Tal como se aprecia en las imágenes de electrones secundarios de las Fig 84 y Fig 85, se aprecia una importante porosidad y la formación de una estructura de solidificación dendrítica típica de estas aleaciones, cuyo punto de fusión disminuye significativamente con respecto al cobre, tal como se aprecia en el gráfico 1 donde se representa su diagrama de equilibrio de fases.

Por todo ello se considera que la microestructura observada es resultado de un ligero calentamiento de los cables durante largo tiempo que ha provocado la recristalización e inicio del aumento del tamaño de sus granos, junto a la microestructura formada por la rápida fusión y posterior solidificación del material procedente de los hilos conductores y de aleaciones con estaño procedentes de accesorios o material de aporte de soldadura blanda. Esta fusión ha tenido lugar previamente a la posible aparición de fuego, elevación de la temperatura en su entorno y desprendimiento de gases de combustión de los materiales combustibles de los alrededores.

#### **6.5.2.2. Conclusión**

En conclusión se aprecia zonas de fusión en todos los cables suministrados pero de naturales diferente. El cable P1 presenta fenómenos de recristalización en los hilos conductores con un importante efecto de crecimiento de grano bastante uniforme a lo largo de toda la microestructura analizada y que responde a un calentamiento uniforme y repetitivo que los cables conductores pudieran tener en el tiempo de servicio.

La zona fundida, en estas muestras, presenta una estructura de grandes granos dendríticos y orientados en el sentido del enfriamiento muy importante, así como una elevada porosidad acumulada alrededor de las dendritas de solidificación. En ningún caso 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 con una atmósfera no contaminada por gases de combustión. Todo esto parece indicar que la fusión del material ha tenido lugar por un cortocircuito que ha provocado el aumento de su temperatura y provocado al tiempo su solidificación dejando atrapados en su microestructura los gases formados durante la solidificación del fundido.

#### **6.5.3. Caso 3 incendio ITM 0725.**

A este incendio hicimos referencia en el apartado *5.5 Metodología del análisis de incendios reales.*, en este apartado analizaremos las diferentes microestructuras.

Se trata de unas muestras de un incendio real procedentes de una empresa Barcelona, se nos envió unos trozos de cable eléctrico con fuerte deterioro general, tras el incendio sucedido en abril de 2007

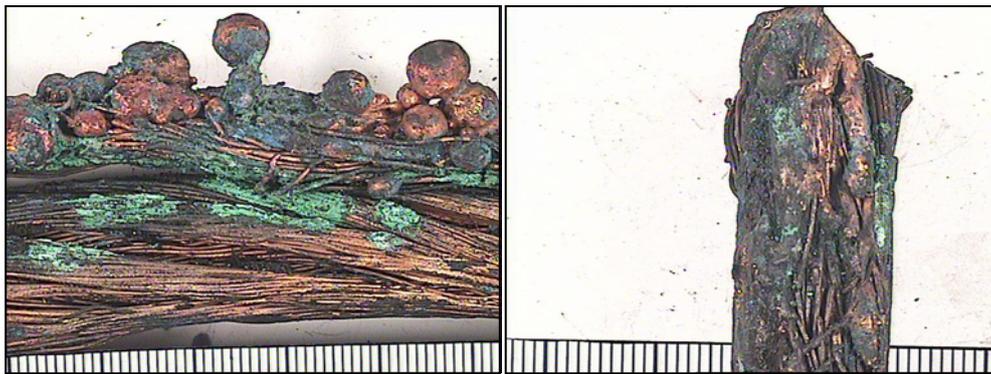
Las muestras procedían de un cuadro eléctrico general que alimentaba y otros cuadros secundarios, a su paso por la zona de almacenamiento de “Monopigmentats”. Los cables eran conducidos por una canalización opaca, cuya superficie se presenta en la fotografía Fig 49 del apartado 5.5 Metodología del análisis de incendios reales.

Se han tomado muestras de cuatro cables diferentes marcados como 2 A y B, 3 B, 4 A y B y 5 A y B, junto a un trozo en el que funden los cables 2 y 3, en lo que se ha marcado como muestra 1 (2-3), nosotros nos centraremos en esta muestra.

Para la preparación de las muestras me remito al punto 5.3 *Metodología y manipulación de muestras*, así como el punto 5.4 *Caracterización microestructural* donde se explica como se preparan las probetas metalográficas.



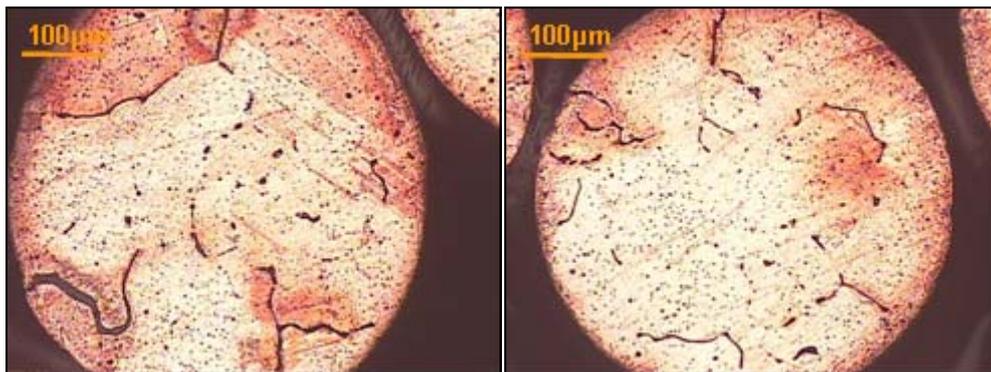
**Fig 86.** Aspecto general pieza 1(2-3).



a)

b)

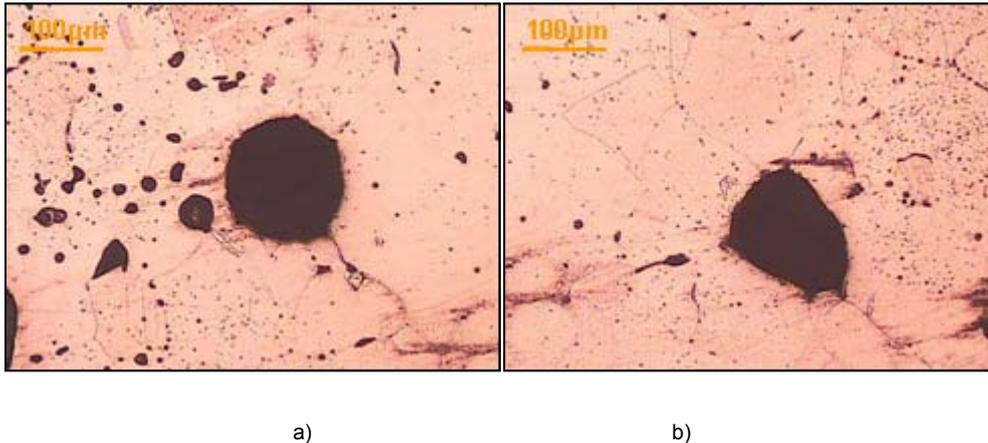
**Fig 87.** a) Detalle pieza 1(2-3) microesferas de fusión y solidificación en la superficie. b) Detalle del extremo de la pieza 1(2-3) con fusión casi completa.



a)

b)

**Fig 88.** a) Microestructura de los hilos en la muestra 1(2-3), x 100. b) Microestructura con fragilización en borde de grano de los hilos en la muestra 1(2-3), x 100.



**Fig 89.** a) Microestructura de la unión entre hilos en la muestra 1(2-3) atacada x 100 b).  
Detalle de los poros entre hilos después de su unión, muestra 1(2-3) x 100.

#### 6.5.3.1. Análisis de imágenes.

La muestra 1(2,3), fusión entre los cables 2 y 3, se representa en la Fig 86. Su extremo se encuentra completamente fundido, tal como muestra en la Fig 87, y aparecen diferentes zonas de fusión, a lo largo de la superficie de los cables, con salpicaduras de metal fundido y posteriormente solidificado, tal como se aprecia en la Fig 87. Además se aprecia la presencia de residuos de color verde provocados por la combustión del elemento aislante con liberación de cloro, véase la Fig 87.

La parte con los hilos no fundidos, en la Fig 88, presenta una microestructura de granos muy groseros provocada por temperaturas muy elevadas de recocido. Además se aprecia en los hilos presentados en las dos figuras una fuerte fragilización en borde de grano provocada, principalmente, por una fuerte oxidación a través del borde de grano 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.

Las partes fundidas de la muestra presentan una importante incorporación de partículas de óxidos en el interior del material fundido quedando, no obstante, los poros correspondientes al espacio entre los hilos conductores que pese a su fusión todavía

permite observar su posición original, véase la Fig 89. Sin embargo, debe señalarse que no aparece la inclusión de gases en grandes cantidades que provocaría la formación de gran cantidad de poros. Tampoco se aprecia la formación de eutéctico con el oxígeno, por parte del cobre, típico de la fusión y posterior solidificación con llama oxidante.

#### **6.5.3.2. Conclusión.**

La importante formación de cuellos de sinterización que en todo caso precisan temperaturas superiores a los 950°C para su formación y que en muchos de los casos, por la extensión del mismo cuello deben estar muy cerca ya de su punto de fusión, 1083°C

Esta microestructura de las zonas fundidas es indicativa de una solidificación en atmósferas reductoras o al menos exentas de oxidación lo que las llevaría a una situación en todo caso alejada del frente de una llama, o bien en el interior de ésta, situación que difícilmente podría darse como punto o foco del fuego.

Por todo ello, se considera poco probable que las fusiones encontradas respondan a cortocircuitos provocados con anterioridad al fuego sino, por el contrario, las pegaduras encontradas en la superficie de los hilos, y la fusión entre los hilos, junto a su deterioro superficial, hacen pensar que los desprendimientos de partículas se hayan provocado por fusión del material y efectos de exudación y en todo caso si se han provocado cortocircuitos, éstos se producen siempre en el interior de la llama.

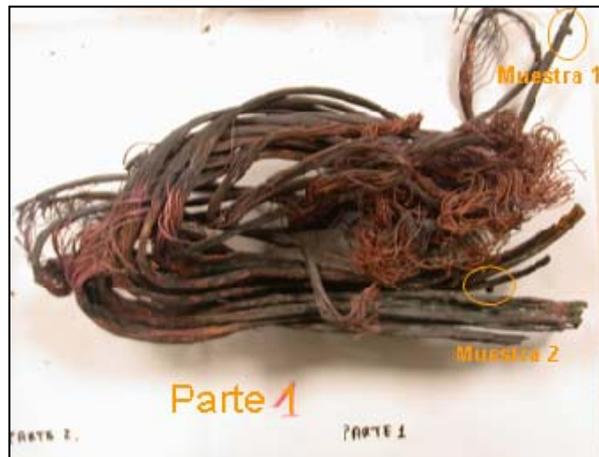
#### **6.5.4. Caso 4 incendio con código ITM 0633.**

Se trata de un incendio ocurrido en julio de 2006 en la Urbanización Sierra Blanca Country Club, en la provincia de Málaga.

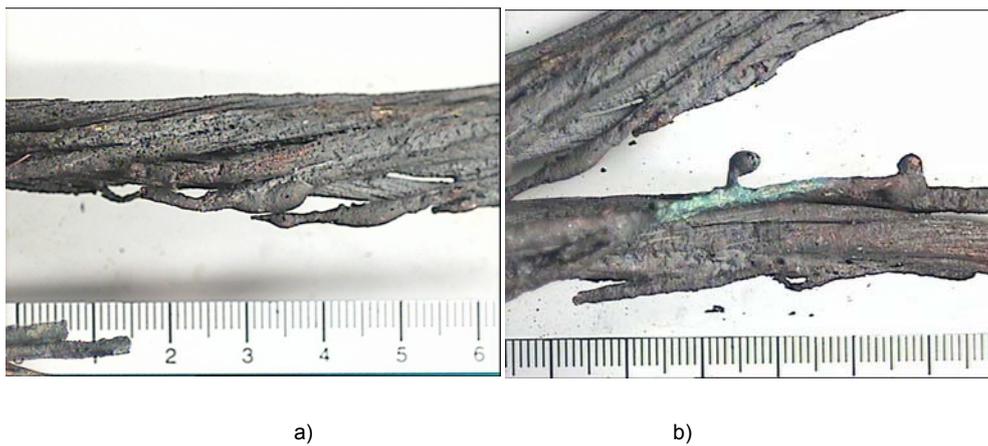
Las muestras corresponden a un cableado eléctrico de cobre (una fase y neutro) de una línea que iba de un cuadro seccionador a un cuadro conmutador de alimentación de un generador eléctrico a gas-oil para dar suministro a una obra y viviendas particulares.

El objetivo del informe es realizar un análisis del estado microestructural de los cables eléctricos para determinar si los puntos de fusión corresponden a cortocircuito o no y si estos, en caso de confirmarse, se han producido antes o después del incendio.

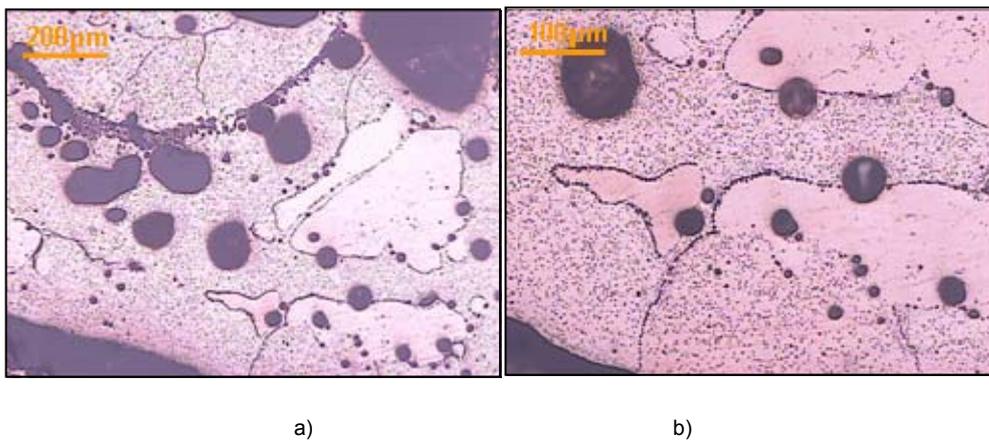
Para la preparación de las muestras me remito al punto 5.3 *Metodología y manipulación de muestras*, así como el punto 5.4 *Caracterización microestructural* donde se explica como se preparan las probetas metalográficas.



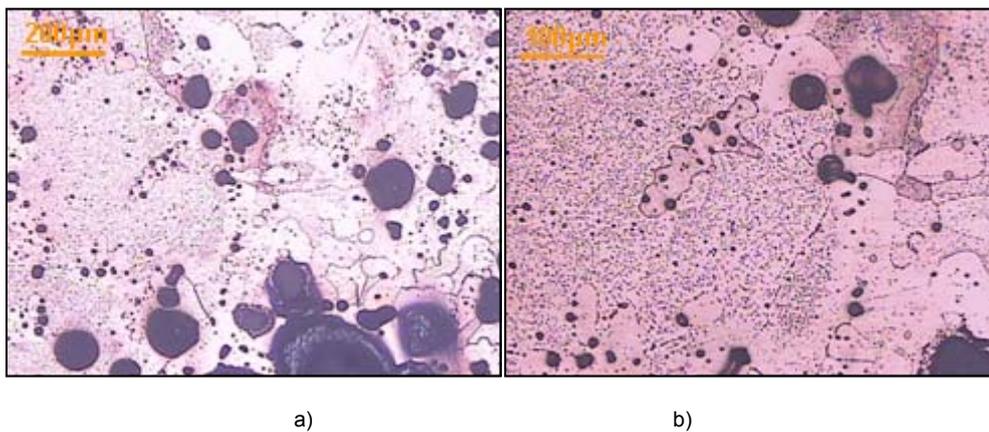
**Fig 90.** Aspecto general del contenido de la bolsa correspondiente a la parte 1.



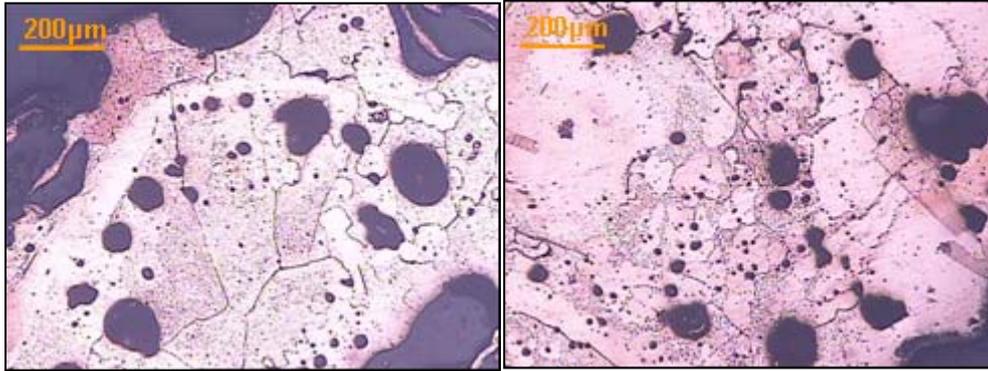
**Fig 91.** a) Aspecto superficial de los hilos con abundante oxidación superficial, parte 1. b). Aspecto general de los hilos correspondientes a la parte 1.



**Fig 92.** a) Micrografía del corte longitudinal de los hilos, muestra 1 parte 1. X50. b) Detalle de la formación de eutéctico en el corte longitudinal hilos, parte 1. X100.



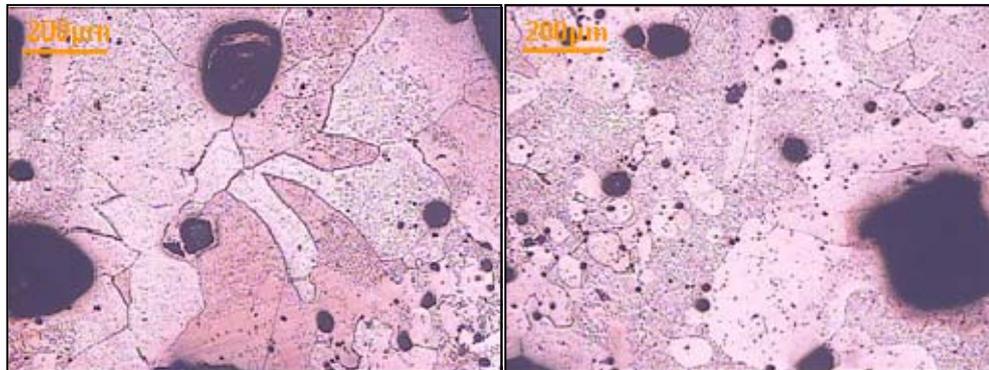
**Fig 93.** a) Detalle de la porosidad en la perla de fusión. Corte longitudinal parte 1, X50. b) Detalle del eutéctico y la formación de dendritas de solidificación, X100.



a)

b)

**Fig 94.** a) Estructura de solidificación en perla de la muestra 2, parte 1. X50. b) Detalle de la porosidad acumulada en la zona fundida, parte 1. X50.



a)

b)

**Fig 95.** a) Detalle de la formación de los granos y borde de grano, muestra 2, parte 1. X50. b) Formación del eutéctico y distribución de poros en muestra 2, parte 1. X50.

#### 6.5.4.1. Análisis de las imágenes.

La muestra 1 de la parte 1 presenta una importante presencia de estructura eutéctica de cobre-oxígeno con gran cantidad de poros, véase las Fig 92a) y Fig 93 a), debido a la cantidad de gases absorbidos cuando el material se encontraba en estado líquido. Esta mayor porosidad, ocasionada por el cambio de solubilidad de los gases al solidificar, presenta también una gran cantidad de microporosidad, como se aprecia en las

figuras de detalle de las Fig 92b) y Fig 93b). Toda la porosidad indica la permanencia en estado fundido durante un cierto tiempo capaz de solubilizar la cantidad de gases que más adelante se liberarán durante la solidificación acumulándose en mayor medida en el frente de avance de la fusión del material, tal como se aprecia perfectamente en la Fig 92b) donde se encuentra un rosario de poros al finalizar la estructura eutéctica y por tanto donde aparece la mayor solubilidad de oxígeno. Los granos son muy grandes como corresponde a situaciones de enfriamiento lento aunque se aprecian también granos muy pequeños cuyo crecimiento se ha visto bloqueado por la formación de los microporos. Con todo es claro que el material se ha fundido alcanzando el estado líquido y ha permitido la transformación eutéctica que tiene lugar a los 1064°C, por lo que la temperatura mínima alcanzada es de este orden. Sin embargo, la microestructura de los hilos no llega a fusión pero presenta un fuerte efecto de oxidación con reducción posterior que provoca una gran fragilización microestructural pero al tiempo impide su fusión. En todo caso las temperaturas, en general, han alcanzado niveles cercanos a los 1000°C alrededor de los puntos donde se presentan las zonas fundidas.

También la muestra marcada 2 de la parte 1 presenta aspectos y transformaciones semejantes a los descritos para la anterior muestra, con formación de importante macroporosidad, véase las Fig 94a) y Fig 95 a) , junto a una no menos importante microporosidad alrededor de los bordes de grano, principalmente, véase las Fig 94b) y Fig 95b). También en esta muestra la formación de eutéctico, desde el estado líquido, es muy extensa y se extiende hacia el interior de los hilos afectados, de manera bastante significativa, por lo que puede asegurarse que se han alcanzado temperaturas de 1000°C y particularmente en las zonas fundidas algo más de los 1064°C necesarios pues la microestructura mostrada corresponde a una microestructura hipoeutéctica que dependiendo del contenido en oxígeno disuelto necesita para su fusión entre los 1064°C mínimos y un máximo de 1083°C.

#### **6.5.4.2. Conclusiones.**

En conclusión, las diferentes muestras aportadas revelan un fuerte deterioro y confirman que se han visto sometidas a una fuerte oxidación inicial para finalmente verse envueltas en una atmósfera reductora que fragiliza su microestructura, y que provoca la reducción del óxido previamente formado y por ello presentan una superficie bastante limpia, dentro de la enorme degradación sufrida.

Las temperaturas en general establecidas están alrededor de los 900-925°C mínimos que provocan los efectos de fragilización observados, junto a zonas en las que el metal fundido reacciona con los gases, fundamentalmente oxígeno, con el que tiene lugar la transformación eutéctica que necesita temperaturas entre los 1064 y los 1083°C. Sin embargo estas fusiones tienen lugar junto a atmósferas calientes que potencian y facilitan la disolución de los gases en estado líquido provocando gran cantidad de poros cuando solidifica la aleación de nuevo, lo que indica que no es por fallo eléctrico inicialmente.

#### 6.5.5. Caso 5 incendio código 200202

Se trata de un incendio ocurrido en noviembre del 2001 en una fábrica de Elda, en la provincia de Alicante. Las muestras corresponden a dos cuadros eléctricos de cobre de una Fábrica de zapatos de Elda.

El objetivo del informe es realizar un análisis del estado macroestructural y microestructural de los cables eléctricos para determinar si los puntos de fusión corresponden a cortocircuito o no y si estos, en caso de confirmarse, se han producido antes o después del incendio.

Para la preparación de las muestras me remito al punto 5.3 *Metodología y manipulación de muestras*, así como el punto 5.4 *Caracterización microestructural* donde se explica como se preparan las probetas metalográficas.



**Fig 96.** Aspecto que presentaban los cuadros eléctricos después del incendio.

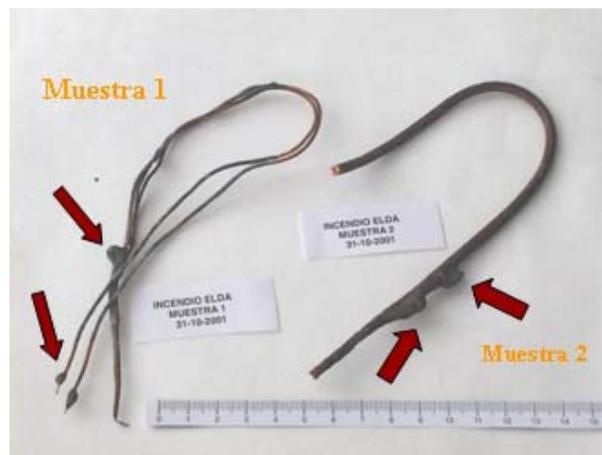


Fig 97. Aspecto general de las muestras recogidas de los dos cuadros eléctricos.

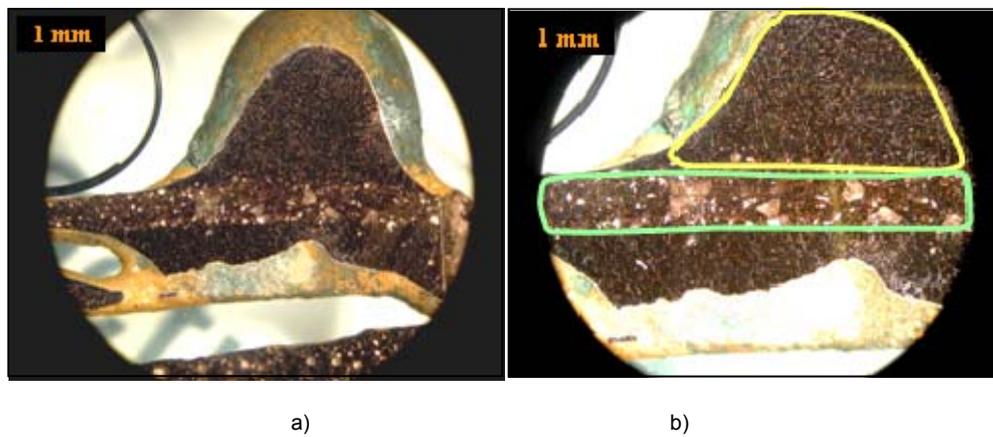
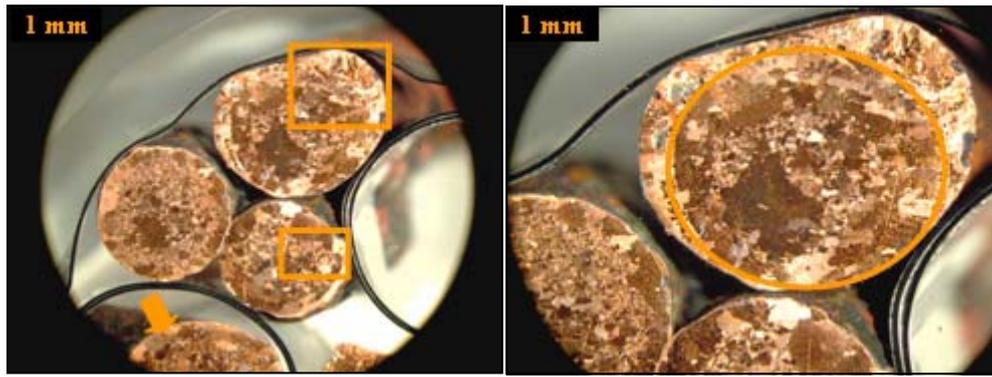


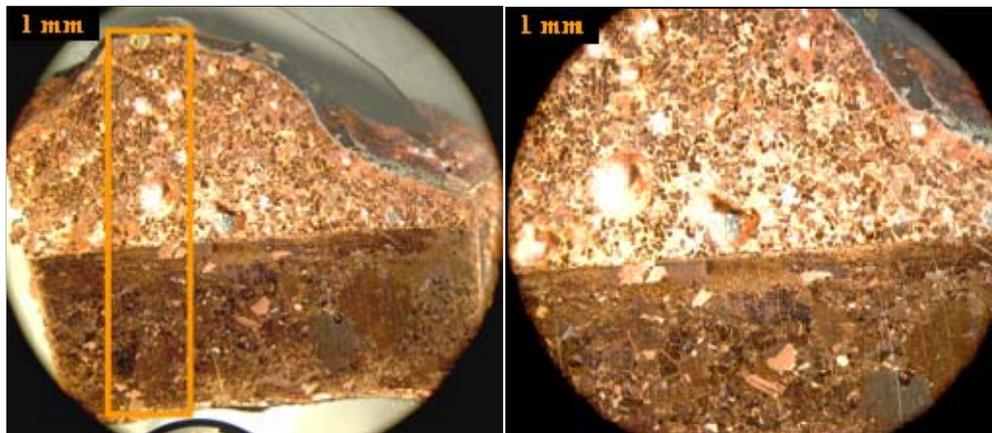
Fig 98. Preparación muestra 1, correspondiente a las zonas de las flechas rojas. Se observa una importante oxidación superficial y una falta de continuidad entre el hilo y el fundido. 16X. Detalle de la zona, en amarillo, que muestra la fusión. Se observa una importante zona de oxidación superficial, en verde que separa el cable del fundido 25X.



a)

b)

**Fig 99.** a) Corte transversal del cable correspondiente a la muestra 2. Se observa una microestructura de engrosamiento de grano muy grande así como una importante oxidación superficial. 16X. b) Detalle de la figura anterior. En amarillo se distingue el cable metálico de la zona completamente oxidada. 25X.



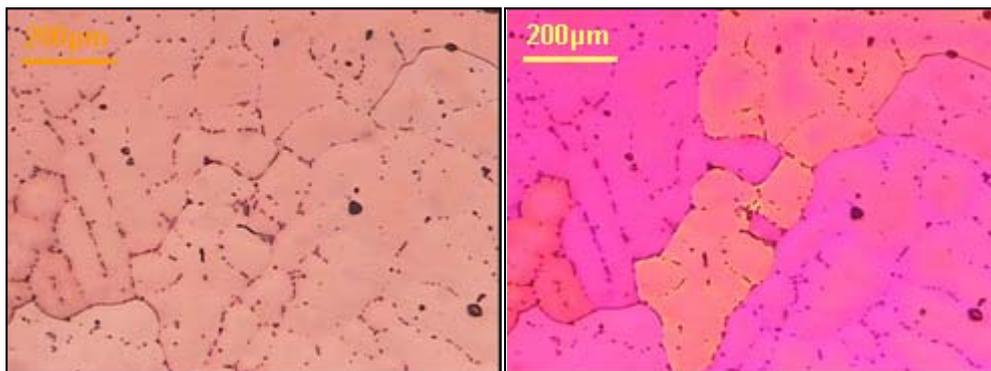
a)

b)

**Fig 100.** a) Corte longitudinal perteneciente a la muestra 2, de la zona en la que aparece la zona fundida. Se aprecia una separación completa entre el cable y la zona de fusión. 16X. b) Detalle de la figura anterior aprecia la abundante porosidad en la zona fundida y la estructura de grano grueso en el cable, indicativo de que ambas partes proceden de zonas del material distintas. 25X.

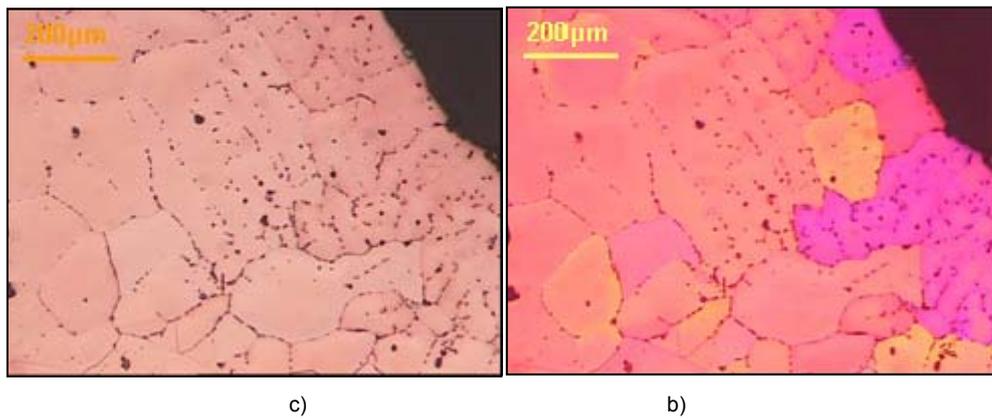


**Fig 101.** . Secuencias fotográficas de: corte longitudinal, de la muestra 1, en los que se aprecia un fuerte engrosamiento de grano y una oxidación importante a través del borde de grano, junto a la aparición de abundante porosidad debido a la difusión de gases por las elevadas temperaturas. 50X.



a)

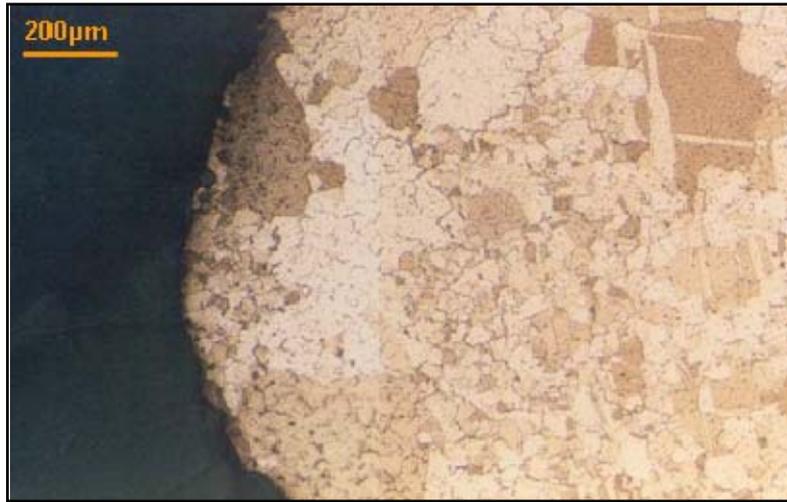
b)



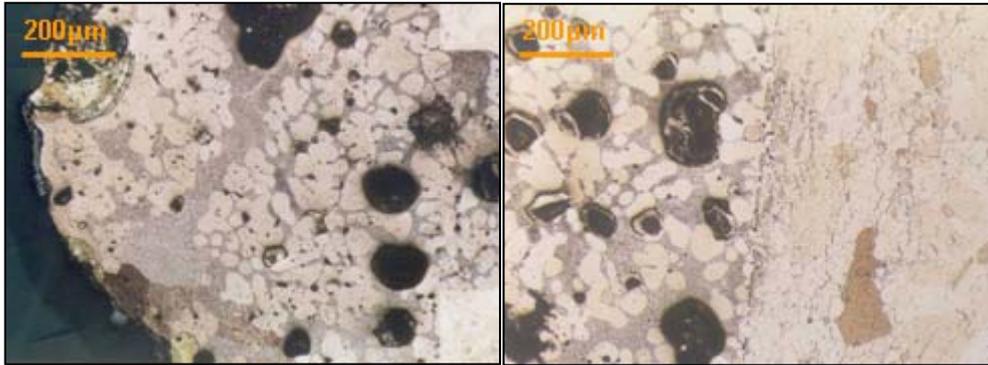
**Fig 102.** Secuencias fotográficas de: a) , b) corte transversal y , c) y d) corte longitudinal, de la muestra 1, en los que se aprecia un fuerte engrosamiento de grano y una oxidación importante a través del borde de grano, junto a la aparición de abundante porosidad debido a la difusión de gases por las elevadas temperaturas. 50X.



**Fig 103.** Secuencias fotográficas del corte transversal correspondiente al final de la pegaduras de la muestra 2. Se aprecia la estructura de solidificación y la formación del eutéctico Cu-O. X50.



**Fig 104.** Microestructura de otro corte transversal de la muestra 2. Se observa una estructura de fuerte engrosamiento de grano en la zona central de la muestra, con estructura de fuerte oxidación del borde de grano, indicativa de una importante difusión del oxígeno a través del borde de grano. X50.



**Fig 105.** Secuencia de la microestructura del corte longitudinal de una pegadura de la muestra 2. Se observa una estructura de colada en la pegadura, con una abundante porosidad y formación de eutéctico Cu-O procedente de la absorción de los gases ambientales por el líquido, lo que supone una cierta permanencia en ese estado. Entre el óxido superficial, observado alrededor del alambre y el material base se aprecia una línea de difusión muy estrecha pero indicativa de elevadas temperaturas y tiempos suficientes para posibilitar esa unión, principalmente en forma de estructura eutéctica. X50.

En el estudio macro y microestructural se han considerado los siguientes criterios metalúrgicos, fundamentalmente:

Existencia de zonas fundidas en el material, indicativo de que las temperaturas a las que se ha visto sometido el mismo son superiores a los 1100°C.

Existencia y cuantificación de la oxidación superficial en las muestras, que puede indicarnos la existencia de una atmósfera oxidante en el entorno del material y de manera cualitativa el tiempo de permanencia de los cables a esa atmósfera.

Estado metalúrgico del material base de las dos muestras que nos revela el recocido sufrido por las mismas, basándonos en el crecimiento de grano, oxidación a través del borde de grano y porosidad inducida por difusión de gases a elevadas temperaturas.

Estos criterios pueden explicarnos de manera general los diferentes parámetros que posiblemente han intervenido en el estado final de las dos muestras analizadas

Decir que ambas muestras han estado sometidas a elevadas temperaturas durante un cierto tiempo. La muestra 1, compuesta por dos hilos de cobre de 1,5 mm de diámetro presenta tres protuberancias, marcadas con flechas rojas en la Fig 97, de las cuales las dos que se encuentran en el extremo de cada hilo proceden de la fusión parcial y fuerte oxidación sufrida por el material, tal como se observa en las zonas marcadas con las flechas amarillas, produciéndose un adelgazamiento y fragilización extraordinarios en esos puntos.

La muestra 2, por el contrario, no presenta puntos de fusión incipiente, debido principalmente a su mayor diámetro, 4 mm, y las protuberancias que presenta, marcadas igualmente por flechas rojas, parece que procedan de otro material y no de si mismo. Esto se aprecia perfectamente en las Fig 100 a) y b) donde puede verse un corte longitudinal del material a 16 y 25 aumentos.

De la muestra 1, se ha preparado cortes longitudinales y transversales, como se aprecia en la Fig 101, donde se observa una gran porosidad en la zona central con descohesión de los granos inclusive. Este hecho es indicativo de temperaturas cercanas a la de fusión del material, 1080°C, donde la incorporación de gases atmosféricos es ya muy importante.

Se aprecia una microestructura de granos bastante equiaxiales, redondeados, y con un crecimiento muy acusado ya que el diámetro equivalente de los mismos se encuentra entre las 150 y 250 micras. Debe tenerse en cuenta que estos materiales suelen tener, tras su fabricación, tamaños de grano entre la micra y las 10 micras máximo.

Sin embargo, sigue apreciándose una incorporación del oxígeno a través del borde de grano, lo que indica que se trata de una difusión en estado sólido y por tanto el material no ha pasado en ningún momento a estado líquido. Esta oxidación se aprecia por la aparición de pequeñas partículas de óxido en el borde de grano que pueden verse perfectamente en la Fig 101

En la Fig 102 se recogen dos zonas diferentes correspondientes a la protuberancia de la figura 4. Estas dos zonas se han fotografiado con iluminación de campo claro, figuras a y c, y mediante técnica de iluminación con luz polarizada, figuras b y d, que aclaran mejor la diferentes orientación cristalina correspondiente a los diferentes granos. La microestructura corresponde claramente a cobre solidificado, con ausencia de formación del eutéctico Cu-O, lo cual nos indica que la difusión o acción del oxígeno atmosférico en el material fundido ha sido escasa, bien por falta de tiempo, solidificación rápida, que posibilitara la incorporación de oxígeno en mayor cantidad, bien por ausencia de éste en la atmósfera, aunque ello no concuerda completamente con la oxidación superficial abundante observada en la figura 6 para esta misma muestra. Por otra parte se evidencia claramente la oxidación a través de los bordes de grano que resultan por difusión del oxígeno en fase sólida.

Todo ello nos permite afirmar que el material ha estado sometido a elevadas temperaturas, entre los 850 y 1000°C, durante un tiempo suficiente para permitir la importante difusión del oxígeno en estado sólido que precipita en el borde de los granos de cobre fragilizando completamente el material. La protuberancia no proviene del mismo material sino que se a pegado al mismo solidificándose en su superficie con la suficiente rapidez como para no obtener la difusión entre ambos materiales, pues permanecen separado metalúrgica, aunque no físicamente.

De la muestra 2, también se han preparado metalográficamente cortes transversales y longitudinales que puedan indicarnos el estado metalúrgico en que se encuentra el material. En primer lugar, cabe señalar que no aparecen indicios de fusión en

ninguno de los cortes preparados correspondientes al alambre de 4 mm de diámetro. El estado metalúrgico corresponde a un material con un fuerte engrosamiento de grano como respuesta a elevadas temperaturas y tiempos importantes. De hecho se aprecian algunos granos con tamaño de hasta 1 mm de diámetro equivalente, aunque por regla general presentan diámetros de alrededor de las 200 micras.

En el material no se aprecia porosidad notable ni difusión de oxígeno en borde de grano, tal como aparecía en la muestra 1. El corte longitudinal de la zona donde está la pegadura, revela, en las Fig 100, Fig 103, Fig 104 y Fig 105, una gran porosidad en la pegadura que ha fundido y solidificado posteriormente, así como una separación perfectamente definida entre el metal del alambre y el correspondiente a la pegadura, indicativo de que se trata de dos materiales diferentes y no de ninguna fusión parcial por parte del alambre, al menos en las zonas anexas a la pegadura. La microestructura mostrada por el alambre y el metal fundido, en las Fig 103, Fig 104 y Fig 105, es completamente diferente respondiendo a procesos térmicos distintos.

El alambre muestra importante oxidación superficial, aunque de todas maneras no penetra hacia el interior del metal sino pocas micras, tal como puede apreciarse en los dos cortes transversales del hilo de cobre en el centro de la Fig 99 a) y b) dibuja, en círculo amarillo, lo que es el diámetro original del alambre, recubierto por parte del fundido correspondiente a la zona final de la pegadura del metal fundido, que aparece con una gran disolución de oxígeno hasta formar perfectamente visible el eutéctico Cu-O envolviendo a granos proeutécticos de Cu, en la Fig 103. Esto viene a confirmar que el origen de este metal fundido es distinto al del alambre en cuestión y no se trata de ninguna fusión parcial de este último. Sin embargo, al tratarse de Cu fundido y solidificado en la superficie del alambre, la temperatura ambiental ha tenido que alcanzar los 1100°C necesarios para la fusión del cobre aunque por un corto tiempo, insuficiente para haber producido daños en el interior del alambre de ciertas dimensiones, 4 mm de diámetro, pero si en los cables más finos como los correspondientes a la muestra 1 de 1,5 mm de diámetro.

#### **6.5.5.1. Conclusiones.**

De las observaciones realizadas tanto macro como microscópicamente, puede obtenerse las siguientes conclusiones:

La muestra número 1 muestra granos equiaxiales de tamaño alrededor de las 200 micras con abundante precipitación de óxidos en borde de grano en toda su sección. Aparece una importante porosidad en el interior de los alambres que indican una fusión incipiente de los mismos y por tanto temperaturas entre los 850 y 1000°C.

El análisis de una de las zonas fundidas de la muestra 1, indica claramente que el material correspondiente a la pegadura ha fundido completamente y ha solidificado sobre el alambre, pues aparece claramente diferenciada la microestructura de ambos materiales. Mientras el material del alambre muestra una importante oxidación superficial e incorporación del oxígeno en fase sólida a través de los bordes de los granos de cobre, en el metal fundido se observa la formación del eutéctico Cu-O que implica temperaturas superiores a los 1065°C, que corresponden a la temperatura de transformación eutéctica.

La muestra número 2, presenta un fuerte engrosamiento de grano pero no indicios de fusión incipiente, por lo que las temperaturas a las que se ha visto sometido pueden suponerse entre los 850 y 950°C, ya que no se aprecia oxidación en borde de grano de su microestructura.

El estudio de una de las pegaduras existentes en esta muestra ha revelado que se trata igualmente de material fundido procedente de otro origen y no del mismo alambre. Ello hace suponer que aunque la temperatura estimada para el alambre es algo inferior a la de fusión del cobre, no lejos de donde se encontraba este alambre se han desarrollado temperaturas superiores que han podido afectar a alambres de menor diámetro que si han podido llegar a fusión en el corto tiempo en el que se han alcanzado temperaturas superiores a los 1100°C.

El hecho de que hayan aparecido pegaduras en ambas muestra procedentes de origen distinto a los propios cables, supone que se han desarrollado temperaturas elevadas durante el tiempo necesario para la fusión y colada de este material sobre los alambres estudiados, y no por la aplicación de elevadas energías de manera casi instantánea. De esta forma se explica la difusión del oxígeno en el metal fundido hasta producir la transformación eutéctica correspondiente a una composición cercana al 0.39% en peso de oxígeno, 1.54% atómico

## 7. Conclusiones:

A la vista de los resultados obtenidos, en laboratorio y corroborados con los estudios de casos reales, puede llegarse a las siguientes conclusiones:

√ Se ha sistematizado el compartimiento de diferentes conductores de cobre en el laboratorio, con diferentes temperaturas a un tiempo constante.

√ Se ha modelizado el comportamiento del crecimiento de la capa de óxido, para cada temperatura, que han mostrado una excelente correlación con los mecanismos de difusión del oxígeno hacia el interior del material a través de su superficie y con ello poder evaluar su comportamiento en situaciones de fuego.

√ Se ha verificado que el comportamiento de crecimiento de grano experimento sigue una relación del tipo Arrhenius. Esta modelización nos ha permitirá correlacionar resultado obtenidos en incendios reales

√ Se ha comprobado un incremento del tamaño de grano con la temperatura al aumentar la sección del conductor para los dos tipos analizados, lo que se debe a una menor velocidad de enfriamiento.

√ Para todas las temperaturas evaluadas los conductores multifilares presentan un mayor tamaño de grano, lo que podría deberse a la mayor superficie específica de los hilos y a una mayor cinética de crecimiento de grano debido a un estado de mayor deformación inicial.

√ la evaluación de la dureza para las temperaturas evaluadas ha mostrado una reducción de la misma con el aumento de la temperatura, debido al incremento del tamaño de grano. La evolución de la dureza con el tamaño de grano presenta un comportamiento aproximadamente lineal y por tanto de fácil modelado que puede interpolarse fácilmente para los materiales analizados en las condiciones de servicio.

√ Se han relacionado las microestructuras observados en el laboratorio con las obtenidas de incendios reales, obteniendo muchas similitudes, tales como la aparición de elevada porosidad, formación de la capa de óxido, engrosamiento de grano y aparición del líquido eutéctico Cu-O<sub>2</sub> entre 1050-1083°C .Todo ello permitirá un mejor estudio y análisis

de los incendios reales a evaluar, aunque debe tenerse en cuenta que estos suceden en condiciones no controladas, que implican un solapamiento de los mecanismos de oxidación y reducción en los efectos provocados por el fuego. Además, las temperaturas no son homogéneas con el tiempo y ello dificulta la aplicación de los modelos obtenidos.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

## 8. Referencias bibliográficas.

[1] "Electrical Wiring in Building Fires". Ettling, B. V. Fire Technology 14, 317-325 (1978).

[2] -El cobre y sus aleaciones, Metalurgia especial. Tomo2, Herenguel J. Ed. URMO. 1976.

[3] -Metales y aleaciones no férricas. Fundación Gómez-Pado. José Manuel Ruiz Prieto, Antonio Vitores Villena. Madrid Junio 1976.

[4] -Ciencia e ingeniería de los materiales. William D. Callister, Ed. Reverte.

[5] -Fundamentos de ciencia de materiales, Ferrer C., Amigó V., Salvador M<sup>a</sup> D., SPUPV.

[6] -Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, Smith, Mc Graw Hill.

[7] -Metalurgia general. Tomo II, Aleaciones para ingeniería eléctrica. Ferrer C., Cárcel A., Amigó V., SPUPV

[8] -Dinámica del fuego. Origen y causa de los incendios. Pons i Grau, V. (2003) Ed. Abisal.

[9] -ASM Handbook, Vol 3, Alloy Phase Diagrams.

[10] -Tecnología del fuego, Volúmenes 1 y 2 . Pons M.P., Ed. M.P. Pons.

[11] -El fuego y la electricidad en instalaciones de baja y alta tensión. Montoliu A., Fundación Mapfre.

[12] "Copper metalurgy as a diagnostic tool for análisis of the origin of building fire".Levinson, D. W. Fire Technology 13, 211-222 (1977).

[13] "Scannig electrón miroscopy of burn electric wires".Singh, R. P. Scanning Microscop

[14] "Surface Analysis of Electrical Arc Residues in Fire Investigation." Anderson R.N. Journal of Forensic Sciences Vol. 34, May 1989, pp. 633-637. y 1:4, 1539-1544 (1987).

[15] "Fires due to Electric Arcing: Can 'Cause' Beads Be Distinguished from 'Victim' Beads by Physical or Chemical Testing? Babrauskas V. Fire and Materials pp. 189-201 2003.

[16] "Discrimination between Primary and Secondary Molten Marks on Electric Wires by DAS". Lee, E.-P., et al. J. Applied Fire Science 9, 361-379 (1999/2000).

[17] "Evaluation of fire damaged copper wire". C.K. Clarke. Advanced Materials & Processes, Abril 2006.

[18] "Analysis of soldered wire burnt in a fire. Yasuaki Hagimoto. J. Forensic Sci, January 2006, Vol. 51, N°1.

[19] Ciencia e ingeniería de los materiales. Donald R. Askelang, Pág.188.