



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



**Estudio metalográfico de los efectos de
arcos eléctricos primarios y secundarios
sobre cableado de cobre en el interior de
diferentes atmósferas. Aplicación a la
investigación de incendios y comparación
de resultados con incendios reales**

TESIS DOCTORAL

Óscar Román Herrera Tarazón

DIRECTOR

Vicent Amigó Borrás

Valencia, Octubre 2015

Memoria presentada por Óscar Román Herrera Tarazón en la Escuela de
Doctorado de la Universitat Politècnica de València, programa de
Doctorado en Ingeniería Mecánica y de Materiales, para optar al título de doctor.

Este trabajo ha sido desarrollado en el Instituto de Tecnología de Materiales, en el
Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la UPV y en la empresa
'Oficina Técnica de Ingeniería Forense, S.L.'

Dedicatoria

*A mis padres,
quienes con tanto esfuerzo me educaron
y me dieron su apoyo a lo largo de toda su vida*

A Mar y a nuestro hijo Román

Agradecimientos

*Quisiera expresar mi profundo agradecimiento en primer lugar
a mi director de tesis, D. Vicent Amigó i Borràs,
por su paciencia y transmisión desinteresada de conocimientos*

*A D. Vicent Pons i Grau, mi mentor en el mundo del fuego,
quien me dio la oportunidad de aprender tanto sobre incendios
como sobre la vida misma*

*A todos mis compañeros de 'Oficina Técnica de Ingeniería Forense, S.L'
por su estrecha colaboración técnica y profesional,
así como a Juan Carlos y Alia quienes también colaboraron en este proyecto*

RESUMEN

En la investigación de incendios cobra especial importancia el estudio de conductores eléctricos extraídos del lugar en el que se desarrolla. Un análisis pormenorizado de los mismos aporta indicios o evidencias respecto a la causa del siniestro.

En el presente trabajo se estudian conductores eléctricos típicos de instalaciones domésticas o industriales que han sido sometidos a diferentes condiciones ambientales tales como la temperatura, tiempo de exposición y atmósfera, con el objeto de simular las condiciones más importantes de desarrollo de incendios reales.

En estas condiciones se ha simulado la ocurrencia de cortocircuitos primarios y secundarios por medio de la aplicación de diferentes condiciones ambientales y se han estudiado los efectos que tanto estas condiciones como los arcos eléctricos han producido sobre los conductores.

Los estudios se han basado principalmente en la comprobación de los cambios microestructurales acaecidos, si bien de forma complementaria se realizaron también ensayos de tracción, microdureza y observación del crecimiento de óxido en la superficie de los cables.

Finalmente, mediante el análisis de cableado eléctrico procedente de incendios reales se ha comprobado la aplicación o correlación de los resultados obtenidos en esta investigación con casos de incendios reales.

La investigación realizada aporta un nuevo enfoque al desarrollo experimental por medio del control de diversas variables con ensayos en un horno en el que, además de la temperatura y tiempos de aplicación, se ha podido controlar la atmósfera en que se veían afectados los conductores por cortocircuitos.

Los estudios realizados han demostrado los particulares efectos de la difusión de gases y temperatura soportada sobre la microestructura de los conductores eléctricos, así como la correlación de estos con los resultados de los ensayos de tracción y microdureza, en los que se ha observado una merma de las propiedades mecánicas.

Se ha comprobado los efectos locales que los cortocircuitos causan en los conductores, tales como la formación de una masa fundida con elevada porosidad, incorporación de restos de la superficie del conductor o el crecimiento de tamaño de grano. No se ha observado especialmente intensa la absorción de gases a consecuencia del arco eléctrico, y sí la incorporación de gases al material por difusión

desde la atmósfera, siendo esta mayor en la zona del cortocircuito debido a su mayor temperatura.

La incorporación de gases o material superficial del conductor en la masa fundida por un cortocircuito es particularmente relevante, ya que en función de la secuencia de atmósferas que han afectado al cableado se obtienen diferentes formaciones microestructurales. Considerando una secuencia de cortocircuito primario, atmósfera reductora como la existente en el seno de la llama y posteriormente atmósfera oxidante al alejarse el incendio, se obtiene una microestructura limpia y tendente a la fragilización en borde de grano. En el caso de una secuencia de cortocircuito secundario, mediante una atmósfera oxidante por aproximación del fuego, cortocircuito inducido por este y finalmente aplicación de atmósfera reductora por inclusión en llamas, se observa la formación de microestructuras eutécticas de Cu-O.

Así, la secuencia de acontecimientos observada por medio del estudio de la microestructura puede revelar si un cortocircuito fue causado con antelación o posteriormente a la ocurrencia de un incendio, revelando si el cortocircuito fue primario o secundario.

Los diferentes cortocircuitos han sido ejecutados en condiciones controladas de laboratorio, lo que en ningún caso ocurre en los incendios reales. En estos incendios reales se dan principalmente los mismos efectos observados que experimentalmente, si bien las diferentes condiciones ambientales y secuencia de ellas, que ocurren en los incendios reales, escapan completamente al control de laboratorio, por lo que en el análisis de las muestras es imprescindible considerar la dinámica del incendio.

RESUM

En la investigació d'incendis és d'especial importància l'estudi de conductors elèctrics extrets del lloc en què aquest es desenvolupa. Una anàlisi detallada dels mateixos aporta indicis o evidències respecte a la causa del sinistre.

En el present treball s'estudien conductors elèctrics típics d'instal·lacions domèstiques o industrials, que han estat sotmesos a diferents condicions ambientals, tals com la temperatura, el temps d'exposició i l'atmosfera, amb l'objecte de simular les condicions més importants de desenvolupament d'incendis reals.

En aquestes condicions s'ha simulat l'ocurrència de curtcircuits primaris i secundaris, a través de l'aplicació de diferents condicions ambientals, i s'han estudiat els efectes que tant aquestes condicions, com els arcs elèctrics, han produït sobre els conductors.

Els estudis s'han basat, principalment, en la comprovació dels canvis microestructurals esdevinguts, si bé de forma complementària també es van realitzar assajos de tracció, microduresa i es va avaluar el creixement d'òxid en la superfície dels cables.

Finalment, a través de l'anàlisi de cablejat elèctric que procedeix d'incendis reals, s'ha comprovat l'aplicació o correlació dels resultats obtinguts en aquesta investigació amb casos d'incendis reals.

La recerca realitzada aporta un nou punt de vista al desenvolupament experimental, a través del control de diverses variables amb assajos en un forn en què, a més de la temperatura i el temps d'aplicació, s'ha pogut controlar l'atmosfera en què es veien afectats els conductors per curtcircuits.

Els estudis realitzats han demostrat els particulars efectes de la difusió de gasos i de la temperatura suportada sobre la microestructura dels conductors elèctrics, així com la correlació d'aquests amb els resultats dels assajos de tracció i microduresa, en què s'ha observat una minva de les propietats mecàniques.

S'han comprovat els efectes locals que els curtcircuits causen en els conductors, com ara la formació d'una massa fosa amb elevada porositat, la incorporació de restes de la superfície del conductor o el creixement de tamany de gra. No s'ha observat especialment intensa l'absorció de gasos a conseqüència de l'arc elèctric, si la incorporació de gasos al material per difusió des de l'atmosfera, que és major a la zona del curtcircuit a causa de la seua major temperatura.

La incorporació de gasos o material superficial del conductor en la massa fosa per un curtcircuit és particularment rellevant ja que, en funció de la seqüència d'atmosferaes que han afectat el cablejat, s'obtenen diferents formacions microestructurals. Si es considera una seqüència de curtcircuit primari, atmosfera reductora com la que existeix en el si de la flama i posteriorment una atmosfera oxidant en allunyar-se l'incendi, s'obté una microestructura neta i amb tendència a la fragilització en el límit de gra. En el cas d'una seqüència de curtcircuit secundari, a través d'una atmosfera oxidant per aproximació del foc, curtcircuit induït per aquest i finalment l'aplicació d'una atmosfera reductora per inclusió en flames, s'observa la formació de microestructures eutèctiques de Cu-O.

Així, la seqüència d'esdeveniments observada a través de l'estudi de la microestructura pot revelar, si un curtcircuit va ser ocasionat amb anteriorment o posteriorment a l'ocurrència d'un incendi, i fer conèixer si el curtcircuit va ser primari o secundari.

Els diferents curtcircuits han estat executats en condicions controlades de laboratori, cosa que en cap cas ocorre en els incendis reals. En aquests incendis reals es donen, principalment, els mateixos efectes observats que experimentalment, si bé les diferents condicions ambientals i la seqüència d'aquestes, que ocorren en els incendis reals, escapen completament al control de laboratori, de manera que en l'anàlisi de les mostres és imprescindible considerar la dinàmica de l'incendi.

ABSTRACT

In the investigation of fires is particularly important to study electrical conductors extracted from the place in which it has been developed. A detailed analysis of them provides evidence or indications regarding the cause of the sinister.

In this current thesis are studied typical electrical conductors from household or industrial facilities, which have been subjected to different environmental conditions, such as the temperature, the exposure time and the atmosphere, in order to simulate the most important development conditions of real fires.

Under these conditions it has been simulated the occurrence of primary and secondary short-circuits, through the application of different environmental conditions, and it has been studied the effects of both, ambient conditions and electric arcs, produced on the conductors.

The studies were based, mainly on checking the occurred microstructural changes, but also a complementary examination was done, performing tests of traction, microhardness and observing the growth of oxide on the surface of the wires.

Finally, by analysing electrical wiring from real fires, it has been found the application or reciprocity of the results obtained in this research with cases from real fires.

The research provides a new approach to experimental development, through the control of diverse variables with trials using a furnace in which, in addition to temperature and application times, it has been able to control the atmosphere in which the conductors were affected by short-circuits.

The studies performed have shown the particular effects of gases' diffusion and supported temperature over the electrical conductors' microstructure, so as their correlation with the results of traction and microhardness tests, in which it has been observed a loss of mechanical properties.

It has been tested the local effects caused by the short-circuits in the conductors, such as the formation of a melted mass with high porosity, incorporation of remainders of the surface or grain's size growth. It wasn't particularly intense the absorption of gases as a result of the electrical arcs, but must taking into account the incorporation of gases to the material by diffusion from the atmosphere, being that one higher in the area of the short-circuit, because of its higher temperature.

The incorporation of gases or conductor's surface material in the melted mass due to a short-circuit is particularly relevant, since depending on the sequence of at-

mospheres which have affected the wiring, different microstructural formations are obtained. Considering a sequence of primary short-circuit, reductive atmosphere as the existing within the flame and then an oxidizing atmosphere as getting away from the fire, it is obtained a clean microstructure and tending to embrittlement in the grain's border. In the case of a sequence of a secondary short-circuit, through an oxidizing atmosphere by fire's approximation, a short-circuit induced by it and finally an application of a reductive atmosphere due to its flames' inclusion, it can be observed the formation of eutectic microstructures of Cu-O.

Thus, the sequence of events observed by studying the microstructure can exposes if a short-circuit was caused in advance or after the fire's occurrence, revealing if the short-circuit was primary or secondary.

The different short-circuits have been executed under controlled laboratory conditions, which in any case occurs in real fires. In these real fires mainly happen the same effects observed experimentally, although the different environmental conditions and their sequence, which take place in real fires, completely beyond the control of the laboratory, so in the analysis of the samples is essential to consider the dynamics of fire.

Índice

<i>Dedicatoria</i>	I
<i>Agradecimientos</i>	III
RESUMEN	V
RESUM	VII
ABSTRACT	IX
Índice	XI
Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	5
1.2.1. Objetivo general.....	5
1.2.2. Objetivos específicos	5
1.3. Estructura de la investigación.....	6
1.4. Aportaciones de la investigación.....	8
Panorama científico	9
2.1. La investigación de incendios	9
2.2. El cobre	12

2.2.1.	Influencia de la temperatura en la microestructura del cobre.....	13
2.2.2.	Influencia de la atmósfera en la microestructura del cobre	15
2.3.	Dinámica del fuego.....	21
2.4.	Condiciones ambientales desarrolladas en los incendios.....	24
2.4.1.	Temperatura	24
2.4.2.	Humos	27
2.4.3.	Llamas.....	28
2.5.	Efectos sobre materiales y sobre el cobre.....	30
2.6.	Causas de incendios.....	32
2.6.1.	El calor eléctrico	32
2.6.2.	Formas de generar calor eléctrico	32
2.6.3.	El calor en las instalaciones eléctricas, los fallos eléctricos.....	34
2.7.	Consideraciones sobre el estado del arte	44
Planificación de la investigación		47
3.1.	Fase I: Selección y caracterización de materiales de partida.....	49
3.2.	Fase II: Estudio de la influencia de la temperatura, tiempo de tratamiento y atmósfera en la microestructura, degradación y propiedades mecánicas de los conductores de cobre.....	50
3.2.1.	Selección de temperaturas y tiempo para el tratamiento térmico en horno de los conductores de cobre	51
3.2.2.	Selección de atmósferas para el tratamiento térmico en horno de los conductores de cobre.....	52
3.3.	Fase III: Simulación experimental de cortocircuitos dentro de horno con atmósfera controlada	54
3.3.1.	Cortocircuito simulado al aire.....	54
3.3.2.	Cortocircuito simulado con control de temperatura, tiempo y atmósfera..	55
3.4.	Fase IV: Estudio de la influencia de atmósferas combinadas sobre la microestructura y degradación de conductores de cobre con cortocircuitos experimentales.....	57
3.5.	Fase V: Selección y análisis de muestras de conductores de cobre provenientes de incendios reales	58
3.5.1.	CASO 1	60
3.5.2.	CASO 2.....	61

3.5.3.	CASO 3.....	62
3.5.4.	CASO 4.....	63
3.5.5.	CASO 5.....	64
3.6.	Fase VI: Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente con los análisis de casos de incendios reales en conductores eléctricos	65
Desarrollo experimental y metodología.....		67
4.1.	Selección de tipos de conductores eléctricos a emplear	67
4.2.	Caracterización de los materiales de partida	69
4.2.1.	Caracterización microestructural	69
4.2.2.	Preparación metalográfica de los conductores de cobre	69
4.2.3.	Microscopía óptica.....	70
4.2.4.	Microscopía electrónica de barrido con emisión de campo	71
4.3.	Medición de propiedades mecánicas	72
4.4.	Montaje experimental para tratamiento térmico de cables en atmósferas controladas	74
4.5.	Montaje experimental para la realización de cortocircuitos simulados con control de temperatura, tiempo y atmósferas	76
Resultados		79
5.1.	Caracterización de los conductores de cobre en estado de entrega	79
5.1.1.	Microdureza.....	79
5.1.2.	Ensayos de tracción	81
5.1.3.	Microestructura.....	82
5.2.	Evaluación de la influencia de la temperatura, tiempo y atmósfera en la microestructura y propiedades mecánicas de los conductores de cobre.....	85
5.2.1.	Microestructura y propiedades de los conductores tratados en bajo vacío 85	
5.2.2.	Microestructura y propiedades de los conductores tratados al aire.....	93
5.2.3.	Microestructura y propiedades de los conductores tratados en atmósferas combinadas de reducción/oxidación	104
5.2.4.	Microestructura y propiedades de los conductores tratados en atmósferas combinadas de oxidación/reducción.....	116
5.3.	Evaluación de muestras de conductores de cobre obtenidas de cortocircuitos simulados	126
5.3.1.	Cortocircuitos al aire.....	126

5.3.2.	Cortocircuitos primarios.....	129
5.3.3.	Cortocircuitos secundarios	134
5.4.	Evaluación de muestras de cables de cobre tomadas de incendios reales... 141	
5.4.1.	Microestructura del cableado del CASO 1	141
5.4.2.	Microestructura del cableado del CASO 2.....	145
5.4.3.	Microestructura del cableado del CASO 3.....	147
5.4.4.	Microestructura del cableado del CASO 4.....	155
5.4.5.	Microestructura del cableado del CASO 5.....	164
Análisis de resultados y su discusión		171
6.1.	Influencia de la temperatura, tiempo y atmósferas de tratamiento, en la microestructura y propiedades mecánicas de los conductores de cobre.....	171
6.1.1.	Ensayos a bajo vacío	172
6.1.2.	Ensayos en aire estático.....	176
6.1.3.	Ensayos en secuencia de atmósferas de oxidación/reducción	180
6.1.4.	Ensayos en secuencia de atmósferas de reducción/oxidación	185
6.1.5.	Resumen.....	188
6.2.	Influencia de arcos eléctricos, producto de cortocircuitos primarios y secundarios simulados en condiciones controladas, en la microestructura de los conductores de cobre.....	190
6.2.1.	Cortocircuitos al aire	190
6.2.2.	Cortocircuitos primarios.....	191
6.2.3.	Cortocircuitos secundarios	193
6.2.4.	Resumen.....	195
6.3.	Estudio del cableado extraído de incendios reales.....	196
6.3.1.	Análisis del CASO 1	196
6.3.2.	Análisis del CASO 2	197
6.3.3.	Análisis del CASO 3	197
6.3.4.	Análisis del CASO 4	199
6.3.5.	Análisis del CASO 5	200
6.3.6.	Resumen.....	202
Conclusiones		203
Futuras líneas de investigación		205

Referencias bibliográficas.....	207
Publicaciones en revistas y participaciones en congresos derivadas de la tesis	213

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Las pérdidas que ocasionan los incendios anualmente, independientemente de su naturaleza, son de una cuantía muy elevada. Estas pérdidas no son tan solo económicas, sino que en muchos de los casos existen pérdidas personales o víctimas; tanto heridos como fallecidos. La mejor forma de combatir los incendios es mediante la investigación de los mismos, ya que sólo conociendo las causas que los provocan se pueden plantear o establecer pautas que ayuden a su prevención. A nadie escapa pues que el establecer de forma certera la causa de un siniestro, sea o no fallo eléctrico, conlleva importantes consecuencias.

La investigación de todo tipo de accidentes o siniestros, entre ellos los incendios, debe concebirse como un trabajo pericial dentro de las disciplinas de la *Ingeniería Forense*, cuya labor se desempeña con la ayuda de técnicas analíticas que permitan concretar unas conclusiones sobre cómo y porqué ha ocurrido determinado evento. El objetivo final no es el de establecer responsabilidades, sino el de proponer soluciones o medidas preventivas que reduzcan o anulen la frecuencia de ocurrencia de tales sucesos.

Durante quince años de carrera profesional en la empresa ‘Oficina Técnica de Ingeniería Forense, S.L.’, dedicados a la ingeniería forense como técnico especialista en la investigación de incendios, he tenido ocasión de investigar todo tipo de siniestros, de menor o mayor entidad, y en muy diversos ámbitos; grandes industrias, pequeños comercios, superficies forestales, instalaciones agrícolas, vehículos de diferente tamaño, maquinaria de todo tipo, instalaciones o equipos informáticos, viviendas, etc. A través

de esta experiencia he observado que todos, absolutamente todos los incendios, son diferentes en cuanto a las circunstancias en las que se desarrollan, de ahí la complejidad de su investigación. Si bien, por el contrario, en todos ellos existe un punto en común, la causa que los desencadena, independientemente de su naturaleza y alcance.

Las causas de un pequeño incendio doméstico pueden ser las mismas que las de un gran incendio forestal o industrial. Un fallo eléctrico ocasionado por una sobrecarga o un contacto defectuoso se basa en los mismos principios físicos ocurra donde ocurra, bien en la instalación eléctrica de una humilde vivienda o bien en la más grande de las empresas. Es por lo tanto crucial determinar exactamente y con el menor grado de incertidumbre la causa concreta de los incendios, si bien en ocasiones el grado de destrucción del calor y el fuego dificultan la determinación de la causa.

Durante mi carrera profesional, con un bagaje de casi 900 incendios investigados, he podido constatar que los incendios accidentales suponen de forma aproximada un 75% de los incendios investigados, y dentro de los incendios accidentales, los eléctricos suponen aproximadamente un 62.5% de los mismos, véanse Tabla 1.1 y Tabla 1.2. Es decir, que del total de incendios investigados aproximadamente un 47% fueron incendios de origen eléctrico.

Tabla 1.1 Causas de incendios en función de su naturaleza entre los años 2001 y 2015. Fuente propia (Herrera, 2011), estadística actualizada en octubre de 2015.

Naturaleza del incendio	Nº de incendios (898 totales)	Porcentaje (%)
Naturales	2	0.22
Accidentales	674	75.06
Intencionados	187	20.82
Desconocidos	35	3.90

Tabla 1.2 Tipología incendios accidentales entre los años 2001 y 2015. Fuente propia (Herrera, 2011), estadística actualizada en octubre de 2015.

Tipo de incendio accidental	Nº de incendios (674 totales)	Porcentaje (%)
Eléctricos	421	62.46
Fricción	17	2.52
Descuido/Negligencia	133	19.73
Químicos/Biológicos	62	9.20
Otros (superficies calientes)	41	6.08

Dentro de este porcentaje de incendios de origen eléctrico existe gran variedad, como pueden ser los ocasionados por armónicos, sobreintensidad, cortocircuito, falso contacto u oscilación eléctrica, derivación u otros. Si bien todos ellos en su inmensa mayoría acaban por producir cortocircuitos a consecuencia principalmente de la degradación de los materiales de revestimiento aislante o dieléctrico. La ocurrencia de un cortocircuito produce de forma común un arco eléctrico entre conductores, este arco puede ser sostenido o no; si bien en cualquier caso desarrolla elevadas temperaturas, de varios miles de grados centígrados, muy localizadas y puntuales, lo cual reproduce una llamativa sintomatología observable a nivel macroscópico por medio de fusiones y perlado en los mismos al superarse la temperatura de fusión del cobre del que se componen. Estos restos normalmente son recuperables durante las tareas de inspección ocular o indagatorias llevadas a cabo entre los restos del foco origen de un incendio.

Evidentemente, como se ha indicado, el cableado eléctrico no es ajeno al desarrollo del incendio, siendo el mismo sometido a las condiciones ambientales y acción del fuego o el calor de forma previa y/o posterior al fallo o avería eléctrica. Ante el hallazgo de unos restos de conductores eléctricos, propios de la instalación eléctrica del lugar o de alguna maquinaria en el punto de origen del incendio, con evidencias o síntomas físicos de fusión, surge la cuestión de si tales afectaciones fueron la causa del incendio por medio de un cortocircuito primario, o bien, si fueron una consecuencia (víctima) del mismo; debido a un cortocircuito secundario al producirse un arco eléctrico por pérdida del aislante de conductores en tensión a consecuencia del calor. Además de ello puede plantearse si el cableado en cuestión se vio simplemente afectado por las llamas de forma tan intensa que se produjo la fusión del mismo.

De estas tres circunstancias, la última de ellas presenta particularidades o afectaciones generalizadas que las apartan del estudio de los fallos eléctricos, al producirse lesiones en gran extensión de los conductores, lesiones superficiales, goteo de material, pérdida de sección superficial del cableado de forma generalizada; en ningún caso se dan lesiones puntuales. Así pues, la cuestión y el problema principal en la investigación de incendios de origen eléctrico, es establecer si la evidencia hallada es debida a un cortocircuito causa o bien si se trata simplemente de una consecuencia del incendio.

Durante el trabajo de campo realizado en los últimos años se ha observado que muchos investigadores de incendios achacan la causa de un siniestro a una avería o fallo eléctrico por el único hecho de localizar fusiones de cobre sobre un cableado o conductor determinado, sin plantearse analíticamente la cuestión. En realidad este hecho u observación tan sólo indica que se han alcanzado temperaturas superiores a la temperatura de fusión del material conductor, independientemente de la causa de las mismas. El hallazgo de estos restos ha producido tensas discusiones entre la comunidad, principalmente en casos avocados a los tribunales de justicia.

Mediante la experiencia con otros investigadores, y como se verá en el apartado *Panorama Científico*, se observa que no existe consenso en la comunidad científica que establezca un método fiable para la determinación de si determinado cableado sufrió un

ataque externo de las llamas o bien provocó el incendio. Es por ello que una de las principales motivaciones de este trabajo es aportar conocimiento al respecto y ensayos que ayuden a completar y/o complementar las técnicas ya existentes.

La gran cantidad de variables y condiciones que pueden darse en un incendio, y a las que puede verse sometido determinado cableado eléctrico cuando ocurre un cortocircuito, primario o secundario, obliga a que se acoten tan solo algunas de ellas para su estudio, en nuestro caso se considera de interés la atmósfera en que el cortocircuito ocurre, ya que si es primario sucede en una atmósfera limpia y si es secundario es la consecuencia de la propagación de las llamas, con las condiciones ambientales que ello conlleva.

Así pues, una de las motivaciones de la presente tesis, por las razones ya descritas, es aportar nuevos conocimientos para la interpretación analítica de los restos obtenidos de cableado eléctrico como posible causante de determinado incendio. Como se puede entender, tan solo estableciendo fehacientemente las causas de un siniestro se pueden plantear de forma eficiente medidas preventivas para que éste no vuelva a ocurrir.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo principal de esta tesis es estudiar los efectos metalúrgicos producto de la temperatura, tiempo y arcos eléctricos en atmósferas controladas sobre conductores de cobre comúnmente empleados en instalaciones eléctricas, y comparar los resultados obtenidos con muestras de cableado extraídas de incendios reales.

1.2.2. Objetivos específicos

- Seleccionar y caracterizar los conductores eléctricos a utilizar.
- Investigar la influencia que tiene la temperatura, tiempo y atmósfera de tratamiento en las propiedades mecánicas, degradación y oxidación del cobre en los conductores eléctricos.
- Establecer la correlación existente entre el estado microestructural del material y los resultados de ensayos de tracción y microdureza de los conductores ensayados en diferentes condiciones térmicas.
- Determinar la influencia, en la microestructura, degradación y oxidación, de arcos eléctricos ocasionados por cortocircuitos primarios y secundarios desarrollados de forma experimental sobre conductores de cobre en condiciones controladas.
- Comprobar el cambio microestructural en conductores de cobre sometidos a arcos eléctricos por cortocircuito en condiciones controladas de atmósfera, temperatura y tiempo, mediante secuencias de acontecimientos simuladas para cortocircuitos primarios y secundarios.
- Analizar experimentalmente el efecto de la temperatura, tiempo y atmósfera sobre la oxidación superficial y la transferencia de oxígeno al interior de los conductores, y si existen diferencias significativas entre las secuencias de cortocircuitos primarios y secundarios simulados.
- Comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los análisis de casos de incendios reales en conductores eléctricos de los cuales se conoce el origen, dinámica y causa del incendio.

1.3. Estructura de la investigación

La presente investigación se desarrolla como consecuencia de la actividad profesional ejercida durante los últimos años como perito de causas, particularmente de incendios. Durante estos años se han recabado experiencias acerca de las causas que originan los incendios, así como sobre la dinámica y comportamiento de los mismos, teniéndose ocasión de afrontar de lleno la problemática analítica del cableado eléctrico causante de un incendio o afectado por el mismo. La información recabada permite abordar las circunstancias ambientales a las que se enfrenta el cableado eléctrico existente en los incendios.

Para el desarrollo de este trabajo se ha empleado una metodología cuantitativa y cualitativa de tipo experimental, que permite la obtención de información a partir de la cuantificación de los datos sobre las variables de estudio, empleando diversas técnicas experimentales propias del ámbito de la ingeniería mecánica y de materiales enfocado al análisis forense de materiales.

En este caso se realizó el estudio de conductores eléctricos de cobre sometidos a diferentes condiciones ambientales de temperatura y atmósfera. Además se realizó el estudio de cableado sometido a arco eléctrico por cortocircuito con diferentes secuencias de sucesos, con el objeto de simular las circunstancias en que ocurren tanto los cortocircuitos primarios como los secundarios.

La experiencia acumulada durante los últimos años, en los que se ha llevado a cabo cientos de investigaciones de incendios reales, ha permitido la recopilación de análisis realizados sobre muestras de incendios reales que en su día fueron remitidas a los laboratorios del Instituto de Tecnología de Materiales, Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la UPV, para la realización de estudios metalográficos. Sobre las mismas se comprobará si las conclusiones obtenidas en los ensayos aportan nuevas observaciones útiles para el análisis de muestras extraídas de incendios reales.

Tras los pertinentes estudios bibliográficos realizados, el trabajo en laboratorio se desarrolló en varias fases:

La primera fase, consistió en la planificación y preparación de los equipos, instalaciones y selección del material necesario, destinados al estudio de arcos eléctricos en atmósfera controlada.

A continuación se ejecutaron ensayos de verificación y calibración de equipos, así como el tratamiento de los conductores seleccionados en estado de entrega y su posterior análisis.

Seguidamente se acometió el tratamiento de muestras en atmósferas controladas (oxidante y reductora), realizándose las oportunas preparaciones metalográficas y ensayos previstos. También se ejecutaron los primeros cortocircuitos de dichas muestras con la finalidad de poder modificar parámetros y variar condiciones ambientales en función de los resultados.

Tras la obtención de resultados previos se ejecutaron cortocircuitos con diferentes secuencias atmosféricas, así como sus correspondientes preparaciones metalográficas.

Las siguientes fases estuvieron dedicadas a la recopilación y análisis de los resultados obtenidos. Respecto a los casos reales de incendio se seleccionaron varios, concretamente los más representativos de entre los cuales se pudo observar el estado microestructural del cableado afectado por incendios reales, pudiéndose comparar éstos con los resultados obtenidos en laboratorio en condiciones controladas.

1.4. Aportaciones de la investigación

La realización de esta tesis supone las siguientes aportaciones:

- Se ha aportado un nuevo enfoque al análisis de cableado eléctrico cortocircuitado procedente de incendios, basado en la secuencia de acontecimientos ocurridos sobre un conductor y las condiciones ambientales en las que el mismo se desarrolla.
- Las transformaciones metalográficas observadas han permitido verificar patrones de comportamiento del cableado eléctrico sometido a calentamiento en atmósferas reductoras, oxidantes y a la secuencia de éstas.
- Se ha observado el efecto de estas atmósferas en el interior del material y los procesos de difusión de gases sufridos, que ayudan a establecer las temperaturas alcanzadas y condiciones ambientales en que se produjo el evento.
- Se ha comprobado con especial atención, el efecto de las atmósferas en los puntos de afectación por arco eléctrico, simulando un cortocircuito en ellas, con el objeto de establecer por medio de su estudio metalográfico la secuencia de acontecimientos.
- La comparación con muestras obtenidas de casos reales ha permitido secuenciar los acontecimientos a los que se han visto sometidos los materiales, por lo que generan un mejor acercamiento al análisis de causas y efectos en situaciones reales.
- Los resultados obtenidos son un punto de partida que permiten abrir un campo de investigación basado en las condiciones que rodean un incendio y secuencias de acontecimientos. Los nuevos estudios derivados de este trabajo podrán aislar nuevas variables de estudio de las muchas que existen en los incendios reales.

Capítulo 2

Panorama científico

2.1. La investigación de incendios

A lo largo de la experiencia recabada como investigador de incendios durante los últimos años en todo el territorio español, se ha coincidido con diversos investigadores de incendios de muy diversa categoría y formación. Entre ellos, de forma general, se ha podido constatar que sus conocimientos acerca del estudio de cableados eléctricos sometidos a cortocircuitos, proceden primordialmente de su experiencia, por medio de observaciones organolépticas, a nivel macroscópico; siendo tan solo unos pocos los que han valorado los restos eléctricos de un incendio de forma analítica a nivel microscópico.

A este respecto, la voz más autorizada corresponde al Dr. Vicent Pons i Grau, quien en su libro “Dinámica del Fuego” (Pons, 2003), aporta ciertas pautas generales para establecer de forma inicial si un incendio ha sido causado por una avería de tipo eléctrico o bien si el fallo eléctrico ha sido una consecuencia del mismo; basándose principalmente en evidencias que apuntan a un calentamiento interno del cableado. El Dr. Pons apunta además en su libro a las preparaciones metalográficas de cableado eléctrico con el objeto de establecer la historia térmica del conductor y obtener de esta forma datos que esclarezcan la causa del siniestro.

En este contexto, tal y como se indica en el capítulo de agradecimientos, toda mi carrera profesional ha estado ligada al Dr. Pons, participando con el mismo de la toma de muestras y remisión de las mismas a los laboratorios del Instituto de Tecnología de los Materiales, donde fueron analizadas metalográficamente por parte del Dr. Vicent Ami-

gó i Borràs y su equipo. Los resultados analíticos de estas preparaciones han sido de gran ayuda para una de las fases de esta tesis en la que se compara el trabajo realizado con el resultado de casos reales.

A excepción del Dr. Pons, otras publicaciones de autores españoles, o traducidas al español, no entran a fondo en la cuestión analítica del cableado (Montoliu, 2001). En España, y en casi todo el mundo, se toma como publicación de referencia para los investigadores, la “Guide for Fire and Explosion Investigations” editada por la estadounidense National Fire Protection Association (NFPA 921, 2008); pero ésta, pese a su gran difusión a nivel mundial, únicamente muestra algunas pautas iniciales a nivel macroscópico para la comprobación de cableado eléctrico.

Las primeras publicaciones de interés halladas durante la revisión bibliográfica realizada, datan de los años 70, y hasta la actualidad. En estos artículos se plantea el uso de diferentes técnicas analíticas; por ejemplo por medio de microscopía óptica, microscopía electrónica (SEM), microanálisis por energías dispersivas de Rayos X (EDX), espectroscopía Auger, espectroscopía Raman o espectroscopía de masas; para intentar distinguir si un cableado con evidencias macroscópicas ha sido afectado por un cortocircuito de forma previa a la ocurrencia del incendio o lo ha sido posteriormente, es decir si esas evidencias son la causa o una mera consecuencia del incendio.

En las primeras publicaciones se presenta el aumento del tamaño de grano a consecuencia de las altas temperaturas, la microporosidad formada, la recristalización, la formación de óxido de cobre, de eutéctico o de dendritas, como algunas de las observaciones metalográficas realizadas de interés (Levinson, 1977).

Otras publicaciones diferencian entre un estado inicial de cortocircuito con el cableado frío (cortocircuito primario) en el que el conductor no se secciona completamente y deja los hilos afectados unidos entre sí; y un cortocircuito con el cableado caliente (afectado previamente por el incendio, cortocircuito secundario), donde la zona afectada por el cortocircuito será más extensa. Así como observaciones sobre 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 (Ettling, 1978).

Algunos autores se basan en la formación de la porosidad en la zona afectada por el cortocircuito para establecer si éste fue primario o no (Erlandsson y Strand, 1985), otros en la formación de óxidos de cobre (Singh, 1987); pero lo cierto es que ninguno de ellos obtiene conclusiones contundentes.

Entre los diferentes autores existen grandes discrepancias, por ejemplo la crítica que realiza Howitt (Howitt, 1997) a la interesante aportación de Anderson en su artículo “Surface Analysis of Electrical Arc Residues in Fire Investigation” (Anderson, 1989), quien se basa en la atmósfera circundante en el momento en que ocurre la fusión del cobre del conductor. Indica en primer lugar que en un perlado de cobre consecuencia de un cortocircuito de origen secundario, la superficie del mismo mostrará los productos de la combustión y humos existentes. Por el contrario, si el cortocircuito ocurre

antes de que el incendio se haya iniciado, en el perlado no se encontrarán restos de productos de combustión. Se basa en la absorción superficial de los gases existentes en la atmósfera durante la ocurrencia de un arco eléctrico y generación de perlado. Parece razonable postular que las diferencias de la atmósfera existente en ese momento afectarán al resultado final.

Anderson encuentra diferencias significativas en este sentido, si bien, el artículo “*The surface analysis of copper arc beads, a critical review*” de Howitt, realiza una razonable crítica al anterior. Este último indica que la baja solubilidad de los gases en el cobre líquido es de varios órdenes de magnitud menor que la posible capacidad de detección de la espectroscopía Auger empleada por Anderson, con lo que esta técnica no aporta información relevante en este caso. Indica también que la solubilidad o el índice de difusión de gases atmosféricos en el cobre líquido a altas temperaturas no es mayor que en el cobre sólido a temperaturas mucho más bajas. De hecho, la premisa de que las concentraciones de gas atmosférico queden atrapadas indefinidamente en una perlita de cobre es totalmente incorrecta y basada en una errónea concepción del comportamiento termodinámico y cinético del material.

Se trata de un interesante punto de partida, no tanto por el hecho de que los gases fundan en estado sólido sino más bien por la atmósfera existente en el momento en que ocurre el arco eléctrico o cortocircuito y el estado de la superficie del conductor; oxidado en caso de un alcance por las llamas y posterior cortocircuito, o metálico, en estado de oxidación cero, en caso de un cortocircuito sin previa oxidación. Se entiende que es un punto de partida interesante, ya que el proceso de fusión por arco eléctrico comienza en la superficie y penetra en el material, participando de la masa fundida la atmósfera circundante, la superficie del material, oxidada o no, y su parte interna.

Durante la ocurrencia de un cortocircuito se alcanzan temperaturas de varios miles de grados centígrados, descendiendo la temperatura rápidamente. A mayor temperatura del metal existe mayor cantidad de gas disuelto en el mismo, cuando el cobre líquido pasa de 1.300 a 1.083°C, punto de fusión del cobre, la solubilidad decrece del 10.2% al 9.4-5.17%; al solidificar, esta solubilidad decrece al 1.9% (Zhang, 2011); por lo que es razonable deducir que los gases se verán atrapados, siempre y cuando los efectos posteriores del incendio no afecten de forma muy intensa.

Así pues, se desprende que la investigación de los efectos de arcos eléctricos sobre cableado en los incendios es un campo poco estudiado, no existiendo una pauta concreta de análisis, quizás por el hecho del escaso control sobre las innumerables variables existentes en los incendios. El control total sobre estas variables conllevaría un trabajo enormemente extenso. Es por ello que se considera oportuno trabajar únicamente en un campo, aislando tan solo unas pocas de estas variables que cumplan los objetivos expuestos y sirvan para ulteriores investigaciones.

2.2. El cobre

Sin duda alguna el cobre es el material predominante que compone las instalaciones eléctricas en todos los ámbitos y localizaciones alrededor del mundo. Es usado tanto en instalaciones industriales como en domicilios o vehículos, por lo que para llevar a cabo el estudio de los incendios de origen eléctrico, y concretamente de las averías o fallos eléctricos que los producen, debe conocerse su composición, morfología o estructura, así como principalmente los efectos que la temperatura, el calor o las diferentes atmósferas o gases, presentes en un incendio, tienen sobre el mismo.

El desarrollo científico y conocimiento de las características químico-físicas de los materiales ha propiciado que el cobre, gracias a su alta conductividad eléctrica, ductilidad y maleabilidad, esté presente en la gran mayoría de nuestras instalaciones eléctricas en forma de cables eléctricos y componentes electrónicos.

El cobre es un metal de transición de color rojizo y brillo metálico, es un metal duradero porque se puede reciclar un número casi ilimitado de veces sin que pierda sus propiedades mecánicas. Por sus propiedades se aproxima a los metales preciosos con características como resistencia a la corrosión, conductividad eléctrica y térmica, colorido y maleabilidad. Su ductilidad permite transformarlo en cables de cualquier diámetro, a partir de 0.025 mm. La resistencia a la tracción del alambre de cobre estirado es de unos 420 MPa. Respecto a su conductividad eléctrica, el cobre se toma como patrón de medida de esta propiedad, ya que entre los metales, a excepción de la plata, es el de mayor conductividad, tal como se observa en la figura 2.1. Para el cobre recocido la resistividad a 20°C es de $0.017241 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ (ASM Metals Handbook Vol.2, 1990). Esta resistencia tiene por definición una conductividad de 100% IACS (International Annealed Copper Standard).

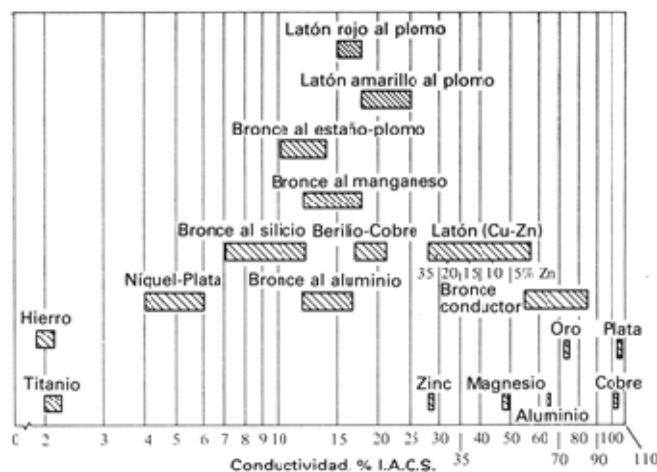


Figura 2.1 Conductividad de metales y aleaciones comunes en términos de porcentaje IACS (Flinn y Trojan, 1989, pág. 631).

El cobre tiene una excelente capacidad de deformación que se traduce en un importante alargamiento antes de la rotura en estado recocido, y aún con una acritud parcial, y un importante intervalo entre el límite elástico y la carga de rotura. El módulo de elasticidad es difícil de determinar en estado recocido debido a su reducido valor de límite elástico en este estado. En estado con acritud es de 126.5 MPa. El módulo de torsión es de 420-490 MPa. El coeficiente de Poisson es aproximadamente 0.35. En general, las propiedades mecánicas del cobre varían poco según las diferentes calidades del mismo, si bien son afectados de forma importante por la deformación en frío.

2.2.1. Influencia de la temperatura en la microestructura del cobre

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. A partir de los 100°C, el cobre electrolítico con acritud sufre un ablandamiento en un calentamiento de duración muy larga; llegando a ser muy rápido por encima de 200°C, estas temperaturas de ablandamiento (recocido) dependen del tiempo de tratamiento térmico, tal como se observa en la figura 2.2 para un hilo de cobre. Así mismo, el cobre puro con una fuerte acritud, tiende a ablandarse totalmente. A temperaturas superiores a 500°C se da un crecimiento de tamaño de grano muy importante que se acrecienta con el aumento de la temperatura y el tiempo de exposición a la misma.

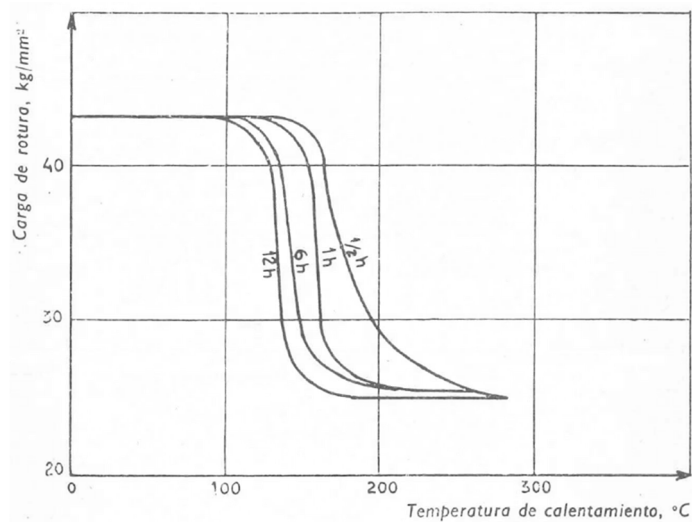


Figura 2.2 Curvas de temperaturas de recocido para un hilo de cobre tenaz (2 mm) con acritud (reducción de 7 a 2 mm) (Herenguel, 1976, pág. 35)

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 unos 150°C - 200°C. Por encima de estas temperaturas las características mecánicas disminuyen rápidamente y el metal experimenta un aumento de grano muy perjudicial para su comportamiento en servicio, incrementándose a su vez su ductilidad, tal como se observa en la figura 2.3.

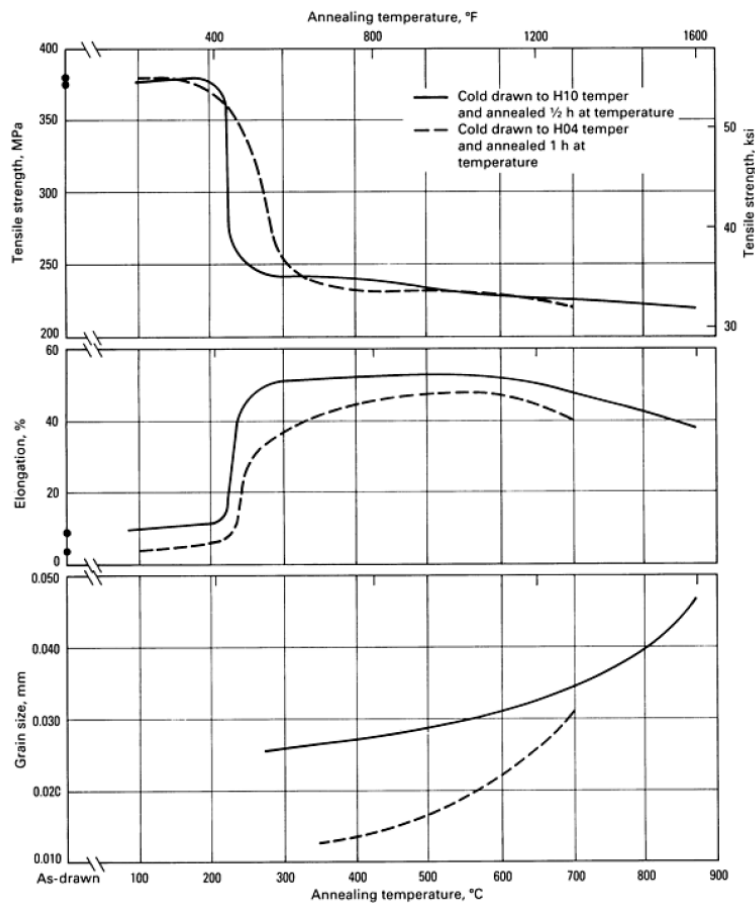
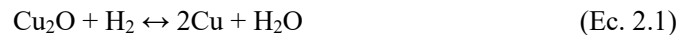


Figura 2.3 Evolución de la resistencia mecánica (R), porcentaje de alargamiento (A) y tamaño de grano en función de la temperatura para cobre electrolítico (C11000) y similares (ASM Metals Handbook Vol. 2, 1990, pág. 932)

2.2.2. Influencia de la atmósfera en la microestructura del cobre

El cobre líquido puede disolver cantidades importantes de hidrógeno. Por ejemplo, 100 g de cobre líquido a 1083°C disuelven 12 cm³, mientras que a esa misma temperatura pero en estado sólido, disuelven 8,3 cm³, lo que conduce al fenómeno de rechupe invertido. 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.

La temperatura de fusión del cobre puro es de 1083°C y de 1065°C para el eutéctico Cu-O (con 0.39% de oxígeno). Desde los 400°C, la absorción de hidrógeno es notable. Si bien el hidrógeno está presente en el cobre a la temperatura ordinaria, en solución sólida intersticial. El efecto más importante del hidrógeno, por sus consecuencias extremadamente negativas sobre el material, se presenta cuando el cobre contiene oxígeno. El oxígeno está presente en el cobre en forma de Cu₂O, 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, se da la reacción:



En estado sólido, el vapor de agua desprendido a causa del proceso de reducción puede eliminarse únicamente provocando una dislocación intergranular, que se puede observar en borde de grano en la microestructura de un cable de cobre de la figura 2.4. La amplitud y velocidad de crecimiento de la zona fragilizada, como consecuencia de la difusión del hidrógeno y de la reacción de reducción del Cu₂O, queda representada, como función de la temperatura y tiempo de calentamiento en la figura 2.5, 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 (Herenguel, 1976).

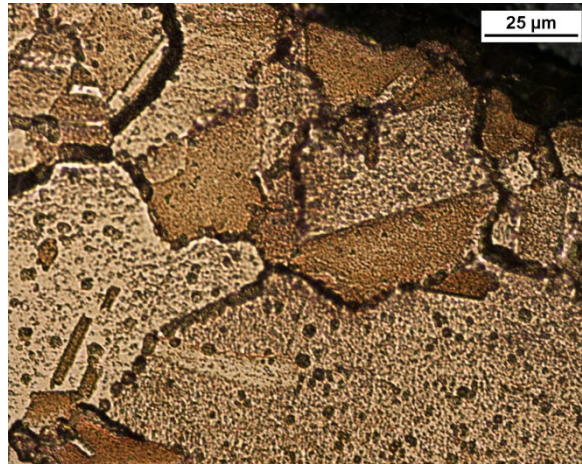


Figura 2.4 Micrografía de un conductor de cobre procedente de un incendio real, que presenta formación de burbujas en borde de grano (X500) (imagen propia).

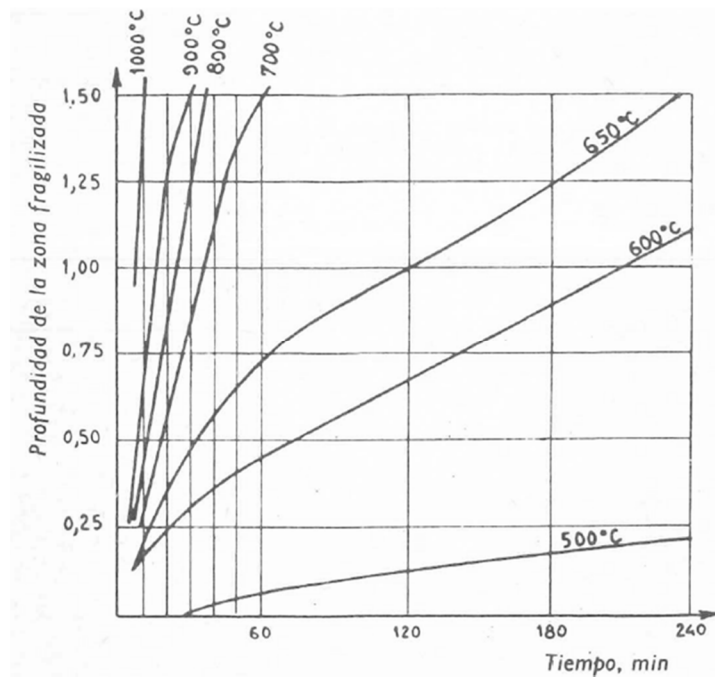


Figura 2.5 Profundidad de la zona “fragilizada” debida al calentamiento en atmósfera de hidrógeno de un cobre que contiene 0.042% de oxígeno en función de la temperatura y tiempo de tratamiento (Herenguel, 1976, pág. 48)

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_2O . 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”).

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 al Cu_2O , aunque es necesario vigilar la posible producción de hidrógeno en atmósferas con vapor de agua.

El oxígeno oxida al cobre y se disuelve en el cobre fundido, en forma de Cu_2O , formando con él un eutéctico de 0.39 % de oxígeno, o sea 3.6 % de Cu_2O aproximadamente, y que funde a los 1065° C. En el diagrama de fases Cu-O (figura 2.6) se comprueba que la solubilidad en estado sólido es pequeña. A manera de referencia se muestran los valores de la solubilidad del Cu_2O en el cobre sólido: 0.07 % de Cu_2O a 1065° C (líquido), 0.03 % de Cu_2O a 900° C, 0.015 % de Cu_2O a 600° C y 0.0015 % de Cu_2O a 500° C. Sin embargo deja prever que, a pesar de estos porcentajes pequeños, el oxígeno podría difundirse en el cobre sólido por calentamiento al aire.

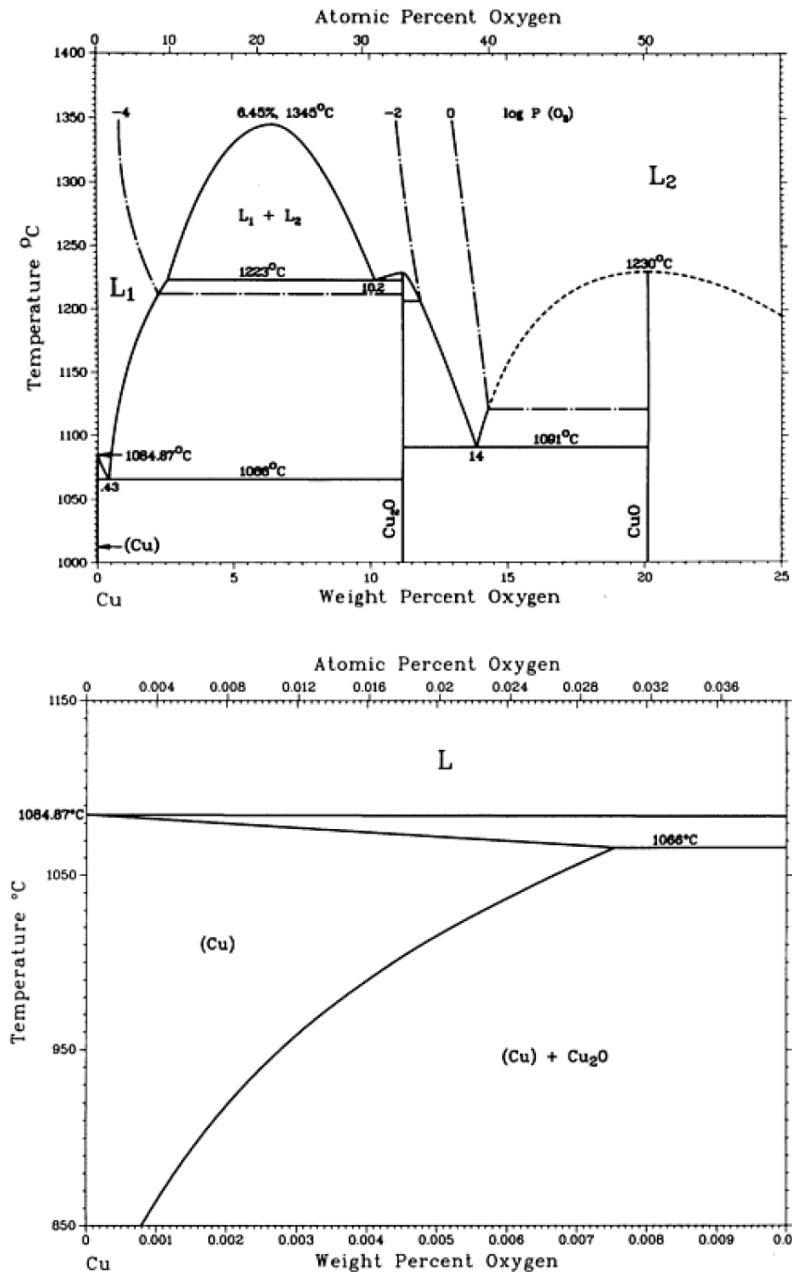


Figura 2.6 Diagrama de fases binario Cobre-Oxígeno (ASM Metals Handbook Vol.3, 1992, págs. 752-753).

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

1. En forma de óxido combinado con las impurezas del cobre no eliminadas durante la fusión. Este es un cobre inerte.
2. En forma de solución sólida, invisible al microscopio óptico (fase α).
3. En forma de Cu_2O rodeando los granos de solidificación de metal o superpuesto a la estructura actual si hubiera tenido lugar una transformación y recristalización.

No obstante, como el Cu_2O es parcialmente soluble en el cobre, es posible, en cierta medida, ponerlo en solución sólida mediante un calentamiento y hacerlo precipitar en los bordes de grano actuales realizando el enfriamiento lentamente. A 500°C , la difusión en el borde de grano en el cobre es preferencial respecto a la difusión hacia el interior de los granos (Nieh y Nix, 1981). Al enfriar, el oxígeno difundido en el borde de grano precipita en óxido de cobre en este punto, ello provoca la fragilización del material. Este proceso es reversible si se elimina el oxígeno en el proceso de recocido (Kosec *et al*, 1993).

Otro fenómeno a considerar en el cobre es la difusión del oxígeno en estado sólido. La importancia de esta difusión es escasa a temperaturas inferiores a 600°C . En la práctica, se comprueba que los cobres “puros” son poco susceptibles a la oxidación a causa de la saturación en oxígeno, tal como se muestra en ensayos realizados en una muestra de cobre OFHC calentada al aire entre 0 y 240 minutos, a diferentes temperaturas (figura 2.7). Se comprueba que el cobre tenaz es poco susceptible a la oxidación debido a estar saturado de oxígeno.

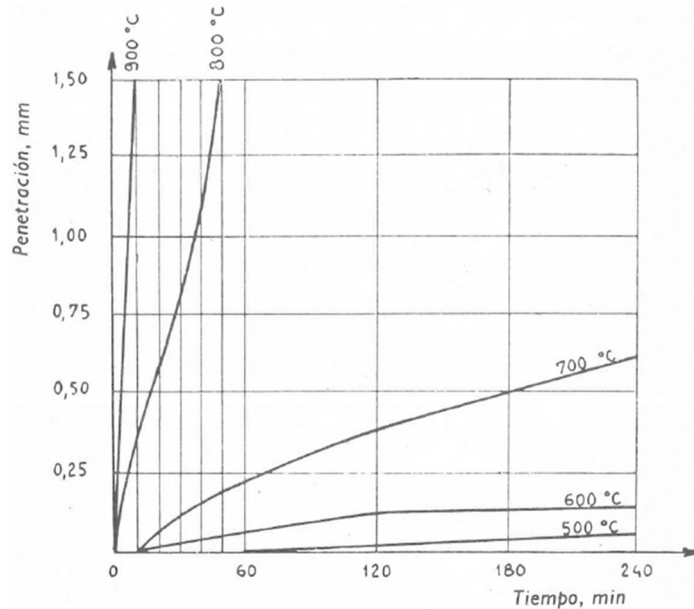


Figura 2.7 Penetración de la fragilidad por calentamiento a 800°C durante 15 min en atmósfera de hidrogeno sobre un cobre OFHC calentando a 500-600-700-800-900°C al aire entre 0 y 240 min (Herenguel, 1976, pág. 55)

Cuando el cobre contiene adiciones más oxidables que él, se comprueba mediante un calentamiento al aire, una oxidación interna con formación de un óxido que se separa en una fase cobre poco o nada oxidada (caso del Cu+Cr, Cu+Si, etc.).

A la temperatura ordinaria, la superficie del cobre en aire seco, se recubre de una película de Cu_2O que protege la superficie, a 150°C el espesor de 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 Cu_2O formada al aire aumenta de espesor 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. La oxidación superficial del cobre en caliente se ve influenciada por la presión de oxígeno.

2.3. Dinámica del fuego

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 está 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 (Pons, 2003).

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

$$\text{Incendio } (x, y, z, T, t, c, P, G)=0 \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

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

T: las temperaturas desarrolladas desde el inicio hasta el final del incendio.

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

q: la carga de fuego; dependiente de la naturaleza del combustible.

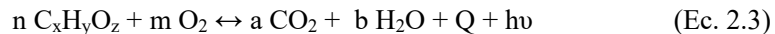
c: la concentración o relación combustible/comburente.

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

G: el diseño geométrico del escenario donde el incendio transcurre.

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 propios del escenario, es decir, las medidas pasivas de protección.

Se define “combustión” como “una reacción química entre el oxígeno y un material oxidable, acompañada de desprendimiento de energía y que habitualmente se manifiesta por incandescencia o llama” (RAE, 2015), se trata de una reacción irreversible de óxido-reducción entre el oxígeno y un material oxidable, o más estrictamente entre un combustible y un oxidante, en la que siempre se desprende calor (reacción exotérmica) y radiación lumínica.



Una combustión, al igual que una reacción química posee un equilibrio, viéndose dominada por las concentraciones de reactivos y productos. Lo primero que observamos es el fuego, que no es más que la radiación lumínica emitida al oxidarse los vapores desprendidos del combustible disgregado a consecuencia del calor que está soportando el mismo. La materia combustible, a consecuencia del propio calor que desprende la combustión, se disgrega formando moléculas de menor tamaño y gases combustibles,

más volátiles, capaces de ser arrastradas por las corrientes de convección y encontrar oxígeno para ser oxidadas.

Una combustión es completa cuando todo el material combustible ha sido oxidado por la acción del oxígeno presente. Los restos y cenizas resultantes de una combustión completa resultan ser óxidos o sales no combustibles.

Un fuego se compone por tanto de diferentes factores que son imprescindibles para que éste se dé, que son: el combustible, el comburente, una reacción en cadena y una fuente de ignición. Puede considerarse otro factor que es la superficie específica de ataque del fuego. Una vez ocasionado un fuego, se considera que este pasa a ser incendio cuando se descontrola.

El fuego se comporta tal y como lo hace el humo o los gases calientes generados, propagándose por medio del transporte de calor por conducción, por convección y por radiación. La figura 2.8 muestra el desplazamiento del calor en un incendio convencional:

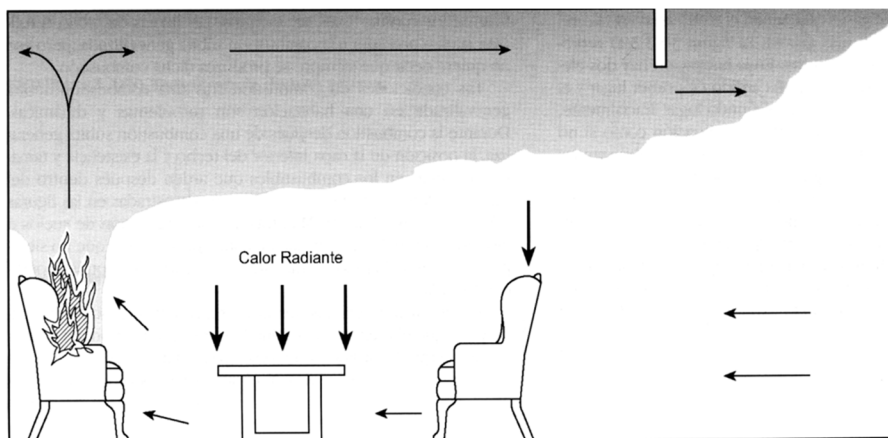


Figura 2.8 Esquema de las formas de transmisión de calor desarrolladas en un incendio convencional (NFPA921, 2008, pág. 45)

En esta figura se muestra cómo se desplazan los gases calientes transportando el calor por convección y cómo estos, al igual que el foco del incendio, afectan a puntos alejados de la zona de origen del incendio desde cotas elevadas por medio de radiación. Primero por calor y posteriormente por alcance directo de las llamas.

La trayectoria del fuego dependerá de diferentes factores tales como las condiciones de entorno, geometría del escenario donde ocurre el incendio y ventilación, materiales de construcción, condiciones climatológicas o ambientales, distribución del combustible y variedad de su carga térmica, punto de inicio del fuego respecto al resto de combustible, etc.

La propagación del incendio ocurre en cinco fases diferenciadas: ignición, desarrollo, combustión súbita generalizada (*flashover*), pleno desarrollo y declive.

- Fase de ignición: periodo en el que se inicia el fuego.
- Fase de desarrollo: periodo inicial de desarrollo en el que el crecimiento del fuego se describe en función de la energía desarrollada en la combustión. En este momento existe suficiente cantidad de oxígeno y de combustible para mantener la combustión. La combustión es “limpia” sin abundante generación de humos, a medida que el incendio avanza, el requerimiento de oxígeno es mayor y se genera más cantidad de gases y calor que se acumulan en los puntos altos del recinto donde se desarrolla el incendio, afectando por radiación al resto de combustibles.
- Combustión súbita generalizada (*flashover*). El calor se extiende por convección y radiación ocasionando el calentamiento de la estructura y del diferente contenido combustible hasta alcanzarse su temperatura de inflamación o autoinflamación, provocándose la combustión súbita generalizada o *flashover* (figura 2.9). Una buena ventilación evita en gran medida este efecto, así como la posible generación de *backdrafts* o explosiones de humo (figura 2.10).
- Fase de pleno desarrollo: el fuego se encuentra en su plenitud.
- Fase de declive: ocurre cuando la reacción de combustión se ve limitada bien por la cantidad de combustible o bien por la cantidad de comburente.



Figura 2.9 Reproducción de un incendio doméstico, en un salón. Instantánea tomada en el momento inicial de desarrollo del *flashover*, combustión súbita o generalizada (imagen obtenida de <http://bomberosalcorcon.blogspot.com.es/2007/10/estudio-de-un-flashover-o-combustin.html>)



Figura 2.10 Ensayo de incendio confinado en el interior de un contenedor. Instantánea tomada en el momento de ocurrencia de una explosión de humo o *backdraft* (Babrauskas, 2003, pág. 648)

2.4. Condiciones ambientales desarrolladas en los incendios

2.4.1. Temperatura

Si bien cada incendio tiene una evolución diferente en base a los factores ya comentados, existen modelos físico-matemáticos para el cálculo y la predicción de las temperaturas de un incendio, desplazamiento de humos y corrientes convectivas de calor. Estos modelos pueden ser muy sencillos o bien muy complejos cuya resolución sólo es viable por medio de software informático, como por ejemplo los modelos de campo o de dinámica de fluidos (CFD). Estos modelos CFD requieren de la introducción de cuantiosas variables, que deben estar definidas con mucha precisión para obtener un resultado satisfactorio. Un pequeño error de precisión en la introducción de algún input o bien la ausencia de alguna variable no considerada, conduce a resultados muy dispares, por lo que estos modelos deben tomarse como orientativos.

Para la realización de cálculos menos complejos se utiliza entre otras la curva normalizada tiempo-temperatura definida en los ensayos de resistencia al fuego (UNE EN 1363, 2000) y que se utiliza como curva de fuego en los métodos de obtención de resistencias estructurales, véase figura 2.11 (Código Técnico de la Edificación, 2006). En el Eurocódigo 1, acciones en estructuras (UNE EN 1991-1-2, 2004) se indican otras curvas de fuego nominales. Se trata de modelos que, con mayor o menor complejidad, incorporan diversos parámetros físicos presentes en el desarrollo de un incendio real; los modelos de fuego simplificados se fundamentan en parámetros físicos específicos

con un campo de aplicación limitado. En un incendio de interior, la curva normalizada tiempo-temperatura para representar un modelo de fuego totalmente desarrollado está definida por:

$$\Theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Donde:

Θ_g : temperatura del gas en el sector de incendio en $^\circ\text{C}$.
 t: tiempo transcurrido en minutos.

Con esta ecuación se puede formalizar la tabla 2.1 que referencia la temperatura de los gases de incendio en función del tiempo transcurrido desde su inicio.

Tabla 2.1 Tiempo y temperaturas para la curva normalizada tiempo-temperatura de incendio confinado definida en la norma (UNE EN 1363, 2000)

Tiempo (min)	0	5	10	15	20	30	45	60	120	180	240
Temp. ($^\circ\text{C}$)	20	576	678	739	781	842	902	945	1049	1110	1153

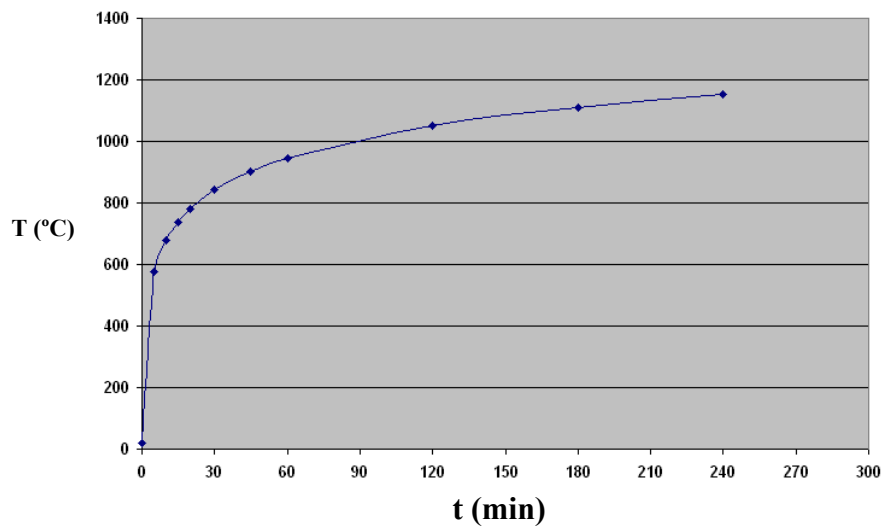


Figura 2.11 Representación gráfica de la curva normalizada tiempo-temperatura de incendio confinado definida en la norma (UNE EN 1363, 2000)

Otras referencias apuntan a diversas curvas en función de diferentes actividades o emplazamientos, véase figura 2.12.

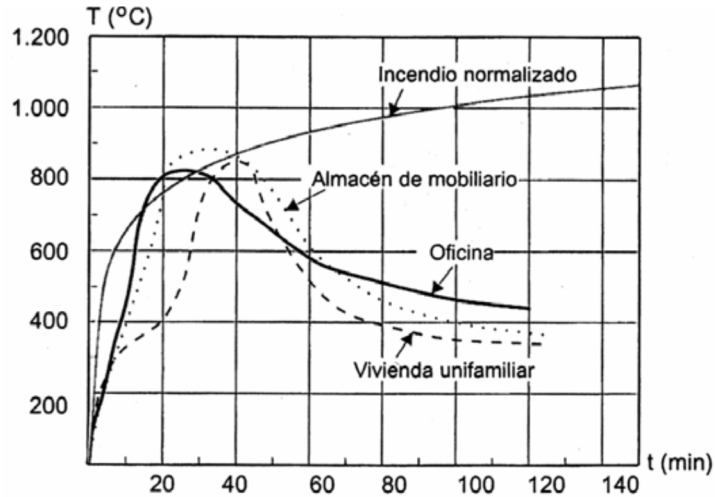


Figura 2.12 Representación gráfica de curvas tiempo-temperatura de incendio confinado en emplazamientos de diversos usos (Montonliu, 2001, pág. 40)

Puede observarse que en los primeros 10 minutos, y hasta los 30 aproximadamente, las curvas se diferencian, si bien son bastante parecidas o ajustadas, alcanzándose los 800-900°C en todas ellas entre los 30 y los 40 minutos. En este caso la velocidad de calentamiento es del orden de 27-30 °C/min.

A diferencia de la curva normalizada, para los diferentes usos, actividades o emplazamientos, tal y como se observa en la figura 2.12, aparece de forma generalizada una reducción de la temperatura que comienza a ser significativa a partir de los 60 minutos, ello es debido principalmente a los diversos factores de los que depende el desarrollo del incendio; es decir a la reducción de la cantidad de combustible, a las condiciones geométricas del recinto, efectos de ventilación y aporte de oxígeno o comburente, o la propia combustibilidad de los materiales. A excepción de la curva normalizada, en el resto de casos no se superan los 900°C, sin embargo la experiencia dicta que en los incendios reales se alcanzan temperaturas superiores de forma puntual durante el incendio.

2.4.2. Humos

Además de los efectos del calor y altas temperaturas generadas en un incendio, cabe mencionar los gases y humos producidos por la combustión.

Se consideran gases de combustión a los procedentes de la combustión completa o incompleta de los materiales combustibles, y que forman sustancias gaseosas simples, diferenciándolas de los humos, los cuales están formados por partículas de cierto tamaño derivadas de una combustión incompleta, como puede ser la carente de oxígeno. También son gases de combustión los derivados de la descomposición térmica, aunque estrictamente no sean derivados de la combustión.

El tipo de gases que se forma 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 alcanzada. La mayor parte de los materiales combustibles contienen carbono que al quemarse forma dióxido de carbono, si bien si la cantidad de oxígeno es limitada se produce monóxido de carbono. Este monóxido de carbono a elevadas temperaturas es a su vez combustible en presencia de oxígeno. Estos dos, monóxido y dióxido de carbono, unidos al vapor de agua son los gases de combustión más abundantes en los incendios.

Son menos habituales pero también están presentes el amoníaco, óxidos de azufre, ácido cianhídrico, óxidos de nitrógeno, fosgeno y ácido clorhídrico, ácidos halogenados, acroleína, dioxinas, etc. (Figura 2.13).

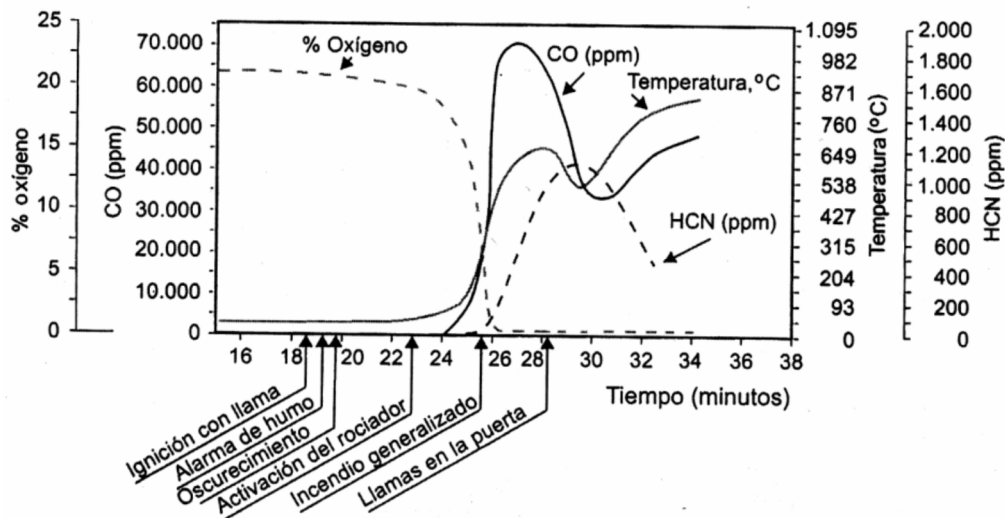


Figura 2.13 Representación gráfica de concentración de algunos gases y temperatura a un metro de altura en el incendio de la habitación de un hotel (Montonliu, 2001, pág. 56).

2.4.3. Llamas

Respecto a las 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 más interior es un cono no luminoso, compuesto por una mezcla de gas y aire a una temperatura comparativamente baja. En el segundo cono, que es luminoso, se producen hidrógeno y monóxido de carbono por descomposición, que empiezan a reaccionar con el oxígeno exterior a la llama 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.

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 (Montoliu, 2001), véase figura 2.14.

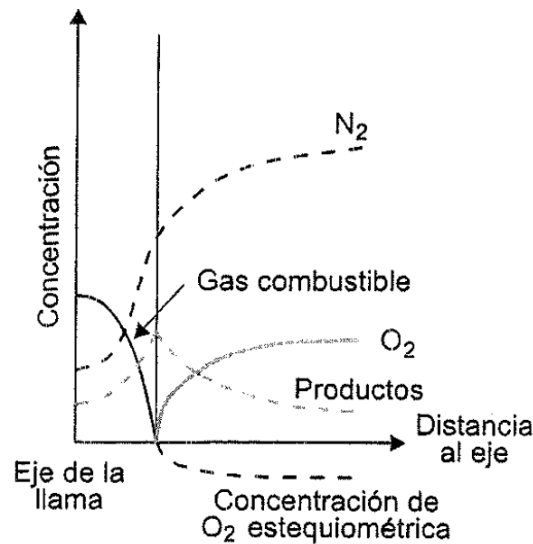


Figura 2.14 Perfil de concentración de gases en una llama (Montonliu, 2001, pág. 60)

De esta forma se puede definir que la atmósfera en el interior de la llama es reductora a consecuencia de la presencia del carbono e hidrógeno y ausencia de oxígeno, y en el exterior de la misma oxidante, con gran influencia del calor además del oxígeno atmosférico (Fristrom y Westenberg, 1965), véase figura 2.15.

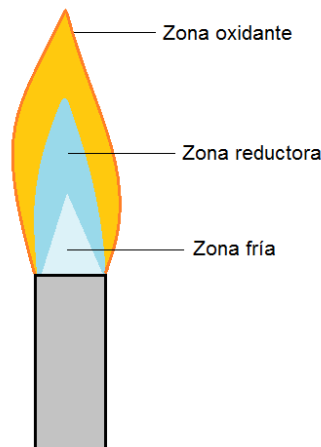


Figura 2.15 Representación gráfica de una llama en la que se indican sus diferentes zonas (imagen propia)

Los efectos de la composición de los gases que conforman la llama son visibles de forma muy significativa en la mayoría de los incendios, comprobándose que aquellas superficies metálicas, como por ejemplo de hierro o acero, sometidas a la incidencia de llamas directas, presentan en el área de afectación coloración azulada derivada de la reducción del material, y aquellas áreas exteriores, próximas a las llamas o afectadas por el calor radiado y expuestas al oxígeno atmosférico, presentan significativa coloración marrón o anaranjada que evidencia un proceso oxidativo intenso, véase figura 2.16.



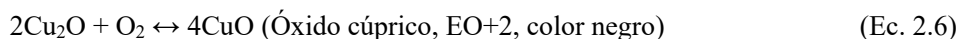
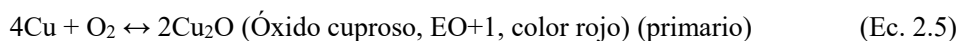
Figura 2.16 Imagen de los efectos de la aplicación directa de las llamas sobre una superficie metálica, se observan claros efectos de reducción con una coloración azulada o grisácea, viéndose afectado su perímetro por oxidación superficial, con tonalidades anaranjadas (imagen propia)

2.5. Efectos sobre materiales y sobre el cobre

Los efectos que pueden sufrir los diferentes materiales presentes en el escenario del incendio son muy variados en base principalmente a la atmósfera existente, al calor y temperaturas desarrolladas y a la forma en que este afecta al material. Pueden considerarse efectos superficiales sobre el material, o bien efectos en el interior del mismo.

A excepción de la plata, el calor y las altas temperaturas aplicadas sobre los materiales metálicos promueven o aceleran los procesos oxidativos superficiales del material, siempre y cuando se encuentren en presencia de oxígeno, es decir si nos hallamos en una atmósfera favorablemente oxidante.

El cobre es uno de ellos, y forma dos tipos de óxido según las siguientes reacciones:



Por otro lado, los efectos de la aplicación directa de las llamas sobre la superficie del conductor son los contrarios debido a la existencia de una atmósfera reductora en el seno de la misma (véase Ec. 2.1). En este caso, sobre la superficie del conductor se da

la reacción contraria, una reducción, con el mismo efecto que tendría la presencia de hidrógeno en la superficie del material.

En este caso, de existir óxido de cobre en la superficie, éste es reducido a cobre metálico, formando además agua o vapor de agua. Esta reacción comienza ya por encima de los 500°C, siendo muy rápida a temperaturas cercanas a las de fusión del cobre.

En ambos casos de atmósfera oxidante o reductora cabe destacar la existencia de difusión de gases al interior del material, preferentemente por medio del borde de grano, siendo especialmente significativo el efecto térmico sobre esta difusión.

Cuando el óxido cuproso está disuelto en el cobre y existe difusión por medio de una atmósfera reductora se produce vapor de agua a causa del proceso de reducción que puede eliminarse únicamente provocando una dislocación intergranular. El fenómeno anterior explica que el cobre calentado en una atmósfera reductora (conteniendo hidrógeno), acarrea una peligrosa fragilidad, como ya se vio, produciendo pequeñas burbujas de agua en el borde de grano.

En ambos casos el material se ve sometido a elevadas temperaturas que ocasionan transformaciones microestructurales tanto en superficie como en su interior, alcanzándose incluso la fusión del mismo al superarse las temperaturas de fusión. Estos efectos alcanzan en este caso el orden macroscópico, siendo perceptibles a simple vista fusiones, perlado, deformaciones por fluencia, oxidación o reducción de superficies.

A consecuencia del calor o las altas temperaturas, la fusión de materiales metálicos en los escenarios del incendio da información sobre las temperaturas mínimas alcanzadas de forma generalizada en diferentes puntos, si bien no aportan las temperaturas máximas, ya que estas pueden darse de forma rápida, poco sostenida, sin producir fusiones o efectos llamativos.

A nivel microestructural, los efectos son visibles por medio de diferentes técnicas analíticas. En base al crecimiento de tamaño de grano y por medio de los diagramas de fases se pueden establecer o al menos aproximar las temperaturas sufridas por determinado elemento metálico, o la atmósfera a la que se ha visto sometido en base a su composición, así como los tiempos de permanencia a determinadas temperaturas o si el enfriamiento ha sido rápido o lento.

2.6. Causas de incendios

2.6.1. El calor eléctrico

Cuando una corriente de electrones fluye a través de un medio resistivo se produce calor; este calor es originado por las colisiones (choques) de los electrones libres que se mueven por el conductor contra los átomos relativamente fijos que constituyen la estructura cristalina del medio. Dichas colisiones aumentan la energía cinética ó térmica de los átomos del conductor y por consiguiente su temperatura se eleva; cuanto más corriente fluya mayor será la cantidad de electrones y número de colisiones y por consiguiente mayor será el calor liberado.

James Prescott Joule en 1840 publicó su escrito "La producción de calor por la Electricidad Voltaica" que detallaba el resultado de sus experimentos. En base a los mismos enunció la Ley de Joule de la siguiente forma: "El calor total desarrollado en un conductor es directamente proporcional a la resistencia, al cuadrado de la corriente y al tiempo que dure el flujo de la corriente". Así se define la Ley de Joule:

$$Q = 0.239 \cdot I^2 \cdot R \cdot t \quad (\text{cal} = \text{A}^2 \cdot \Omega \cdot \text{s}) \quad (\text{Ec. 2.7})$$

La expresión de la ley de Joule nos indica por tanto que para que exista calor de origen eléctrico en un conductor debe existir una circulación de corriente eléctrica sea cual sea la forma en que ésta es creada o inducida. Existen diversas formas de transformar la energía eléctrica en calor, pero todas están basadas en el mismo principio.

2.6.2. Formas de generar calor eléctrico

En cualquier circunstancia en la que aumente la intensidad o la resistencia al paso de corriente (alterando los factores que de ellos depende; resistividad, longitud o sección) se ocasionará un aumento del calor disipado por el conductor. Cuando un conductor eléctrico se ve sometido a una intensidad superior a su intensidad nominal de trabajo, se llama al proceso sobreintensidad. Es significativo comprobar que ante un aumento de intensidad de corriente, el calor aumenta en forma cuadrática respecto a la misma.

Con la relación existente entre la tensión aplicada y la intensidad que discurre por el circuito, dada por la Ley de Ohm, en caso de existir una sobretensión en el mismo, el efecto será similar al de una sobreintensidad en todos los puntos afectados por la sobretensión.

Si sobre el conductor que pasa una corriente dada realizamos un pinzamiento en el cableado, reduciendo su sección, estamos generando un punto de mayor resistencia que

ocasionará calor. Lo mismo ocurre cuando realizamos una unión no efectiva entre conductores o puntos de contacto, donde se genera una resistencia de contacto; se trata en este caso de un punto de falso contacto o contacto defectuoso que alcanzará temperaturas muy elevadas. Se da la particularidad de que en este caso, el calor se desarrolla de forma puntual, no afectando a toda la línea eléctrica, con lo que las protecciones eléctricas compuestas por fusibles o magnetotérmicos no detectan ni subida de intensidad ni aumento de calor en su ubicación, con lo cual no actúan.

Esta situación de falso contacto llevada al límite conduce a la oscilación eléctrica y a continuación al arco serie. Éste último se consigue separando el punto de unión de los conductores por los que pasa corriente hasta la ausencia de contacto produciéndose el cebado del aire circundante a los extremos del cable seccionado y con ello arcos eléctricos, lo que vulgarmente se llama “chisporroteo”. Los arcos serie se diferencian de los arcos en paralelo en que los primeros se dan por seccionamiento o contacto de uniones en un único conductor que al separarse ocasiona entre los extremos una diferencia de potencial, y los segundos ocurren por contacto o proximidad entre conductores de diferente polaridad.

Este segundo caso es el llamado cortocircuito, ya que se produce un contacto de fases de forma previa a los elementos de consumo o resistencia. Ello ocasiona que ante la falta de resistencia circule una intensidad muy elevada por el circuito cortocircuitado además del contacto donde ocurre el arco eléctrico, viéndose afectada toda la línea por sobreintensidad. Ante esta situación, como existe una sobreintensidad en toda la línea suelen actuar las protecciones magnetotérmicas o los fusibles.

El arco eléctrico, controlado o no, es una fuente muy importante de calor. De forma estricta este arco es también una fuente de calor por resistencia, la resistencia del arco. El arco eléctrico constituye un camino conductor ya que el aire circundante está ionizado (plasma) debido a las elevadas temperaturas. Los iones que constituyen este plasma proceden de los polos entre los que salta el arco y del ambiente circundante, generalmente aire. El camino de plasma que constituye el arco se comporta como un conductor: a mayor longitud (mayor tensión) más resistencia, y a mayor sección (mayor intensidad) menos resistencia. Aunque el arco puede ser considerablemente largo, a baja tensión, varios centímetros e incluso decímetros, su sección suele ser muy pequeña, de forma que su volumen es muy escaso.

Dada su baja densidad, el arco rápidamente alcanza temperaturas muy elevadas, del orden de 7.000 a 15.000 K e incluso más (Babrauskas, 2003). Esta alta temperatura, en arcos controlados, se aprovecha para aplicaciones que requieren gran poder térmico como fusión, soldadura y corte de metales.

2.6.3. El calor en las instalaciones eléctricas, los fallos eléctricos

Todas las formas de calor producido por instalaciones eléctricas lo son por medio de sobreintensidades o aumento de la resistencia, véanse sus particularidades.

2.6.3.1. El falso contacto o contacto defectuoso

Un falso contacto o contacto defectuoso ocurre en un punto de un circuito eléctrico, instalación o equipo conectado a la red, donde no existe un contacto efectivo entre dos conductores eléctricos por los que pasa la corriente. En este contacto se genera una resistencia eléctrica que disipa calor, tanto más cuanto menos efectivo sea el contacto. En ocasiones, en condiciones límite, se genera la situación de oscilación eléctrica en la que se produce un arco eléctrico entre los conductores. En el punto de contacto eléctrico entre dos conductores se genera una interfase que posee unas características físicas propias en cuanto a su resistencia y conductividad. Esta interfase la podemos considerar como si intercalásemos un material conductor diferente en el camino de la corriente. El valor de la resistencia en la superficie de contacto será mucho mayor que la del conductor y dependerá de los materiales puestos en contacto y de su estado de degradación superficial, de la temperatura que alcance el contacto defectuoso, de la rugosidad de las superficies en contacto, y de la dureza y la presión del contacto (véase figura 2.17).

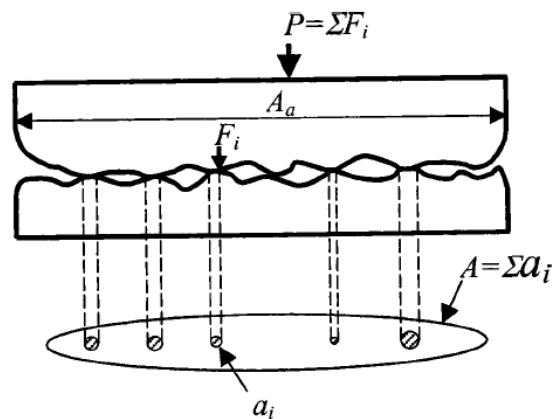


Figura 2.17 Esquema que representa la superficie efectiva de contacto de dos conductores con cierta rugosidad (Kogut y Komvopoulos, 2003)

La figura 2.18 muestra el aumento del valor de la resistencia con el tiempo. Como se puede ver, el cambio de la resistencia no es significativo hasta un cierto punto en el tiempo donde la degradación aumenta rápidamente. Ello indica que la degradación debida al falso contacto hace aumentar de forma brusca los efectos del mismo; y que ésta ocurre tras largos periodos de tiempo en funcionamiento.

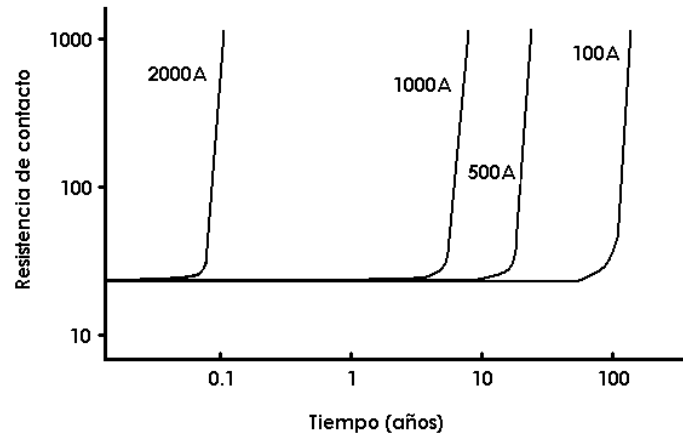


Figura 2.18 Variación de la resistencia de contacto con el tiempo a diferentes intensidades (Williamson, 1968)

En un circuito en el que se da un punto de falso contacto, el aumento de la resistencia del circuito debido a éste es despreciable frente a la resistencia total del mismo, con lo que no variará la intensidad que pasa por él y sí ocasionará en el punto de resistencia de contacto un calentamiento cuadrático respecto a la misma intensidad que está circulando. Este fallo por falso contacto es puntual, se genera un calor muy localizado y sólo en una de las fases o conexiones. No genera sobrecalentamiento en la línea, ni aumento de la intensidad de corriente o derivaciones de forma inicial que puedan hacer saltar las protecciones eléctricas. Se da en puntos de unión, figura 2.19, como bornas, embarrados, empalmes, fichas de conexión, enchufes o conectores deficientemente enchufados, en ladrones o cajas multienchufe, etcétera.

De forma muy común los falsos contactos tardan desde horas hasta meses en manifestarse y ser detectados. La generación de calor suele ser lenta pero progresiva, los materiales plásticos van perdiendo poco a poco sus cualidades físicas siendo cada vez más fácil que entren en ignición. Si el contacto es muy leve, la velocidad de calentamiento es mayor. Se da un calentamiento difícilmente detectable hasta que ocurre alguna avería eléctrica, normalmente por cortocircuito.

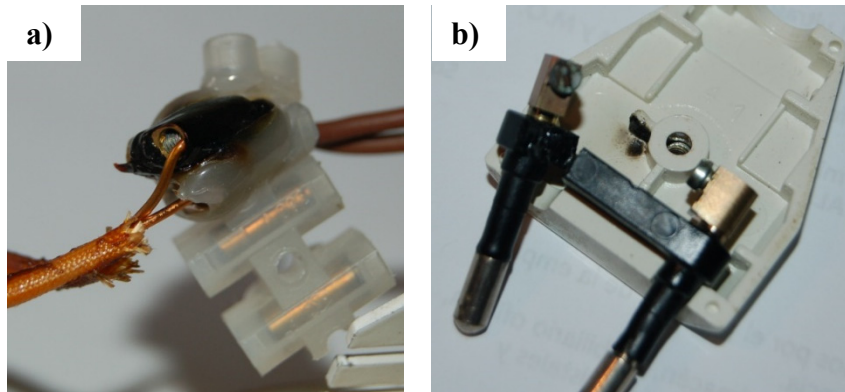


Figura 2.19 Falsos contactos en instalaciones de uso común en viviendas **a)** en una ficha de conexión **b)** en un enchufe (imagen propia)

Un falso contacto también puede producir oscilación eléctrica en el punto de resistencia y en un caso extremo el fallo de una de las fases. Si este falso contacto tiene materiales plásticos a su alrededor estos van a degradarse, perdiendo sus propiedades lentamente.

2.6.3.2. Pinzamiento y reducción de sección

En este caso tenemos un pequeño segmento de una instalación o línea eléctrica en la que existe una disminución de sección, normalmente debida a agresiones externas. Dado que esta sección es inversamente proporcional a la resistencia, con el paso de corriente se crea un punto caliente. Un caso particular de esta circunstancia se da cuando en una conexión no se fija bien un cableado, por ejemplo al fijar un número reducido de hilos de un cable multifilar, figura 2.20.

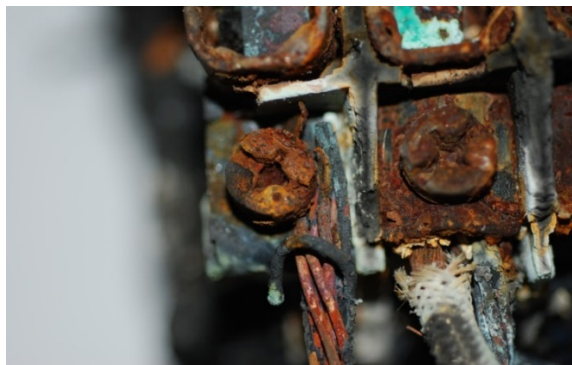


Figura 2.20 Punto de unión con reducción de sección para el paso de corriente en la conexión de un motor, en el incendio de una industria (imagen propia)

2.6.3.3. La oscilación eléctrica y el arco serie

La oscilación eléctrica normalmente se produce como consecuencia de una situación límite de falso contacto o pinzamiento. Antes de que ocurra un incendio se puede detectar porque el cableado o unión no está fija, se produce un arco eléctrico serie que emite cierto zumbido, calor y olor desagradable. Debido a las elevadas temperaturas los materiales aislantes circundantes se destruyen pudiendo entrar en combustión.

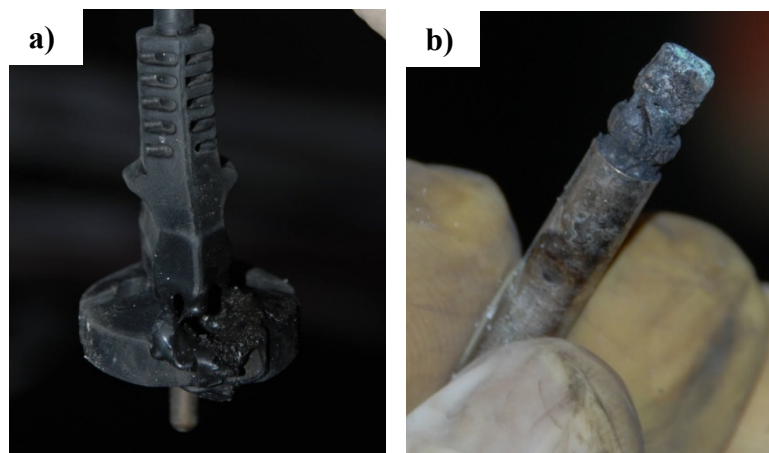


Figura 2.21 Restos del enchufe de un aspirador industrial que ocasionó un incendio en un local comercial **a)** enchufe **b)** clavija desprendida del enchufe de alimentación (imagen propia)

El arco serie se da cuando la conexión o el circuito se interrumpen produciéndose normalmente pequeños arcos sostenidos por la ionización del aire circundante. En la figura 2.21, el arco serie se da en el interior del enchufe ocasionando en primer lugar su degradación y en segundo lugar la ignición del material plástico aislante. Estos arcos, debido a las altas temperaturas que generan, arrancan material metálico de los extremos de los conductores, produciendo fusiones de material conductor redondeadas.

2.6.3.4. Cortocircuito o arco paralelo

Un cortocircuito ocurre al poner en contacto dos fases de diferente polaridad, dándose el caso de que se da una situación límite de extrema disminución de resistencia y el consecuente aumento de intensidad al mantenerse constante la tensión aplicada. Normalmente ocurren a consecuencia de agresiones externas, por contacto entre fases por medio de objetos ajenos a la instalación o por contacto directo o proximidad del alma de cobre de las propias fases. Suelen ser debidos a fallos en el aislamiento, si bien lo más normal es que sean consecuencia de otras patologías eléctricas o de la afectación por las llamas de forma externa. Normalmente los cortocircuitos son consecuencia del

calentamiento del cableado producido por otro tipo de avería eléctrica o bien a causa del incendio.

El arco eléctrico causa la fusión de los conductores donde se da debido a las altas temperaturas que desarrolla; pudiendo ocasionarse otros arcos sobre elementos puestos a tierra. Las fuerzas magnéticas que se producen entre los conductores tienden a separarlos, y el arco ocasionado tiende a alejarse de la fuente de alimentación. Cuando ocurre una secuencia de cortocircuitos el primero que ocurre siempre es el más alejado a la fuente de alimentación, *arc mapping*. Sobre los conductores afectados se evidencian fusiones y/o perlado de cobre, que en ocasiones son acompañadas de proyecciones de material. También se producen muescas, mordeduras, perforaciones, arañazos, y en la mayoría de los casos seccionamiento, véanse figuras 2.22 y 2.23.



Figura 2.22 Cableado de cobre multifilar seccionado con perlado, a consecuencia de un cortocircuito en el cuadro eléctrico de un bar que sufrió un incendio (imagen propia)



Figura 2.23 Cableado unifilar seccionado con perlado, a consecuencia de un cortocircuito en el cuadro eléctrico de una vivienda que sufrió un incendio (imagen propia)

Cabe distinguir entre un cortocircuito primario y cortocircuito secundario. El primero de ellos es un cortocircuito causante de un incendio, que ocurre inmediatamente antes de originarse el incendio, debido al contacto entre fases, o entre fases y neutro; ello se puede producir bien por una degradación mecánica del aislante o bien por una degradación previa a consecuencia de otro tipo de averías eléctricas. El segundo es un cortocircuito consecuencia del incendio, es decir, que el calor y las llamas que afectan a la instalación producen la degradación térmica del aislante de los conductores y a consecuencia de ello el cortocircuito. Diversos autores denominan a unos y a otros “Cause” y “Victim” (Babrauskas, 2004), y a las marcas o fusiones que estos producen “Primary Molten Marks (PMM)” y “Secondary Molten Marks (SMM)” (Lee et al, 2002).

2.6.3.5. Derivaciones o corrientes de fuga

Una derivación o corriente de fuga sucede cuando una fase en tensión entra en contacto con una parte de la instalación eléctrica puesta a tierra por donde se deriva la corriente. Suelen ocurrir en lugares en los que existen aristas cortantes, principalmente en equipos móviles o maquinaria sometida a vibraciones las cuales pueden dañar el aislante plástico del cableado. Ocurre que en el punto de derivación existe una resistencia de contacto donde se producen las temperaturas más altas e incluso arcos eléctricos que desembocan en fusiones en el conductor de cobre mostrándose mordidas o incluso seccionamiento, figura 2.24.



Figura 2.24 Cableado y arista cortante seccionados en un punto de derivación en una máquina calcinada (imagen propia)

Este hecho ocurre con cierta asiduidad en vehículos, donde el borne negativo de la batería es el propio chasis, con lo que entrando en contacto algún elemento del borne positivo, derivado de la batería a los elementos de consumo con el chasis, se genera una situación de cortocircuito por derivación a masa, descargando la batería rápidamente con una generación de calor muy elevada por sobreintensidad en todos los elementos de la instalación afectada. Particularmente se ve afectado el punto de derivación al ser un punto de resistencia.

2.6.3.6. Sobreintensidad

Existen muchas circunstancias por las que puede existir una sobreintensidad, ya que esta ocurre cuando sobre un conductor pasa más corriente de la que el mismo puede soportar, figura 2.25. Un ejemplo muy típico es el de las sobrecargas de alimentación, en el que un elemento añadido a la instalación eléctrica no soporta el consumo de diferentes aparatos conectados a la misma. Véanse las cajas multienchufes, ladrones o cables alargadores con reducida sección y exceso de consumo, todos ellos son causa habitual de incendios. Además de estas sobreintensidades, una línea eléctrica se puede ver afectada por una sobreintensidad causada por el aumento de la tensión de alimentación o bien la presencia de armónicos en la red. En todos estos casos los efectos son los mismos; un calentamiento en toda la línea eléctrica de menor sección y afectación puntual en las ubicaciones de mayor resistencia, tal como uniones y empalmes.



Figura 2.25 Recreación de una sobreintensidad en un cableado eléctrico (imagen propia)

2.6.3.7. Sobretensión

El resultado de una sobretensión es una sobreintensidad muy corta que afecta a toda la instalación, si bien la misma es normalmente un defecto del suministro viéndose afectadas todas las instalaciones alimentadas. Normalmente no se trata de averías o fallos

que se prolongan en el tiempo sino que se deben a subidas de tensión puntuales que producen daños en la instalación y aparatos eléctricos conectados a la red de suministro. Principalmente derivan en averías más graves, sobre todo si las subidas se repiten en el tiempo. Son más comunes en zonas en las que existe exceso de demanda puntual, y donde existen desconexiones y rearmes de la instalación. Algunos ejemplos son los producidos por neutro flotante, o las sobretensiones producidas por el rearme de transformadores o equipos eléctricos de elevada potencia.

2.6.3.8. *Armónicos*

Una tensión armónica es una tensión senoidal cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación. Si la señal solo tiene el armónico de orden 1, se trata de la onda fundamental, siendo una senoide limpia. Por el contrario a medida que se van sumando armónicos de distinto orden, la señal se va alejando de lo que es una senoide, deformándose. Decimos, por tanto que una señal contiene armónicos cuando su forma de onda difiere de la senoidal. Los armónicos se generan debido a cargas no lineales, es decir, cargas con una impedancia que no es constante, por lo que al aplicarles una tensión senoidal, la corriente absorbida no lo es. Las cargas generadoras de corrientes armónicas más comunes se encuentran en los receptores que incorporan electrónica de potencia, como todo tipo de rectificadores, convertidores, variadores de velocidad para la regulación de motores, lámparas de descarga y fluorescentes, baterías de condensadores utilizados por la compensación del factor de potencia de las instalaciones, fuentes de alimentación de equipos electrónicos (todo tipo de cargadores de baterías, grandes y pequeñas).

Los armónicos ocasionan principalmente un efecto de calentamiento adicional al causado por la corriente de la onda fundamental, sobre los conductores, bobinados de transformadores, motores, etc. Producen también calentamiento por efecto skin, que provoca que con la elevación de la frecuencia la resistencia del conductor se eleve, calentamiento por efecto proximidad, provocado por los campos magnéticos inducidos mutuamente en los conductores situados juntos, pérdidas dieléctricas en condensadores y circulación de grandes corrientes por el neutro incluso con equilibrio de cargas, figura 2.26. Los armónicos pueden ser producidos por el usuario afectado por un incendio o provenir del exterior de su instalación, ser ajenos a él.



Figura 2.26 Conductor neutro afectado por una sobreintensidad en un incendio (imagen propia)

2.6.3.9. Perforación de dieléctricos en condensadores

Ocasionados principalmente por defectos internos o bien por la presencia de armónicos en la red. Puede ocurrir que alguna de las frecuencias armónicas expuestas anteriormente coincida con la frecuencia de resonancia de las baterías fijas de condensadores utilizadas para la mejora del factor de potencia, lo cual amplifica esta señal armónica produciendo daños e incluso la destrucción de los condensadores de la batería. Pueden producir una explosión. El calentamiento excesivo por efecto de las sobretensiones provocadas por la existencia de armónicos en la red puede provocar además el fallo en el dieléctrico de los condensadores, llegando a perforarlos, figura 2.27.

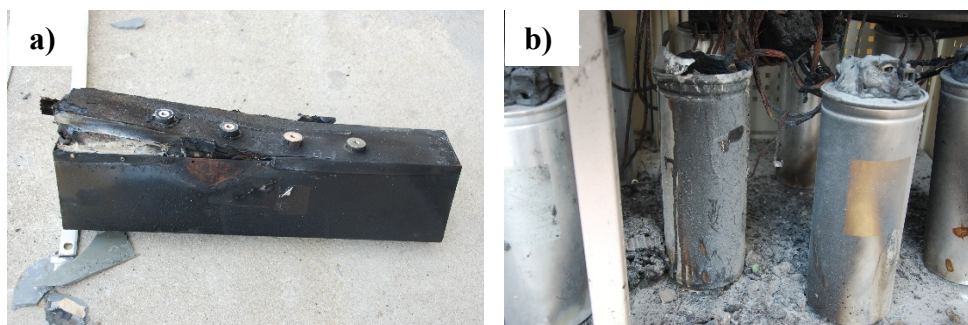


Figura 2.27 Condensadores averiados, ambos causando sendos incendios en equipos de electrónica de potencia **a)** con perforación interior **b)** con efectos de sobrepresión (imagen propia)

2.6.3.10. *Inducción*

Las corrientes inducidas son las que aparecen en los cuerpos eléctricamente conductores situados bajo la acción de un campo magnético variable. Las pérdidas por inducción son también llamadas corrientes de Foucault o turbillonarias. Si bien las fuerzas electromotrices inducidas son pequeñas, las corrientes turbillonarias pueden ser muy intensas. Debido a la existencia de tales corrientes, todas las piezas metálicas que se mueven en el seno de campos magnéticos suelen ser laminadas, pues la capa de óxido entre las láminas basta para evitar o debilitar la circulación de las corrientes turbillonarias.

Este efecto tiene su aplicación práctica en los hornos eléctricos de inducción, que por medio de corrientes alternas de alta frecuencia llegan a fundir el metal por medio del calentamiento generado por las rápidas y fuertes variaciones de flujo que inducen corrientes y en consecuencia efecto Joule. Pueden inducirse corrientes en cableados paralelos.

2.6.3.11. *Calentamiento de transformadores*

Un transformador aprovecha la propiedad anterior para generar campos magnéticos y de ellos generar corriente disipando calor por las pérdidas existentes.

2.6.3.12. *Histéresis*

Calor generado mediante histéresis magnética. Es el calor producido por la imantación y desimantación sufrida por el metal imantado al sufrir campos magnéticos de forma alterna (esta histéresis está relacionada con la inducción). Mediante histéresis dieléctrica, al aplicar un campo eléctrico a una masa de material dieléctrico las moléculas de este material se orientan dando una nueva distribución. El movimiento incesante causa debilidad en el dieléctrico que según en qué casos producirá mucho calor.

2.7. Consideraciones sobre el estado del arte

La investigación de los efectos de arcos eléctricos sobre cableado en los incendios es compleja, principalmente debido al escaso control sobre las innumerables variables existentes en los incendios reales. Ello produce que entre los diferentes autores no exista un consenso que defina un método o una base experimental; son pocos los que aíslan alguna de las variables de interés para su estudio.

En el presente caso el estudio se realiza sobre cableado de cobre, dado que este es el más común en las instalaciones eléctricas, valorando dos tipos, unifilar y multifilar, por ser, de igual forma, los usados convencionalmente. No se considera la sección nominal del cableado por no ser esta una variable que aporte información adicional como se verá más adelante.

Tampoco es una variable de interés las diferentes formas en que se pueden producir fallos eléctricos que originan los incendios, puesto que el hecho más común es que sea cual sea la avería primigenia, ésta comienza por dañar el aislante plástico de los conductores, produciendo el cortocircuito denominado primario o causante del incendio, el cual se evidencia por medio de una serie de marcas o fusiones en los conductores.

A la hora de estudiar los cortocircuitos existentes en un incendio cabe tener muy en cuenta la dinámica seguida por el fuego. Durante la fase inicial del incendio la atmósfera está limpia de gases, encontrándose la reacción de combustión dominada por el combustible y su capacidad de propagación, existiendo un exceso de oxígeno. En fases posteriores, el oxígeno es consumido y la reacción de combustión pasa a estar dominada por la cantidad de comburente existente en el recinto afectado. De esta forma un cableado eléctrico existente en el escenario de un incendio se verá afectado de diferente forma en función de si el mismo origina el incendio o bien si se ve afectado por las llamas una vez el fuego ha evolucionado.

En el caso de que el cableado se vea afectado por un incendio de forma externa, en su fase inicial se encontrará alejado del punto de origen del incendio; en cualquiera de los casos el cableado estará inicialmente protegido por su funda plástica aislante, normalmente de PVC. Una vez se ve alcanzado por el calor desarrollado por el incendio, a temperaturas relativamente bajas, a partir de 240°C (Amstrong, 1999), su funda plástica se verá desprendida, quedando al aire el alma de cobre de los conductores.

Existen en este caso dos posibles escenarios, que el cableado no esté energizado, no tenga tensión, o que sí tenga tensión.

En el caso de que no esté energizado, los conductores de cobre se verán afectados por el calor de forma inicial, lo que favorecerá la oxidación superficial y determinadas transformaciones metalográficas a consecuencia del calor recibido y de la atmósfera oxidante. Con posterioridad, es muy posible que el conductor se vea afectado por la acción directa de las llamas al avanzar el incendio durante un periodo de tiempo limitado, lo que aporta, como ya se indicó una atmósfera de carácter reductor.

En el caso de que el cable esté energizado, tenga tensión, al perderse la funda aislante protectora a consecuencia del incendio, el cobre se verá expuesto a una oxidación superficial a consecuencia del calor del incendio, llegando un momento en el que en algún punto del cableado se producirá contacto entre fases generándose un cortocircuito de carácter secundario, acompañado de arco eléctrico. Este arco genera temperaturas muy elevadas de carácter puntual provocando lesiones muy localizadas en el conductor, tales como perlado por fusión. El enfriamiento de estas fusiones será lento al verse sometido de forma continua al incendio. Posteriormente el conductor, al igual que ocurriera en la anterior caso, incluyendo las lesiones producidas por el cortocircuito, se verán afectadas por el alcance de las llamas, es decir, altas temperaturas y atmósfera reductora.

Por el contrario, si consideramos que determinado cableado es el causante del incendio por medio de la causa que sea, produciendo un cortocircuito primario en la fase inicial u origen del incendio, obtendremos en primer lugar lesiones por arco eléctrico iniciales, con formación de perlado o fusiones y una posterior inclusión en el interior de la llama al encontrarse en el punto de origen, lo que supone una atmósfera reductora. A continuación el cableado se verá afectado por condiciones oxidantes al propagarse y desarrollarse el incendio a su alrededor.

De esta forma, dentro de la variabilidad o circunstancias en que se puede desarrollar un incendio, si consideramos la afectación sobre cableado eléctrico existen dos posibles circunstancias ambientales que definen condiciones diferenciadas para cortocircuitos primarios y secundarios, y que resultan de interés para la presente tesis.

Capítulo 3

Planificación de la investigación

En esta investigación se aborda el estudio de los efectos de arcos eléctricos producidos por cortocircuito, en la microestructura y propiedades mecánicas de conductores eléctricos de cobre, con el objeto de contribuir al conocimiento actual utilizado como base en la investigación de incendios, donde como se ha comentado anteriormente, éstos conductores tienen una participación comprobada. De forma global, la planificación de la investigación se ha estructurado en fases, que de manera secuencial permiten alcanzar los objetivos planteados a través de la realización de una serie de etapas y actividades experimentales. El detalle de las actividades contempladas en cada fase de la investigación, así como su secuencia se muestra en este capítulo. En la figura 3.1 se muestran las seis fases que contempla la planificación de esta investigación.

Se comienza con la selección y caracterización de los conductores eléctricos de cobre objeto de estudio. Dada la gran cantidad de tipos y geometrías que existen en los conductores eléctricos de cobre, se hace imprescindible seleccionar aquellos que sean más representativos y que se han encontrado como elemento clave en la investigación de siniestros de tipo residencial e industrial, entre ellos se utilizarán aquellos cuyos diámetros (geometría) sea más común. De los conductores en estado de entrega es necesario evaluar su microestructura y determinar sus propiedades mecánicas, con la finalidad de utilizar esta información como base y como patrón para los posibles cambios que se generan en ellos, bien sea por que han sido causa o consecuencia del siniestro. En una segunda fase se evaluará la influencia que tiene la temperatura, tiempo de exposición y atmósfera en los cambios microestructurales y en las propiedades mecánicas de los conductores, con esto se busca obtener información contrastada y técnica que sirva de base para discriminar los efectos de cada una de estas variables.

En la tercera fase de la investigación se plantea desarrollar un montaje experimental que permita controlar variables como la temperatura, el tiempo y las condiciones ambientales o atmósfera, en combinación con la ejecución de cortocircuitos controlados. En esta fase se ha invertido no sólo bastante tiempo, sino importantes recursos económicos en equipamiento para lograr controlar las variables que se estudian y que se han considerado como principales en los incendios donde se vieron involucrados conductores eléctricos de cobre. Se obtendrá entonces muestras de cables sometidos a cortocircuitos primarios simulando una secuencia ambiental de atmósferas reductora/oxidante, y cables sometidos a cortocircuitos secundarios simulando una secuencia ambiental de atmósferas de oxidante/reductora. En todas estas simulaciones de eventos se controlará tanto la temperatura como los tiempos de exposición de los conductores simulando el desarrollo del incendio.

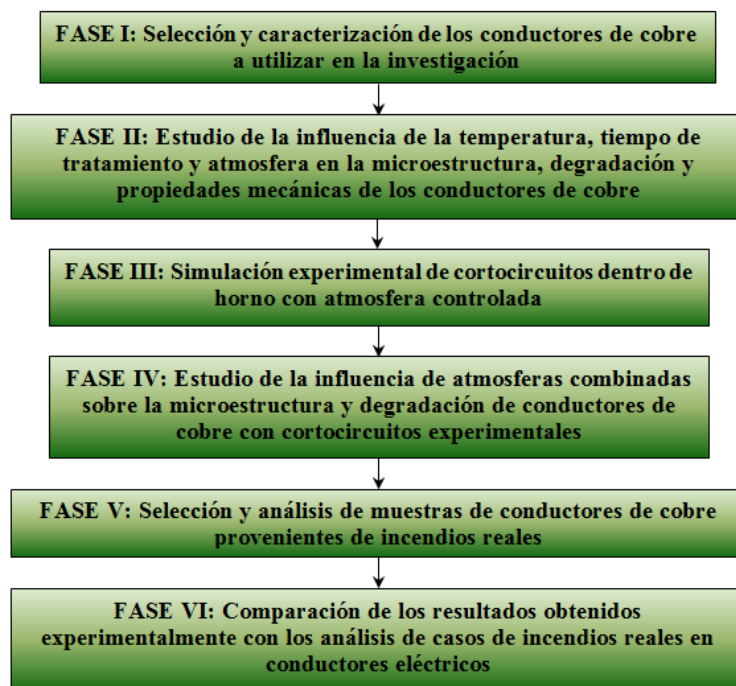


Figura 3.1 Flujograma de las fases contempladas en la investigación

Con la finalidad de obtener muestras reales de conductores de cobre involucrados en incendios, se seleccionarán en la fase V, casos reales de estudio provenientes de experiencias previas donde se ha participado como investigador o perito profesional en la investigación de las causas de incendios.

Por último, en la fase VI se pretende correlacionar los cambios microestructurales, posibles efectos y degradación observados en las muestras experimentales, con lo observado en las muestras de casos reales, con la finalidad de poder explicar de manera técnica y con base científica los posibles eventos que se han sucedido en el siniestro y discriminar si los conductores eléctricos han sido la causa o la consecuencia del mismo. En los siguientes apartados se detalla las actividades que involucra cada fase.

3.1. Fase I: Selección y caracterización de materiales de partida

La primera tarea a realizar en esta fase es la selección de los materiales a utilizar en la investigación. Se ha seleccionado cables del tipo alambre unifilar (H07V-U) y multifilar (H07Z1-K) con una sección transversal de 2.5 mm^2 , este tipo de conductores son de los más empleados en instalaciones eléctricas, en las cuales se presenta la mayor frecuencia de eventos de incendios, como se comentó en la sección 1.1. Una vez seleccionados y adquiridos en cantidad suficiente estos conductores, se cortarán muestras de los mismos en estado de entrega del fabricante y se le realizará un análisis microestructural mediante microscopía óptica. Así mismo se medirá la microdureza en la sección transversal de los conductores y se realizará ensayos de tracción uniaxial para determinar sus propiedades mecánicas (límite elástico, alargamiento y resistencia máxima). En la figura 3.2 se recopila la secuencia de actividades contempladas en la Fase I. Los equipos y metodología experimental a utilizar para estas actividades se detallarán en el capítulo 4.

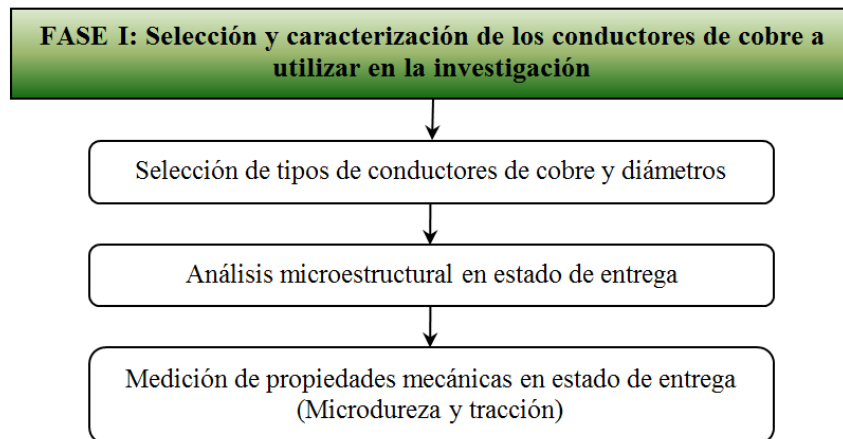


Figura 3.2 Flujograma de la fase I de la investigación

3.2. Fase II: Estudio de la influencia de la temperatura, tiempo de tratamiento y atmósfera en la microestructura, degradación y propiedades mecánicas de los conductores de cobre

Como se comentó en el primer capítulo de esta tesis, existe una marcada influencia de la temperatura y la atmósfera presente en un incendio sobre la microestructura y las propiedades mecánicas de los conductores de cobre. La secuencia de actividades planeadas en esta fase se muestra en la figura 3.3.

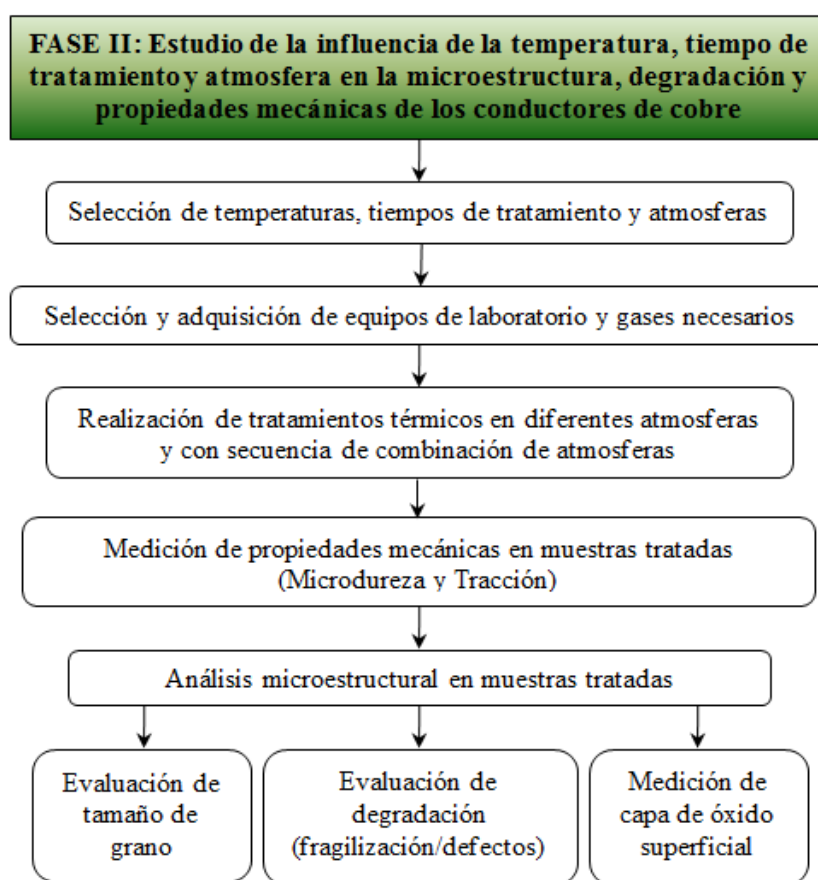


Figura 3.3 Flujograma de la fase II de la investigación

En esta segunda fase se pretende estudiar ésta influencia y para ello se debe fijar como variables de estudio la temperatura, el tiempo de exposición y la atmósfera que rodea los conductores eléctricos. Una vez seleccionados los niveles de estas variables, se

someterán diferentes muestras a tratamientos en un horno de atmósfera controlada para luego, a través de ensayos mecánicos de micro-indentación y de tracción uniaxial, determinar sus propiedades mecánicas. También se analizará la microestructura obtenida en los conductores de cobre tratados, con la finalidad de evaluar el tamaño de grano, la fragilización o posibles defectos que se generen, así como la medición de la capa de óxido que se pudiese producir.

3.2.1. Selección de temperaturas y tiempo para el tratamiento térmico en horno de los conductores de cobre

Para considerar un rango amplio de temperaturas que permitan estudiar la influencia de esta variable en los cambios microestructurales de los cables de cobre, se debe tener en cuenta, no solo la temperatura de fusión del cobre, 1083°C, sino también la temperatura de fusión del eutéctico Cu-O, 1065°C, (Clarke, 2006), además hay que considerar el rango de temperaturas a que pueden estar expuestos los conductores en casos de incendios reales. Por debajo de 500°C no hay cambios significativos en la microestructura de cables de cobre sometidos a arcos eléctricos primarios (Zhang and Deng, 2013), mientras que otros autores evalúan temperaturas hasta los 1000°C con tiempos de permanencia en el horno de 10 y 30 min y tres diferentes métodos de enfriamiento (Wei, 2011). Otro aspecto a tener en cuenta es la temperatura de recristalización del cobre que se encuentra entre 600 y 700°C. Con esta información puede plantearse el estudio a diferentes temperaturas y tiempos de exposición.

En cuanto a las temperaturas que se pueden alcanzar en un incendio, tal como se comentó en la sección 2.4.1, es muy difícil determinar un rango, debido a la complejidad de materiales, gases, combustibles y circunstancias que involucra este tipo de eventos. Sin embargo, existen publicaciones que tratan sobre la dinámica del fuego y el comportamiento de la temperatura en función del tiempo en casos reales, así como en incendios simulados. En la Figura 2.12 se mostró la evolución de la temperatura para cuatro tipos de incendios, tres reales y uno simulado (incendio celulósico normalizado de acuerdo a ISO 384). De esta gráfica se deduce que en los incendios típicos reales (almacén, oficina y viviendas), la temperatura puede alcanzar entre 800 y 900°C por lapsos de tiempos entre 10 y 20 minutos; también se puede obtener la velocidad de calentamiento para obtener estas temperaturas, que oscilan entre los 22.5 y 30 °C/min. La experiencia demuestra que en los incendios reales se alcanzan incluso temperaturas superiores, del orden de los 1000 °C; temperatura muy agresiva y considerada límite para observar efectos sobre el conductor de cobre, así mismo es empleada por otros autores.

Con esta información se plantea el estudio de dos niveles de temperaturas, inferiores a la temperatura de fusión del eutéctico Cu-O (1065°C). 800 °C, que muestra los efectos térmicos más significativos sobre el cobre, y se encuentra entre los valores de las curvas normalizadas; y 1000 °C, como situación extrema de ocurrencia en incendios reales. Se plantean también dos niveles de tiempo de permanencia a estas temperaturas

de 20 y 120 minutos, considerados en función de los tiempos normales de actuación de los Bomberos en un incendio convencional y de la curva normalizada. En la tabla 3.1 se resumen las combinaciones de temperatura-tiempo o niveles a estudiar.

Tabla 3.1 Niveles de Temperaturas y tiempos a estudiar

Niveles	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Velocidad de calentamiento (°C/min)
1	800	20	30
2	1000	20	
3	800	120	
4	1000	120	

3.2.2. Selección de atmósferas para el tratamiento térmico en horno de los conductores de cobre

En cuanto a las atmósferas a estudiar, se puede considerar desde una atmósfera inerte (bajo vacío), una atmósfera de aire convencional, hasta atmósferas oxidantes y reductoras, ya que como se comentó en la sección 2.4.2, en un incendio se pueden generar gases de combustión que propician diferentes tipos de atmósferas, y que afectan a los conductores de cobre. Una situación típica de atmósferas es la presencia de atmósfera oxidante con presencia de oxígeno en el frente de llama, o una atmósfera reductora en el seno de la misma. Este tipo de combinación de atmósfera ha sido constatada con el registro de la concentración de algunos gases y temperaturas a un metro de altura en un incendio de una habitación de un hotel, figura 2.13, y también expuesta por algunos autores (Ettling 1978, Anderson 1977).

También es conocido que tras la ocurrencia de un cortocircuito (causa) o con anterioridad al mismo (consecuencia), el conductor eléctrico de cobre estará sometido a diversas combinaciones de atmósferas, por lo que es conveniente evaluar tanto la combinación de atmósferas reductoras/oxidantes, como las oxidantes/reductoras, para evaluar el caso en el cual el conductor es atacado primero por las llamas y después por la evolución del incendio o bien en caso en el que el conductor es afectado por el frente de llamas y posteriormente por la llama en sí. Así pues, para evaluar los cambios microestructurales de los conductores de cobre se evaluará también la variable ambiental o atmósfera, generando durante el tratamiento térmico atmósferas de: bajo vacío, aire estático, y combinaciones entre atmósferas oxidante y reductora, manteniendo siempre el tiempo total de exposición en 20 minutos para un grupo de ensayos y 120 minutos para el otro grupo.

La definición de atmósferas a utilizar se detalla, a modo de resumen, en la tabla 3.2. Se ha decidido emplear como gas para la atmósfera reductora el gas Varigon H5, ya que

tiene un bajo contenido de hidrogeno y alto contenido de argón que es seguro para las altas temperatura a utilizar y además está disponible en el Instituto de Tecnología de Materiales. Para el caso de las atmósferas ricas en oxígeno (oxidante) se empleará un aire sintético con calidad de laboratorio y composición química próxima al aire común, con la finalidad de que los resultados sean reproducibles a nivel de laboratorio y simular el aire presente en la atmósfera, este gas ha sido necesario adquirirlo. Las características y composiciones de los gases a emplear para las atmósferas se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.2 Combinación de atmósferas y tiempos para los tratamientos térmicos

Ensayo	Descripción de atmósferas y tiempos
Bajo vacío	Calentamiento a dos temperaturas (800 y 1000 °C) durante dos tiempos diferentes (20 y 120 min) c/u, en atmósfera de bajo vacío (-0.10 MPa) enfriamiento en horno
Aire estático	Calentamiento a dos temperaturas (800 y 1000 °C) durante dos tiempos diferentes (20 y 120 min) c/u, en atmósfera de aire estático y enfriamiento en horno
Reducción/Oxidación	Calentamiento a dos temperaturas (800 y 1000 °C) durante dos tiempos diferentes (20 y 120 min) c/u, en atmósferas de reducción seguida de oxidación (mitad del tiempo en c/u)
Oxidación/Reducción	Calentamiento a dos temperaturas (800 y 1000 °C) durante dos tiempos diferentes (20 y 120 min) c/u, en atmósferas de oxidación seguida de reducción (mitad del tiempo en c/u)

Tabla 3.3 Composición química de gases, presión y caudal para cada atmósfera

Atmósfera	Gas	Composición química	Presión (MPa)	Caudal (L/min)
Bajo vacío	Aire	78%N ₂ 21%O ₂ 1%Ar	-0.10	0
Aire estático	Aire	78%N ₂ 21%O ₂ 1%Ar	0	0
Oxidante	Aire sintético rico en O ₂	70%N ₂ 30%O ₂	0	3
Reductora	Mezcla de gases	95%Ar 5%H ₂	0	3

3.3. Fase III: Simulación experimental de cortocircuitos dentro de horno con atmósfera controlada

La tercera fase contempla el diseño de un circuito eléctrico que permita realizar cortocircuitos eléctricos sobre muestras de conductores de cobre dentro de un horno de atmósfera controlada, donde se pueda evaluar la influencia de las variables temperatura, tiempo y atmósferas, pero ahora sobre la zona del cable donde se ha generado la descarga eléctrica. Con esto se pretende simular secuencias de cortocircuito como los ocurridos en un incendio, que pudiesen ser la causa de un siniestro (cortocircuito primario) o la consecuencia del mismo (cortocircuito secundario). Las actividades que contempla esta fase se muestran en la figura 3.4.

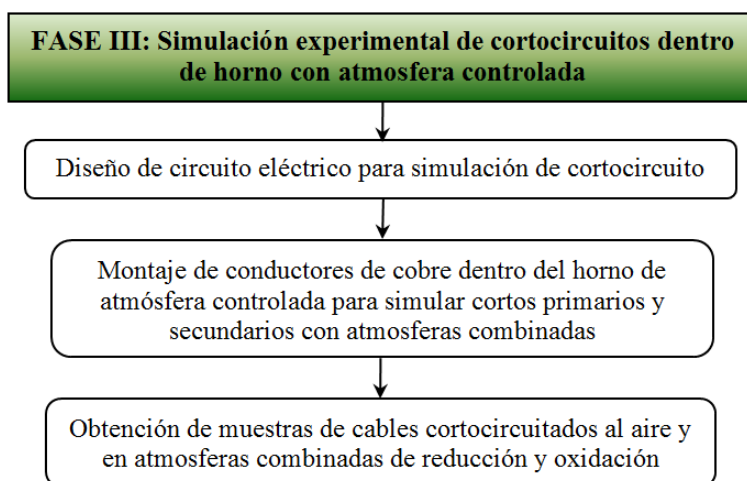


Figura 3.4 Flujograma de la fase III de la investigación

A continuación se detalla la planificación realizada para simular los cortocircuitos, así como la selección/combinación de atmósferas y tiempos que permitan reproducir (en la medida de lo posible) las condiciones que se dan en un incendio.

3.3.1. Cortocircuito simulado al aire

Para la realización de estos ensayos se tomarán muestras de alambre unifilar (H07V-U) y multifilar (H07Z1-K) ambos de 2.5 mm² de sección a los cuales se retirará su aislante plástico (cables desnudos), a continuación se someterán a un cortocircuito mediante una fuente de corriente continua (12V y 740A). Las muestras se cortocircuitarán colocando en contacto los extremos de los cables y cerrando el circuito durante unos 2 segundos mediante un interruptor de contacto simple para permitir el paso de la corriente. Tras ello se tomarán muestras de la sección transversal y la sección longitudinal de los conductores para la evaluación microscópica.

3.3.2. Cortocircuito simulado con control de temperatura, tiempo y atmósfera

Posteriormente, con la finalidad de combinar las variables de temperatura, tiempo y atmósfera al evento de cortocircuito, y para generar cortocircuitos primarios y cortocircuitos secundarios, se preparará idéntico montaje al anterior, si bien los conductores a cortocircuitar se introducirán en el tubo de cuarzo del horno. Se tomarán muestras de alambre unifilar (H07V-U) y multifilar (H07Z1-K) ambos de 2.5 mm² de sección, y se someterán por separado a un cortocircuito durante unos 2 segundos mediante una fuente de corriente continua (12V y 740A). Dentro del tubo se controlará la atmósfera o secuencia de ellas, la temperatura y el tiempo de exposición.

Para la simulación de un cortocircuito primario se realizará un cortocircuito e inmediatamente se calentarán los cables cortocircuitados hasta 800 °C con una velocidad de calentamiento de 30 °C/min. Tras haber alcanzado la temperatura de tratamiento se generará una atmósfera reductora de Varigon H5 (95%Ar y 5%H₂) durante 10 min, a partir del cual se cortará el flujo de gas reductor y se generará una atmósfera oxidante con aire sintético rico en Oxígeno (30% O₂ y 70% N₂) durante los siguientes 10 minutos. Los caudales de los gases para el tratamiento serán de 3 L/min, y el enfriamiento de las muestras se realizará dentro del tubo del horno sin caudal de gases, confinando las muestras en el tubo de cuarzo. Esta secuencia de ensayo se ha establecido con la finalidad de simular un cortocircuito primario, seguido de un frente de llama y extinción del incendio.

En el caso de la simulación de un cortocircuito secundario, la secuencia que se realizará consiste en calentar los cables hasta 800 °C con una velocidad de calentamiento de 30 °C/min. Tras haber alcanzado la temperatura de tratamiento se inducirá una atmósfera oxidante con aire sintético rico en Oxígeno (30% O₂ y 70% N₂) durante los siguientes 10 minutos, a partir del cual se realizará el cortocircuito, e inmediatamente generado éste se cambiará a una atmósfera reductora de Varigon H5 (95%Ar y 5%H₂) durante los siguientes 10 min. Esta secuencia de ensayo se ha establecido con la finalidad de simular un frente de llama, seguido de un cortocircuito secundario y extinción del incendio. Los caudales de gases y el enfriamiento de las muestras serán iguales que en el cortocircuito primario.

Otro fenómeno que se experimentará es el sobrecalentamiento que puede generarse a consecuencia de la ocurrencia de un cortocircuito, debido al paso de corriente durante un lapso de tiempo, para ello se mantendrá el circuito cerrado o cortocircuitado, permitiendo el paso de sobrecorriente, durante 8 segundos. Con ello se busca estudiar la influencia de un sobrecalentamiento sobre el conductor. Se utilizará esta secuencia tanto para el caso de los cortocircuitos primarios como para los secundarios, con la modificación del paso de corriente sostenido durante 8 segundos de cortocircuito inducido.

El resumen de la combinación de variables para la realización de los cortocircuitos se muestra en la Tabla 3.4, donde se identifica el nombre con que se identificará las muestras y la combinación de temperatura, tiempo y gases a utilizar en cada ensayo.

Destacar que todos estos ensayos se realizaran con muestras de cable unifilar y de cable multifilar, a su vez se realizarán tres réplicas del ensayo para cada condición y tipo de muestra con la finalidad de evaluar la sección transversal y la sección longitudinal del hilo de cobre en la zona adyacente al corto, y tener cantidad suficiente de material cercano a la zona afectada por el cortocircuito para su análisis metalográfico.

Tabla 3.4 Combinación de variables y secuencia para la realización de cortocircuitos en diferentes condiciones atmosféricas

Ensayo	Descripción de temperatura, tiempo y atmósferas
Cortocircuito al aire	Cortocircuito durante 2s en aire estático (ambiente) – enfriamiento al aire
Cortocircuito Primario	Cortocircuito durante 2s – calentamiento a 800°C - atmósfera reductora durante 10 min – atmósfera oxidante durante 10 min – enfriamiento en el horno
Cortocircuito secundario	Calentamiento a 800°C – atmósfera oxidante durante 10 min – Cortocircuito durante 2s – atmósfera reductora durante 10 min – enfriamiento en el horno
Cortocircuito primario con sobrecalentamiento	Cortocircuito durante 2s y sobrecalentamiento por sobreintensidad durante 6s – calentamiento a 800°C - atmósfera reductora durante 10 min – atmósfera oxidante durante 10 min – enfriamiento en el horno
Cortocircuito secundario con sobrecalentamiento	Calentamiento a 800°C – atmósfera oxidante durante 10 min – Cortocircuito durante 2s y sobrecalentamiento por sobreintensidad durante 6s – atmósfera reductora durante 10 min – enfriamiento en el horno

Como se puede comprobar, para la simulación de cortocircuitos se consideró únicamente la temperatura de 800°C y 20 minutos de exposición, descartándose otras temperaturas (1000°C) y tiempos (120 minutos) puesto que en estos casos, las condiciones ambientales controladas de atmósfera reductora u oxidante, suponen una degradación muy intensa, y de prácticamente todo el conductor, que supone una alteración muy significativa en los efectos que se pretende observar en las zonas fundidas por arco eléctrico. Esta circunstancia se observará durante el estudio de la influencia de la temperatura, tiempo de tratamiento y atmósfera de los apartados 5.2.3 y 5.2.4.

3.4. Fase IV: Estudio de la influencia de atmósferas combinadas sobre la microestructura y degradación de conductores de cobre con cortocircuitos experimentales

Una vez obtenidas muestras de conductores de cobre sometidos a cortocircuitos se procederá a realizar un análisis microestructural completo que permita, mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, analizar los cambios microestructurales y afectaciones que pudiesen presentar los hilos de cobre, tanto en su sección transversal, como en su sección longitudinal. Los análisis a realizar serán similares a los planteados en la fase II, en lo que respecta al estudio microestructural. La secuencia de actividades planteadas en esta fase se muestra en la figura 3.5.

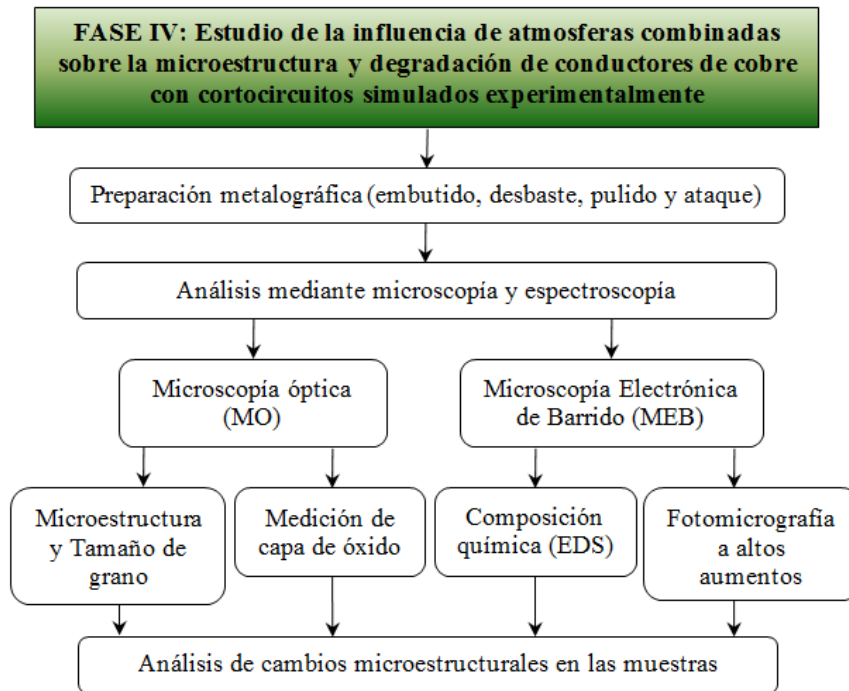


Figura 3.5 Flujograma de la fase IV de la investigación

3.5. Fase V: Selección y análisis de muestras de conductores de cobre provenientes de incendios reales

En esta fase se seleccionan casos representativos de incendios donde la causa del mismo haya sido identificada en conductores eléctricos de cobre, se tomarán muestras de estos cables y se preparan muestras metalográficas para realizar un estudio en detalle de la microestructura y de la medición de posibles capas de óxido superficial así como otros detalles encontrados en ella. Al provenir las muestras de casos reales se tendrá especial interés en observar la influencia de variables como la temperatura, tiempos de exposición a altas temperaturas, posibles atmósferas en las cuales se encontraban los conductores, etc. Todo ello, con la finalidad de poder correlacionar los cambios microestructurales encontrados en los conductores ensayados con los propios de incendios reales.

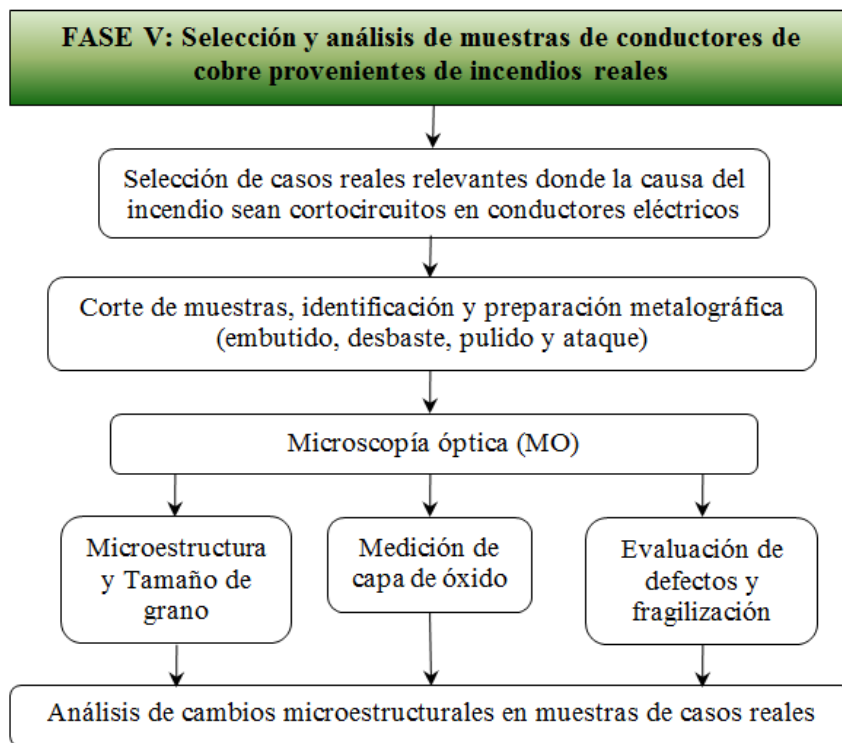


Figura 3.6 Flujograma de la fase V de la investigación

Concretamente se ha recopilado algunos casos de siniestros reales donde la investigación del incendio ha propiciado resultados satisfactorios en cuanto a la determinación de la causa. Los mismos han sido producto de la experiencia acumulada durante 15 años como perito de investigación de incendios en la empresa ‘Oficina Técnica de Ingeniería Forense, S.L.’.

Se estudiarán diversos casos reales representativos, en los que se vieron involucrados cableados de muy diversa tipología si bien en todos los casos se trata de cableado unifilar y multifilar, similar al ensayado.

De estos incendios se obtuvieron muestras de diferente tipo de cableado entre las que se encuentran conductores eléctricos no afectados por avería eléctrica alguna, simplemente afectados por las condiciones desarrolladas durante el incendio por alcance de las llamas, y conductores afectados por cortocircuitos, tanto de origen primario, causantes, como secundario, consecuencia por alcance del fuego. Se prepararán muestras metalográficas de los restos recuperados empleando el mismo procedimiento detallado para las muestras en estado de entrega (sección 4.2), las muestras se analizarán con la finalidad de correlacionar algunas de las propiedades estudiadas en laboratorio, con las observaciones realizadas en las muestras procedentes de incendios reales.

No se aportarán datos concretos sobre la identidad de las entidades o personas afectadas por el incendio con el propósito de salvaguardar su privacidad. En cualquier caso los incendios constan documentados para su revisión y comprobación si fuera preceptivo. Los incendios seleccionados se referenciarán como CASO 1, CASO 2, CASO 3, CASO 4 y CASO 5.

A continuación se expone brevemente algunas de las circunstancias y características de los incendios de donde se obtuvieron estas muestras, así como de las propias muestras en sí.

3.5.1. CASO 1

El primero de los casos se corresponde con unas muestras de cableado eléctrico extraídas de la instalación eléctrica propia de una vivienda en la que ocurrió un incendio afectando principalmente a un dormitorio. A consecuencia del incendio se vio afectada la instalación eléctrica empotrada propia del domicilio, resultando ésta descubierta por los desperfectos sufridos por los cerramientos. Estos elementos de la instalación eléctrica quedaron expuestos, viéndose afectados por el calor desarrollado por el incendio, sin verse alcanzados intensamente por la aplicación directa de las llamas.

Las muestras se componen de un tubo corrugado que contiene cuatro cables unifilares que se identifican como dos fases, neutro y tierra, de secciones para las fases y neutro de 2.5 mm² y tierra 1.5 mm². Como se puede comprobar en la figura 3.7 el tubo corrugado aparece afectado externamente por las llamas de forma direccional. El cableado de cobre muestra gran cantidad de restos carbonosos adheridos a su superficie.

Este CASO 1 es un buen ejemplo de cableado unifilar afectado térmicamente de forma poco intensa.



Figura 3.7 Muestra de cableado de cobre procedente del incendio denominado CASO 1 (imagen propia)

3.5.2. CASO 2

El segundo caso corresponde a cableado procedente de un incendio industrial, la empresa estaba dedicada a fabricación de complementos y marroquinería. El incendio ocurrió en una zona de almacenamiento en la que existían estanterías metálicas conteniendo mercancía almacenada en cajas de cartón. El incendio comenzó en una zona próxima al cableado tomado como muestra, y por causas ajenas a esta instalación eléctrica. La misma discurría por el interior de tubo rígido de PVC, el cual se vio completamente calcinado, viéndose el cableado en cuestión afectado por el calor y las llamas, calcinándose por completo su funda plástica aislante.

La muestra se compone de un cableado multifilar de sección 2.5 mm^2 , exento de funda plástica completamente consumida por el calor y las llamas del incendio. El conductor, seccionado en varios trozos, presenta coloración oscura fruto de la oxidación y condiciones ambientales a las que se ha visto sometido. También muestra fragilidad y descamación de óxido superficial, por lo que la muestra es tratada con cuidado. La figura 3.8 muestra el estado de la muestra en el lugar del incendio, una vez fue tomada.

Este CASO 2 puede considerarse un ejemplo de cableado multifilar sometido a un proceso térmico de reducción con una posterior oxidación por la propagación de las llamas, es decir un cableado afectado por las llamas en sus fases iniciales.



Figura 3.8 Muestra de cableado de cobre procedente del incendio denominado CASO 2 (imagen propia)

3.5.3. CASO 3

El tercer caso concierne a cableado propio de una instalación industrial en una empresa de fabricación de colchones, si bien esta instalación se corresponde de forma particular a una acometida de gas natural que sufrió una fuga y su posterior ignición. La instalación se emplazaba en un recinto parcialmente ventilado, la fuga inicial fue de poca entidad, si bien al entrar en ignición el gas fugado, las lesiones sobre la instalación fueron a más y la fuga se incrementó produciendo llamas cada vez más potentes. La instalación eléctrica próxima se vio afectada por el calor inicialmente y posteriormente por las llamas, produciéndose cortocircuitos.

La muestra obtenida de este caso se compone de cableado unifilar de sección 2.5 mm². Aparecen tres hilos seccionados pero completamente unidos por una fusión de cobre, el extremo opuesto también presenta fusiones, si bien en este caso el cable aparece enredado en hilos de acero correspondientes a un revestimiento de protección del cableado. Los conductores de cobre aparecen desnudos y severamente afectados por el incendio desarrollado. La figura 3.9 muestra los restos de cableado eléctrico en el lugar en donde se tomó la muestra.

El CASO 3 es un ejemplo de afectación del cableado unifilar por calor y consecuente oxidación, ocurrencia de cortocircuito con formación de fusiones, y posterior atmósfera reductora por inclusión en llamas.



Figura 3.9 Muestra de cableado de cobre procedente del incendio denominado CASO 3 (imagen propia)

3.5.4. CASO 4

El cuarto caso se refiere a cableado procedente de una nave industrial dedicada a la fabricación de muebles, viéndose afectada tanto la zona de producción como las oficinas y altillos destinados a almacenamiento, cuyo piso era de planchas de madera conglomerada. La instalación eléctrica de la cual se toma la muestra discurría anclada a la estructura metálica de estos altillos por medio de tubo plástico de PVC, existiendo cajas de derivación en diferentes puntos también de material plástico.

La muestra de cableado obtenida se tomó en el punto exacto de origen del incendio, habiéndose descartado otras posibles causas del siniestro se estableció que el mismo fue de origen eléctrico, comenzando en esta instalación, muy probablemente a consecuencia de un contacto defectuoso en una caja de derivación, provocando degradación de materiales plásticos y consecuentes cortocircuitos, produciéndose así el incendio.

La muestra corresponde a diversos cables eléctricos unifilares de sección 2.5 mm^2 , entre los cuales existen algunos que poseen pegaduras y fusiones del cobre que los compone, y otros, pérdida de sección; existiendo en todos ellos afectaciones intensas por el incendio. La figura 3.10 presenta la muestra tomada.

El CASO 4 es un ejemplo de restos de cableado eléctrico unifilar tomados en el punto origen del incendio, entre los que se halla el cortocircuito primario, causante del incendio, y otras afectaciones o cortocircuitos secundarios consecuencia del mismo.

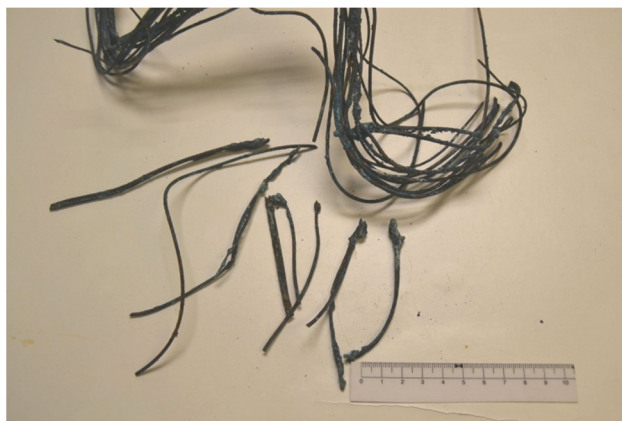


Figura 3.10 Muestra de cableado de cobre procedente del incendio denominado CASO 4 (imagen propia)

3.5.5. CASO 5

El quinto caso corresponde a cableado procedente de un incendio también considerado industrial, si bien fue obtenido del sistema eléctrico de dos vehículos industriales diferentes que se hallaban estacionados en la nave, entre muchos otros, concretamente se trata de cabezas tractoras, o camiones. La empresa sufrió un incendio de considerables dimensiones, viéndose afectados principalmente los vehículos y las instalaciones del edificio, incluyendo colapso estructural de la cubierta. Los indicios hallados evidenciaron que el incendio se originó entre dos de los vehículos, encontrándose éstos estacionados uno al lado del otro, en paralelo. El incendio causó importantes lesiones, no solo por la combustión de los materiales combustibles de los vehículos sino porque muchos de ellos contenían cierta cantidad de gasoil en sus tanques. No en vano la configuración estructural, por medio de una cubierta de fibrocemento, la cual rompe fácilmente en los incendios, provocó una buena ventilación y escaso efecto horno.

En este caso no quedó claro el punto exacto de origen del incendio, si bien sí que el mismo involucraba a las muestras tomadas.

Las muestras se corresponden con cableado eléctrico de importante sección, compuesto por cableado multifilar que a efectos prácticos son de interés para la presente tesis. Los diferentes cables poseen pegaduras y fusiones del cobre, con seccionamiento completo de los conductores. Presentan fragilidad y cierta oxidación reflejando afectaciones intensas por el incendio. La figura 3.11 presenta la muestra tomada.

El CASO 5 es un ejemplo de restos de cableado eléctrico multifilar tomados en el punto origen del incendio, entre los que se halla el cortocircuito primario, causante del incendio, y otras afectaciones o cortocircuitos secundarios consecuencia del mismo.

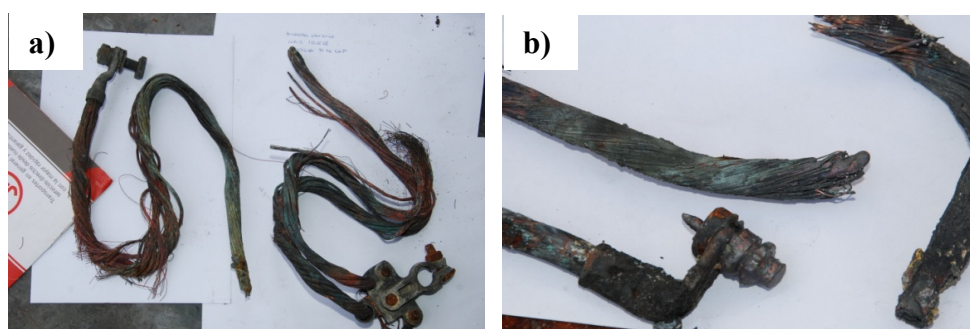


Figura 3.11 a) y b) Muestras de cableado de cobre procedente del incendio denominado CASO 5 (imagen propia)

3.6. Fase VI: Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente con los análisis de casos de incendios reales en conductores eléctricos

En esta última fase se pretende, basado en los resultados obtenidos en las fases previas, comparar los resultados obtenidos del análisis de las muestras procedentes de la experimentación en laboratorio, con los resultados obtenidos del análisis de casos reales en el ejercicio profesional de la investigación pericial de incendios.

Las muestras analizadas extraídas de casos reales fueron generadas en condiciones absolutamente sin control alguno, con diferentes aplicaciones de temperaturas, atmósferas, tiempos y secuencias, características de cada una de ellas del incendio acaecido, origen y causa del mismo. En estos incendios fue establecido el origen de forma indubitativa, hallándose en el foco origen restos de instalación eléctrica de diferente tipología como posible causante del incendio.

Se pretende pues aplicar las observaciones realizadas por medio de los ensayos en laboratorio a este cableado procedente de incendios reales, con la finalidad de obtener patrones o indicios que ayuden a esclarecer o aportar información sobre los efectos sufridos por el conductor eléctrico, y en su caso demostrar la aplicabilidad de las técnicas empleadas.

Como resultado de esta fase se pretende entonces aplicar los conocimientos técnicos del estudio de los cambios microestructurales que suceden en los conductores eléctricos de cobre como efecto de cortocircuitos eléctricos en incendios, como aplicación a la investigación del mismo, con la finalidad de explicar la posible causa del siniestro y discriminar si los arcos eléctricos o cortocircuitos evidenciados sobre los conductores eléctricos han sido la causa o la consecuencia del mismo.

Capítulo 4

Desarrollo experimental y metodología

En esta sección se detallan los equipos y métodos usados en el desarrollo experimental de la investigación llevada a cabo, se pretende incluir todos los aspectos involucrados en la preparación de muestras, equipos utilizados, así como el procedimiento de ensayo seguido en el laboratorio, explicado de manera secuencial de acuerdo a la metodología planteada en el Capítulo 3.

4.1. Selección de tipos de conductores eléctricos a emplear

El cableado eléctrico de cobre utilizado en las instalaciones eléctricas puede ser muy variado, lo que supone una limitación de la presente tesis. Si bien en instalaciones industriales la tipología es muy diversa, en instalaciones domésticas o residenciales es más limitada. En ambos casos, el cableado básicamente puede tener dos conformaciones, unifilar o multifilar. En el ámbito residencial, una sección transversal normal o de uso habitual es la de 2.5 mm^2 , tanto para cableado unifilar como multifilar. En el ámbito industrial también son empleadas estas secciones, si bien existen de forma habitual otras de mayor tamaño, pero que al fin y al cabo se componen de hilos de similares dimensiones. Los efectos que se pretende observar son los mismos en un cableado de mayor o menor sección, haciendo únicamente la distinción unifilar versus multifilar con el objeto de comprobar los efectos al verse expuesto el cobre a una mayor superficie en el cableado multifilar y existir efectos en los espacios entre hilos. Es por ello que en los ensayos se ha decidido trabajar con los dos tipos de cableado de uso comercial, unifilar y multifilar, de sección transversal 2.5 mm^2 ; tamaño que se considera adecuado y manejable para los experimentos pretendidos.

El conductor de tipo unifilar empleado está constituido por un hilo de cobre trefilado, con un diámetro aproximado de $1773 \mu\text{m}$ (radio de $886.5 \mu\text{m}$). La designación comercial de este conductor es H07V-U, del cual se ha adquirido un rollo de 100 m de longitud marca ACT con revestimiento plástico azul, véase figura 4.1a.

Por su parte, el conductor multifilar usado está constituido por 42 alambres (hilos) de cobre trefilados, con un diámetro aproximado de $290 \mu\text{m}$ (radio de $145 \mu\text{m}$). La designación comercial de este conductor multifilar es H07Z1-K, del cual se ha adquirido un rollo de 50 m de longitud marca LEXMAN con revestimiento plástico negro, véase figura 4.1c.

Como se comentó anteriormente estos dos tipos de conductores con sección transversal de 2.5 mm^2 son los más empleados en instalaciones eléctricas y se ha encontrado como material de interés en la investigación de todo tipo de incendios, tanto residenciales como industriales.

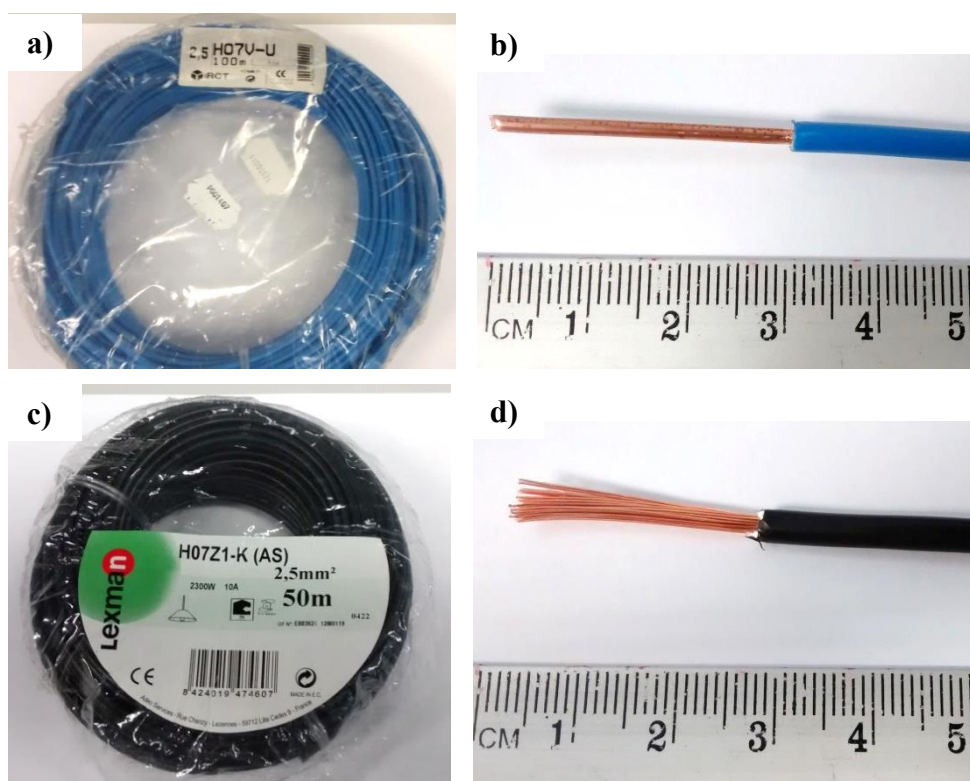


Figura 4.1 Conductores de cobre seleccionados a) cable Unifilar H07V-U b) detalle del cable Unifilar H07V-U c) Cable multifilar H07Z1-K d) detalle del cable multifilar H07Z1-K

4.2. Caracterización de los materiales de partida

Los materiales de partida son, como se ha indicado en el apartado anterior, dos tipos de conductor eléctrico. Se realiza su caracterización en base a la planificación detallada en la Fase I del Capítulo 3; ésta se compone de la preparación de muestras metalográficas para el análisis microestructural, y seguidamente la determinación de las propiedades mecánicas a través de ensayos de microdureza y de tracción.

A continuación se detalla cada una de estas técnicas que se utilizarán también para la caracterización de las muestras obtenidas en los ensayos experimentales, así como de los casos reales.

4.2.1. Caracterización microestructural

Para la caracterización de las muestras de alambre unifilar (H07V-U) y multifilar (H07Z1-K) de 2.5 mm² de sección, seleccionados como material de estudio, se han empleado diversas técnicas y equipos. Para el análisis microestructural básico, así como para mediciones de espesor de la capa de óxido, comprobación de porosidades o defectos y tamaño de grano por análisis de imágenes, se ha utilizado un microscopio óptico, mientras que para análisis de mayor resolución se ha utilizado un microscopio electrónico de barrido con emisión de campo. Esta metodología para el análisis metalográfico se empleará también en siguientes fases de la investigación donde se emplean estas técnicas.

4.2.2. Preparación metalográfica de los conductores de cobre

Para la observación en los microscopios se prepararon muestras metalográficas a partir de muestras de los cables, tanto en su sección transversal, como en su sección longitudinal. La secuencia de preparación comienza con el corte de las muestras, para ello se ha empleado una cortadora automática de precisión marca Struers modelo Secotom-15, utilizando un disco de corte abrasivo de bajo espesor y lubricación por chorro de aceite soluble con agua destilada.

Con la finalidad de facilitar el manejo de las muestras cortadas para su posterior desbaste y pulido se han embutido en resina translúcida de polimetilmetacrilato (PMMA) no conductora, así como en resina conductora (para el caso de análisis en el microscopio electrónico de barrido), la superficie transversal cortada de todos los hilos que constituyen a los conductores (un solo hilo en el caso del unifilar), se ha colocado de cara al molde, la embutidora utilizada es automática con refrigeración marca Struers modelo Citopress-1.

Para la etapa de desbaste de la superficie a preparar se ha empleado papel abrasivo de Carburo de Silicio (SiC) con diferentes granulometrías: grit 220, 500 y 1000, en una desbastadora de disco de velocidad variable, con agua como refrigerante, marca Struers modelo Labopol-25, girando a unos 150 rpm y con una carga aproximada de 120 N, hasta obtener una superficie plana y regular.

El proceso de pulido de las muestras se ha llevado a cabo en tres etapas: la primera empleando un disco de pulido magnético de 200 mm de diámetro de lana sintética marca Struers tipo MD-Plus, como abrasivo se ha utilizado pasta de diamante de 3 μm con aceite lubricante soluble. En la segunda etapa (pulido fino) se ha empleado un disco de pulido magnético de lana sintética de fibra corta marca Struers tipo ND-Nap, como abrasivo se ha utilizado pasta de diamante de 1 μm con aceite lubricante. Mientras que la última etapa es un pulido de precisión, que se ha realizado con un Paño MD-Chem con OPS (sílica coloidal en suspensión) de 0.25 μm y un 10% de H_2O_2 , con esta última etapa se logra un efecto de ataque químico ligero también que facilita la visualización de la microestructura del cobre. En todas las etapas se ha utilizado una pulidora de brazo automático marca Struers modelo Labopol-5 con capacidad para pulir 3 muestras de forma simultánea con control de carga de pulido, dosificación automática de líquido abrasivo y/o lubricante, y velocidad variable de giro del disco, los tiempos de pulido estuvieron entre 3 y 6 minutos hasta obtener una superficie especular adecuada para su observación en el microscopio.

En el caso que se requiera atacar las muestras para revelar borde grano, se utilizará el reactivo compuesto por: 2g $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ + 8mL H_2SO_4 + 100mL H_2O + 0.5mL HCl. Con ataque por inmersión durante 10 s, por último se realiza una limpieza con agua destilada en ultrasonidos durante 3 min. Secado con etanol y aire caliente. Aunque en la mayoría de los casos, por la naturaleza de los conductores de cobre a analizar, no es necesario el ataque de la superficie con este reactivo para revelar su microestructura, lográndose buenos resultados con la etapa final de OPS + 10% de H_2O_2 .

4.2.3. Microscopía óptica

Para la evaluación microestructural básica se ha empleado un microscopio óptico marca Nikon modelo LV-100 series, figura 4.2, equipado con el software Nikon NIS-Elements AR[®] para análisis de imágenes, mesa electrónica y cambio de lente automático, con objetivos de 50X, 100X, 200X, 500X y 1000X. Entre los análisis realizados con este microscopio se tiene: microestructura a diferentes aumentos, análisis de porosidad mediante área, cuantificación de fases mediante análisis de imagen, y evaluación de indentaciones y nanoindentaciones de dureza.

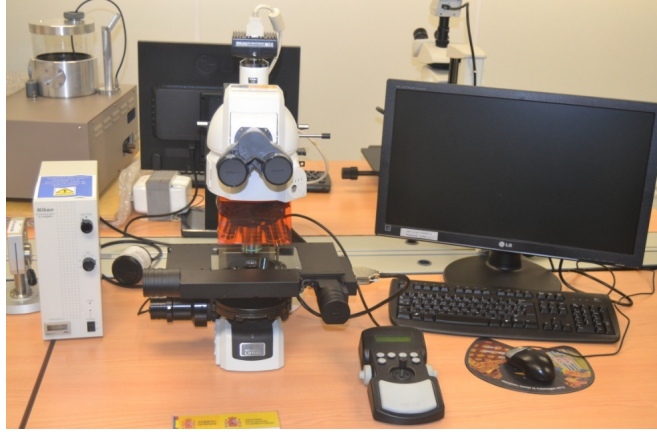


Figura 4.2 Microscopio óptico de mesa electrónica y cambio de lente automático (*Instituto de Tecnología de Materiales UPV*)

4.2.4. Microscopía electrónica de barrido con emisión de campo

Para el análisis de mayor resolución se ha utilizado un microscopio de emisión de campo (FESEM) marca Zeiss modelo ULTRA55, figura 4.3. Equipado con un detector de rayos X de 20 μm^2 marca Oxford Instruments modelo X-Max. Con este equipo ha sido posible obtener imágenes de alta calidad con bajas tensiones de trabajo (1-5 kV), así como microanálisis por espectroscopia de energía dispersiva, para la determinación de composición química de forma puntual, lineal o a través de mapas de composición por elemento en las regiones de estudio, trabajando con mayor tensión (5-20 kV).



Figura 4.3 Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (*Servicio de microscopía UPV*)

4.3. Medición de propiedades mecánicas

Para determinar las propiedades mecánicas de los conductores eléctricos en estado de entrega lo primero que se hizo fue la medición del perfil de microdureza desde el borde del hilo al centro, tanto en su sección transversal, como en su sección longitudinal, para ello se utilizó un microdurómetro Vickers marca Shimadzu modelo HMV-2 series, asistido con software de medición, figura 4.4.

Las indentaciones fueron realizadas en una línea recta desde el borde, inicialmente a 50 μm del borde y luego con separación de 100 μm entre ellas; las indentaciones realizadas se promediaron para obtener el perfil promedio de microdureza. Se ha empleado un indentador Vickers de punta de diamante y una carga de 980.7 mN aplicada durante 10 segundos (escala $\text{HV}_{0.1}$), para el ensayo se han seguido las pautas de la norma ASTM E38408 (ASTM, 2008). Las mediciones fueron realizadas en la superficie pulida sin ataque químico, ya que se pudo observar claramente la microestructura del cobre en estado de entrega.

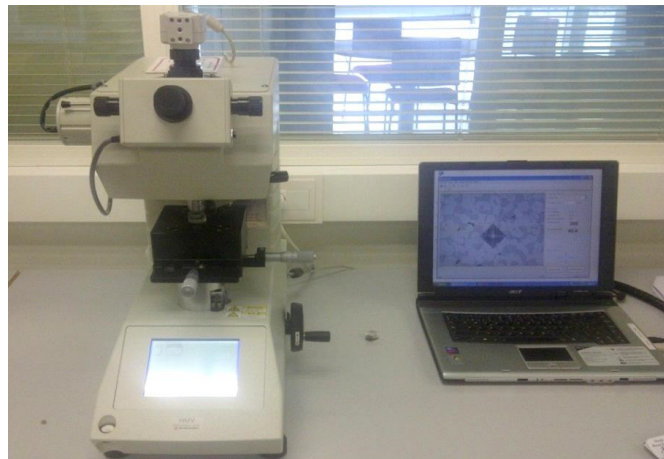


Figura 4.4 Microdurómetro Vickers con medición automática (Instituto de Tecnología de Materiales UPV)

Para finalizar con la caracterización tecnológica se realizaron ensayos de tracción uniaxial, con la finalidad de evaluar la resistencia mecánica de los hilos que constituyen los cables de cobre. Se utilizó una máquina universal de ensayos de tracción marca Instron modelo 4204, figura 4.5, equipada con una celda de carga instalada de 1 kN y velocidad de travesaño de 5 mm/min. Las muestras con longitud total de 170 mm y zona calibrada de 75 mm fueron medidas en su diámetro y longitud con un vernier digital de precisión 0.01 mm.

Se registró la curva carga versus desplazamiento del travesaño y se ha calculado la curva esfuerzo ingenieril versus deformación unitaria, de la cual se ha determinado el límite de fluencia, módulo de elasticidad, resistencia máxima y alargamiento a la ruptura. El equipo utilizado se muestra en la figura 4.5. La velocidad de ensayo fue de 5 mm/min con desplazamiento constante.



Figura 4.5 Máquina universal de ensayos de 5 kN Instron 4204 con mordazas mecánicas (*Instituto de Tecnología de Materiales UPV*)

4.4. Montaje experimental para tratamiento térmico de cables en atmósferas controladas

Se ha seleccionado y adquirido un horno de tipo Split compacto que permite el control de la atmósfera, temperatura y tiempo de exposición mediante un tubo de cuarzo en posición horizontal. Este tipo de horno dada su configuración permite introducir las muestras de hilos de cobre (cables conductores) en navcillas de material cerámico dentro del horno para su tratamiento, a la vez que se puede introducir gas dentro del tubo y controlar la atmósfera que rodea la muestra. Otra bondad de este tipo de horno, es que permitirá introducir cables de gran longitud a través de los orificios o puertos para termopares que disponen las bridas externas, con esto pudiese suministrarse corriente y voltaje a los cables para simular un cortocircuito controlado dentro del tubo del horno. La marca del horno seleccionado es marca MTI modelo OTF-1200, figura 4.6, el cual tiene una capacidad de calentamiento hasta los 1200°C y una potencia de 1.2 kW. A este equipo se le ha incorporado un tubo de cuarzo de 50 mm de diámetro exterior, espesor de 2.5 mm y largo de 450 mm, con un conjunto de bridas de vacío fabricadas en acero inoxidable y un manómetro para medición de la presión interna, figura 4.7.



Figura 4.6 Horno Split Horizontal con tubo de Cuarzo Marca MTI OTF-1200 (imagen propia)

Para el control del caudal de la atmósfera de gas en el interior del tubo de cuarzo se ha empleado un flujómetro y un conjunto de mangueras y válvulas para direccionar los gases de entrada y los gases de salida a la campana extractora.



Figura 4.7 Bridas para vacío en el tubo de cuarzo con manómetro y juntas para bajo vacío (imagen propia)

Una vez realizados los tratamientos térmicos se obtendrán muestras para el análisis metalográfico y para la determinación de propiedades mecánicas (dureza y tracción). El procedimiento para la preparación de las muestras metalográficas y para los ensayos de tracción uniaxial es el mismo que el detallado para las muestras de partida o en estado de entrega (secciones 4.2 y 4.3 de este capítulo).

El montaje experimental realizado se muestra en la figura 4.8, en el que se muestra como se han conectado en paralelo las botellas de gas oxidante y gas reductor, con la finalidad de seleccionar mediante el cierre de válvulas de paso rápido el caudal de gas a emplear en la atmósfera de tratamiento térmico dentro del tubo de cuarzo.

Para regular el caudal de gas que se suministra se ha colocado un flujómetro con regulador a la entrada de la brida del tubo de cuarzo, figura 4.8. La salida de los gases se ha direccionado mediante mangueras a una campana extractora de gases hacia el exterior.

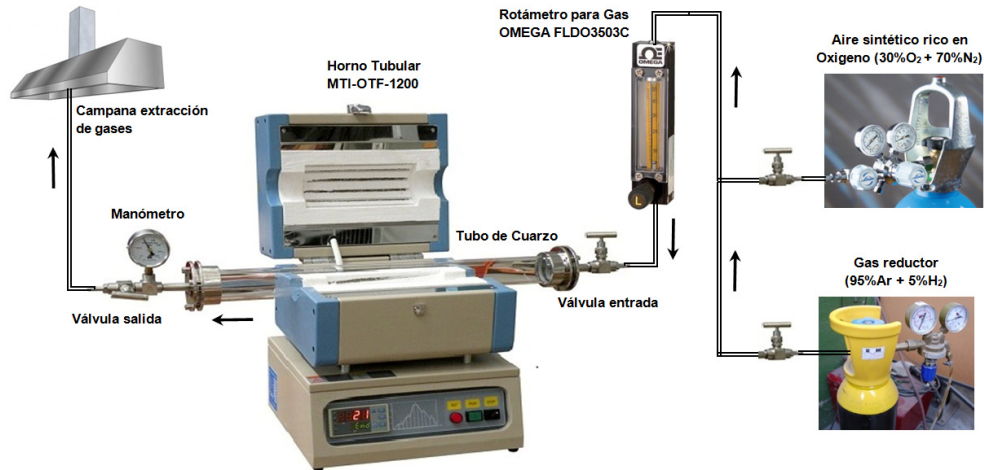


Figura 4.8 Esquema del montaje para los tratamientos térmicos en diferentes atmósferas y secuencia de éstas

4.5. Montaje experimental para la realización de cortocircuitos simulados con control de temperatura, tiempo y atmósferas

Para la ejecución de cortocircuitos al aire, los conductores son conectados a los bornes positivo y negativo de la fuente de alimentación de corriente continua y puestos en contacto sobre la navicilla de circona, cerrando el circuito por medio de un interruptor para provocar el cortocircuito deseado.

La figura 4.9 muestra el esquema de diseño del circuito. La figura 4.10 muestra una imagen del circuito montado, acompañada de fotografías de los cableados cortocircuitados.

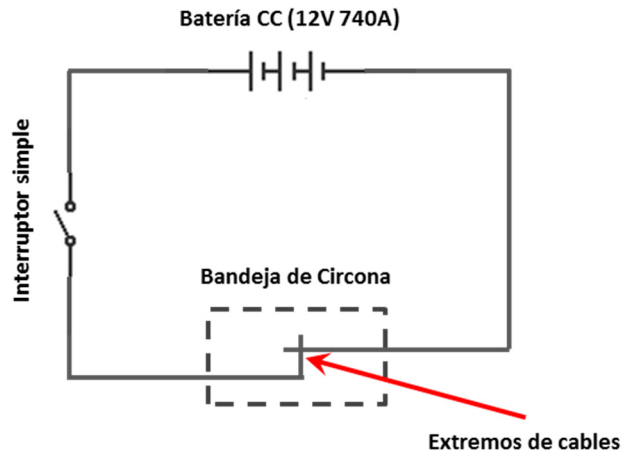


Figura 4.9 Esquema del montaje para los cortocircuitos al aire

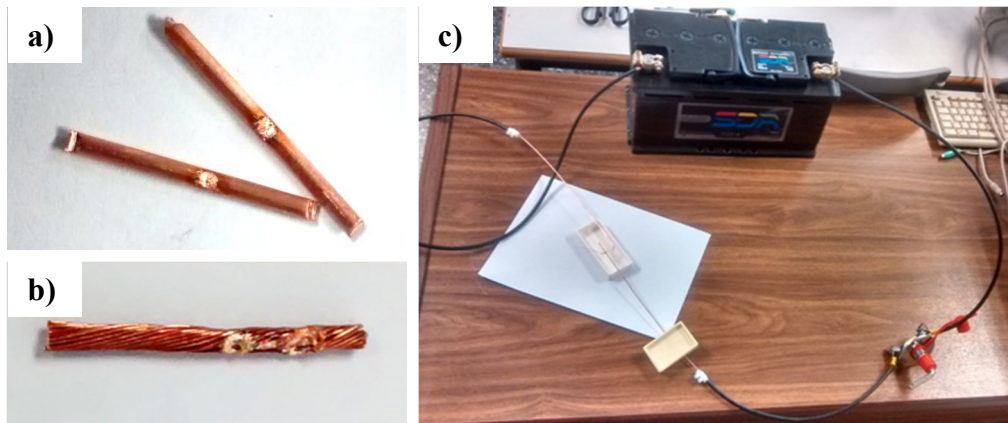


Figura 4.10 Fotografía de los cables después del cortocircuito a) cables unifilares, b) cable multifilar y c) montaje para el cortocircuito (740A 12V) en aire (imagen propia)

El montaje experimental para la realización de cortocircuitos en condiciones controladas de temperatura, tiempo y atmósferas tiene como base el montaje realizado para simular o producir cortocircuitos al aire, si bien en este caso los conductores son introducidos en el horno al igual que se muestra en el montaje de la figura 4.8.

Para la realización de cortocircuitos se introdujeron los conductores a ensayar, conectados a los bornes de la fuente de alimentación, en el interior del tubo de cuarzo, cada uno por un extremo y procurando contacto entre ambos, el interruptor cierra el circuito durante el tiempo deseado. El esquema del circuito diseñado se muestra en la figura 4.11. La figura 4.12 muestra una imagen del circuito montado en el interior del tubo.

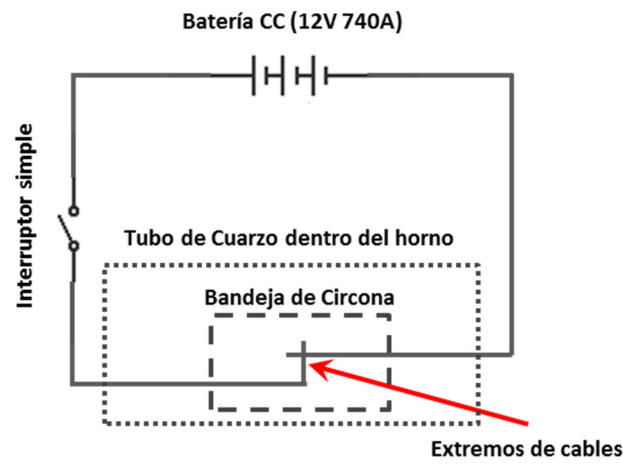


Figura 4.11 Esquema del montaje para los cortocircuitos desarrollados en condiciones controladas

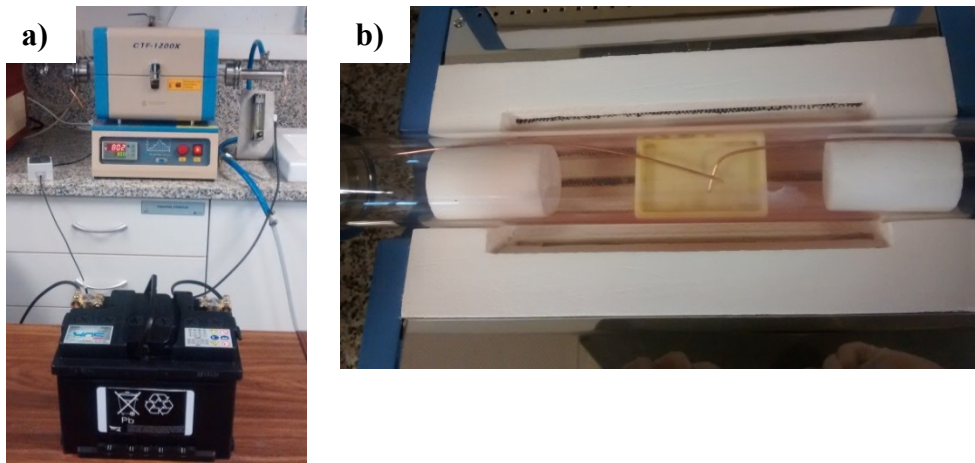


Figura 4.12 Fotografía del montaje para la simulación de cortocircuitos dentro del horno **a)** ubicación de batería y horno y **b)** detalle de los cables dentro del tubo de cuarzo en el horno (imagen propia)

Capítulo 5

Resultados

En esta sección se recopilan los resultados obtenidos a lo largo de esta investigación, se muestran de acuerdo a la secuencia planteada en la planificación de la investigación. En el siguiente Capítulo se abordará el análisis y la discusión de resultados con la finalidad de mejorar la comprensión de los mismos y enriquecer los aportes de ésta tesis. En primer lugar se comenzará con los resultados obtenidos de la caracterización de los conductores de cobre en estado de entrega.

5.1. Caracterización de los conductores de cobre en estado de entrega

Los resultados de la caracterización de los cables en estado de entrega contemplan la medición de las propiedades mecánicas y la caracterización microestructural. En referencia a las propiedades mecánicas, éstas han sido evaluadas mediante dos técnicas; por un lado se ha medido la microdureza de los conductores, y por el otro, a través de ensayos de tracción uniaxial, se han obtenido propiedades tales como el módulo elástico, el límite elástico y la resistencia mecánica. Respecto a la caracterización microestructural esta se ha realizado mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido.

5.1.1. Microdureza

Se ha medido la dureza de los cables en estado de entrega con un microdurómetro Vickers detallado en la sección 4.3, asistido con software de medición de la huella. Se programó una serie de indentaciones realizadas a lo largo de la sección del conductor con separación de 100 μm para el cable unifilar y de 50 μm para el cable multifilar, las mediciones se han realizado en estado de pulido, sin ataque.

Se ha empleado un indentador Vickers de punta de diamante y una carga de 980.7 mN aplicada durante 10 segundos (escala HV_{0.1}), para el ensayo se han seguido las pautas de la norma ASTM E384-08 (ASTM, 2008). Las huellas obtenidas en las indentaciones realizadas se muestran en la figura 5.1.

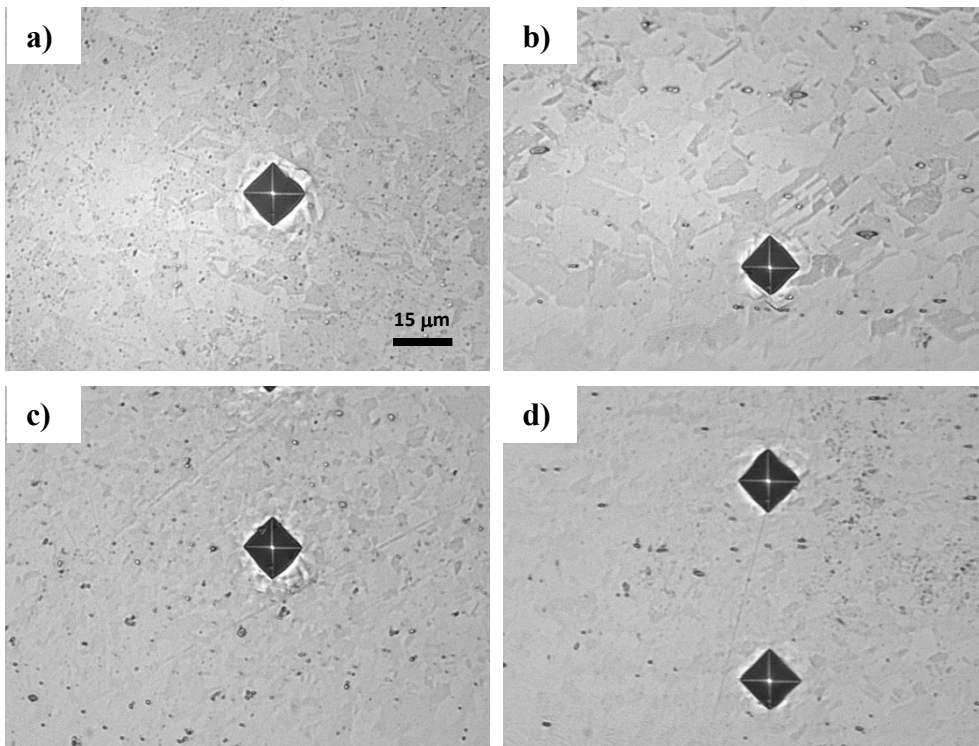


Figura 5.1 Fotografía de las indentaciones en la sección transversal de los conductores (40X)
a) sección transversal de cable unifilar b) sección longitudinal de cable unifilar c) sección transversal de cable multifilar y d) sección longitudinal de cable multifilar

Los valores promedio obtenidos así como su desviación se recopilan en la tabla 5.1, se observa que los valores de microdureza rondan los 52 HV_{0.1}, sin embargo, los cables multifilares en su sección transversal presentan un ligero incremento de la dureza en comparación con lo obtenido en los conductores unifilares.

Tabla 5.1 Resumen de valores de dureza para los conductores de cobre en estado de entrega

Cable		Dureza en Sección Transversal (HV _{0.1})	Dureza en Sección Longitudinal (HV _{0.1})
Unifilar	Promedio	52.3	53.0
	<i>desviación</i>	<i>2.1</i>	<i>1.2</i>
Multifilar	Promedio	55.2	52.3
	<i>desviación</i>	<i>2.3</i>	<i>1.5</i>

5.1.2. Ensayos de tracción

Tras realizar los ensayos de tracción uniaxial se han procesado los datos obtenidos, y se ha calculado el límite elástico, determinado con el método del 0.2% offset en la zona elástica. También se ha calculado la resistencia máxima como el mayor valor de esfuerzo que ha resistido el cable y el módulo elástico como la pendiente de la recta en la zona elástica de la curva esfuerzo-deformación. En la tabla 5.2 se recogen los valores obtenidos, se observa que los conductores unifilares tienen unas propiedades mecánicas superiores a los conductores multifilares, lo cual puede ser atribuido a una mayor deformación plástica previa, o también el efecto geométrico de mayor diámetro de los hilos, que posiblemente haya afectado a la medición de las propiedades mecánicas en los conductores multifilares que son de mucho menor diámetro que los unifilares.

Tabla 5.2 Resumen de propiedades mecánicas de los conductores de cobre en estado de entrega

Tipo de Alambre o cable	Ensayo	Límite elástico (MPa)	Resistencia Máx (MPa)	Módulo Elástico (GPa)	Alargamiento (%)
Unifilar	1	170.88	243.02	56.60	20.50
	2	174.25	250.01	58.83	24.70
	3	173.58	250.48	40.20	24.61
	<i>promedio</i>	172.90	247.84	51.88	23.27
	<i>desviación</i>	1.78	4.18	10.17	2.40
Multifilar	1	145.77	199.68	61.33	19.66
	2	152.77	205.77	61.95	22.57
	3	150.52	205.33	64.76	20.86
	<i>promedio</i>	149.69	203.59	62.68	21.03
	<i>desviación</i>	3.57	3.40	1.83	1.46

Las propiedades mecánicas de los alambres en estado de entrega son comparables con las correspondientes a un cobre libre de oxígeno para aplicaciones electrónicas del tipo UNS C10100 (Matweb, 2014). Sin embargo, no se cuenta con la composición química de los alambres ni la medición rigurosa de su contenido de Oxígeno e Hidrógeno para asegurarlo.

5.1.3. Microestructura

Tras realizar la caracterización microestructural ha sido posible visualizar la microestructura de los conductores eléctricos en estado de entrega. En la figura 5.2 se recogen las fotomicrografías de los cables unifilares, mientras que en la figura 5.3 se recogen las de los cables multifilares, tanto en su sección transversal como en sección longitudinal.

En ambos casos, la microestructura observada corresponde a granos austeníticos deformados con ligera presencia aparente de inclusiones, figuras 5.2d y 5.3d, y maclas de deformación plástica. En las micrografías a elevado aumento (1000X) se observa que los conductores unifilares tienen una microestructura con un tamaño de grano ligeramente mayor a lo observado en los conductores multifilares.

Con la finalidad de evaluar el nivel de inclusiones en los conductores en estado de entrega, se ha medido las posibles inclusiones en el metal. Se han observado las muestras en estado de pulido final, pero sin ataque, lo que permite visualizarlas con mayor detalle. En las figuras 5.4a y 5.4b se muestran las micrografías con luz polarizada de la sección transversal en las muestras de cable unifilar y multifilar respectivamente.

Las inclusiones redondas visualizadas en los cables unifilares, figura 5.4a, son ligeramente menores en tamaño y cantidad que las encontradas en el cable multifilar, figura 5.4b. En la sección longitudinal del cable unifilar se observan alargadas en el sentido de trefilado del hilo (con largos entre 1.83 y 10.06 μm), aunque también se encuentran inclusiones de forma circular (con diámetros entre 0.85 y 1.36 μm), el área ocupada por el total de inclusiones en la sección longitudinal es de 0.78%. No se observa diferencia de contrastes en los granos empleando la técnica de polarización (posición Nicols).

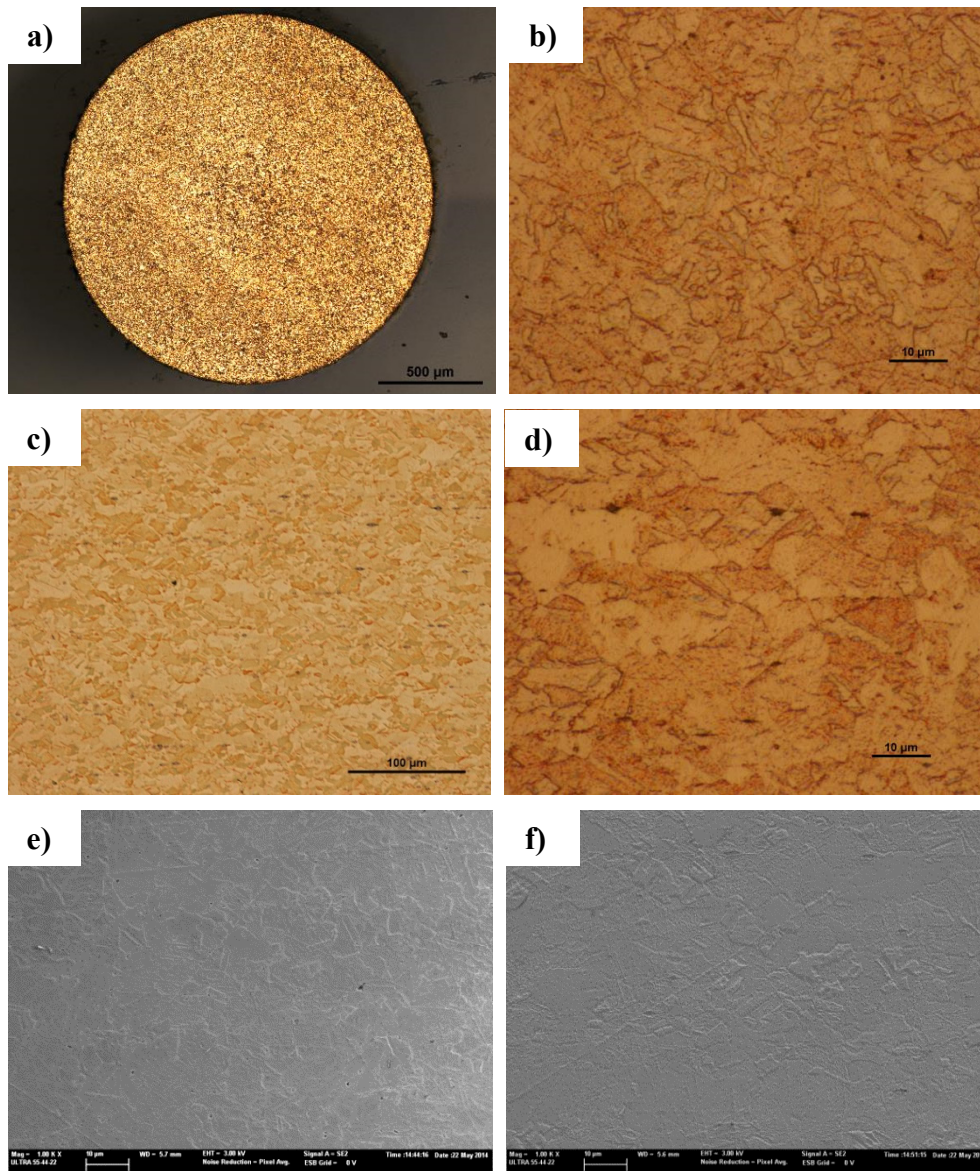


Figura 5.2 Fotomicrografías de los conductores unifilares en estado de entrega **a)** sección transversal (50X) **b)** sección transversal (1000X) **c)** sección longitudinal (200X) **d)** sección longitudinal (1000X) **e)** sección transversal en FESEM (1000X) y **f)** sección longitudinal en FESEM (1000X)

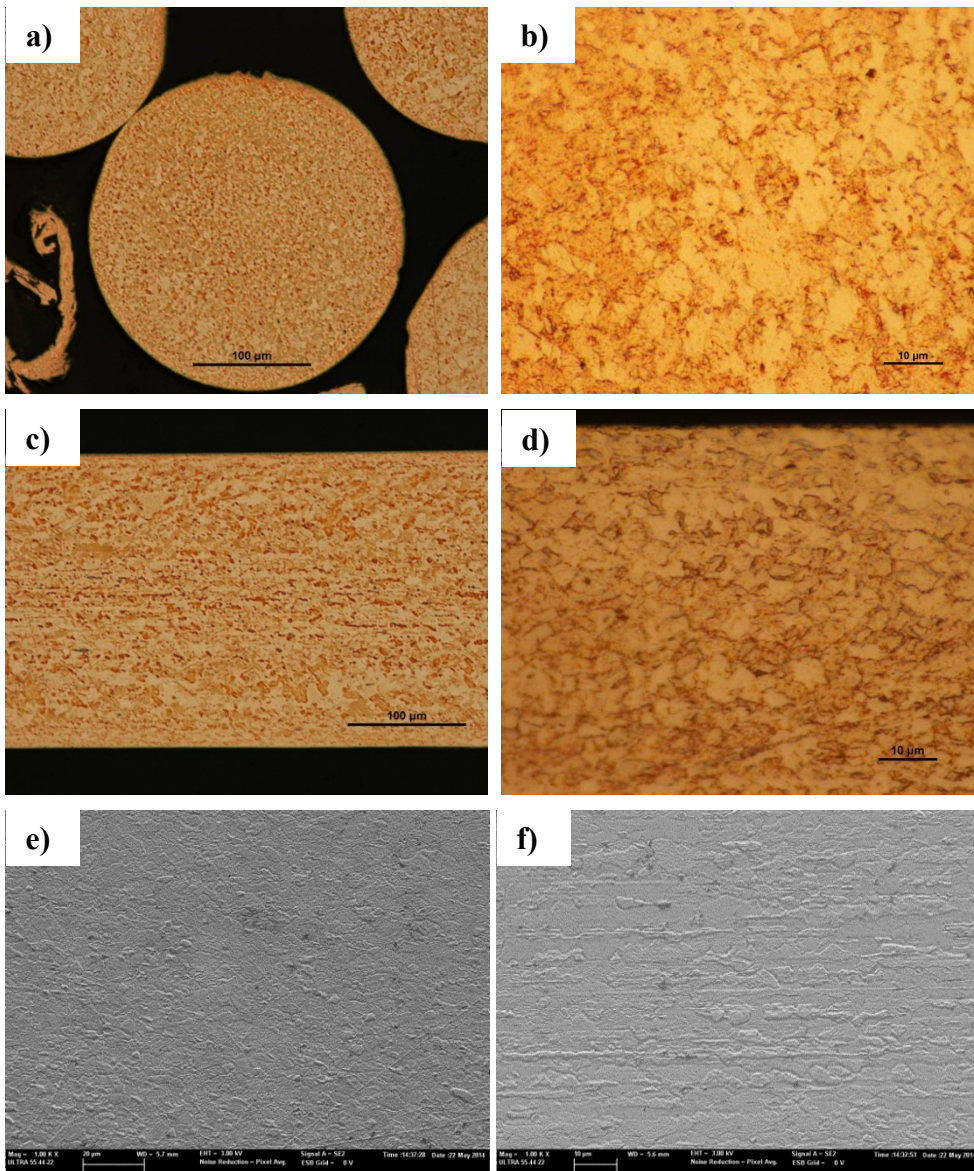


Figura 5.3 Fotomicrografía de los conductores multifilares en estado de entrega **a)** sección transversal (200X) **b)** sección transversal (1000X) **c)** sección longitudinal (200X) **d)** sección longitudinal (1000X) **e)** sección transversal en FESEM (1000X) y **f)** sección longitudinal en FESEM (1000X)

Las inclusiones visualizadas en el cable multifilar son de pequeño tamaño, en la sección longitudinal del cable multifilar, figura 5.4b, se observan ligeramente alargadas (con largos entre 0.67 y 1.35 μm), aunque también se encuentran inclusiones de forma circular (con diámetros entre 0.79 y 1.25 μm), el área ocupada por el total de inclusiones en la sección longitudinal es de 1.01% debido a la mayor cantidad de inclusiones circulares de pequeño tamaño. No se observa tampoco diferencia de contrastes en los granos empleando la técnica de polarización (posición Nicols).

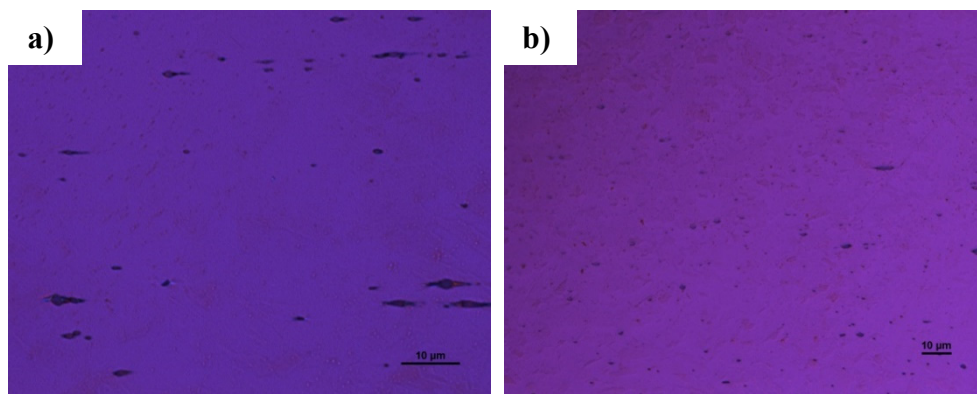


Figura 5.4 Fotomicrografía con luz polarizada (1000X) de muestras de los conductores en estado de entrega (sección longitudinal) **a)** Cable unifilar y **b)** Cable multifilar

5.2. Evaluación de la influencia de la temperatura, tiempo y atmósfera en la microestructura y propiedades mecánicas de los conductores de cobre

A continuación se presentan los resultados de la caracterización de los cables sometidos a los diferentes tratamientos térmicos en atmósferas controladas descritas en las tablas 3.2 y 3.3 del capítulo 3. Se presentarán los resultados en la secuencia planteada en la planificación de la investigación con la finalidad de facilitar la comprensión de los mismos. A continuación se comenzará con los resultados obtenidos en la atmósfera de bajo vacío; posteriormente se exponen los resultados obtenidos en los tratamientos en aire estático y finalmente en secuencias de atmósferas oxidantes y reductoras.

5.2.1. Microestructura y propiedades de los conductores tratados en bajo vacío

La microestructura obtenida en los tratamientos térmicos en bajo vacío se muestra a continuación. En la figura 5.5 se muestran las micrografías de la sección transversal del cable unifilar tratado a 800°C y 1000°C durante 20 y 120 minutos, figura 5.5.

En ellas se observa el crecimiento de tamaño de grano hasta valores del orden de las 25-50 micras para el tratamiento a 800°C durante 20 minutos, y cómo al pasar a 120 minutos de tratamiento térmico a la misma temperatura no se observa un incremento muy significativo. En el caso del tratamiento a 1000°C se observa un mayor aumento del tamaño de grano para los 20 minutos que ronda los 500-600 micras, así como un ligero incremento en el mismo al pasar a los 120 minutos de tratamiento.

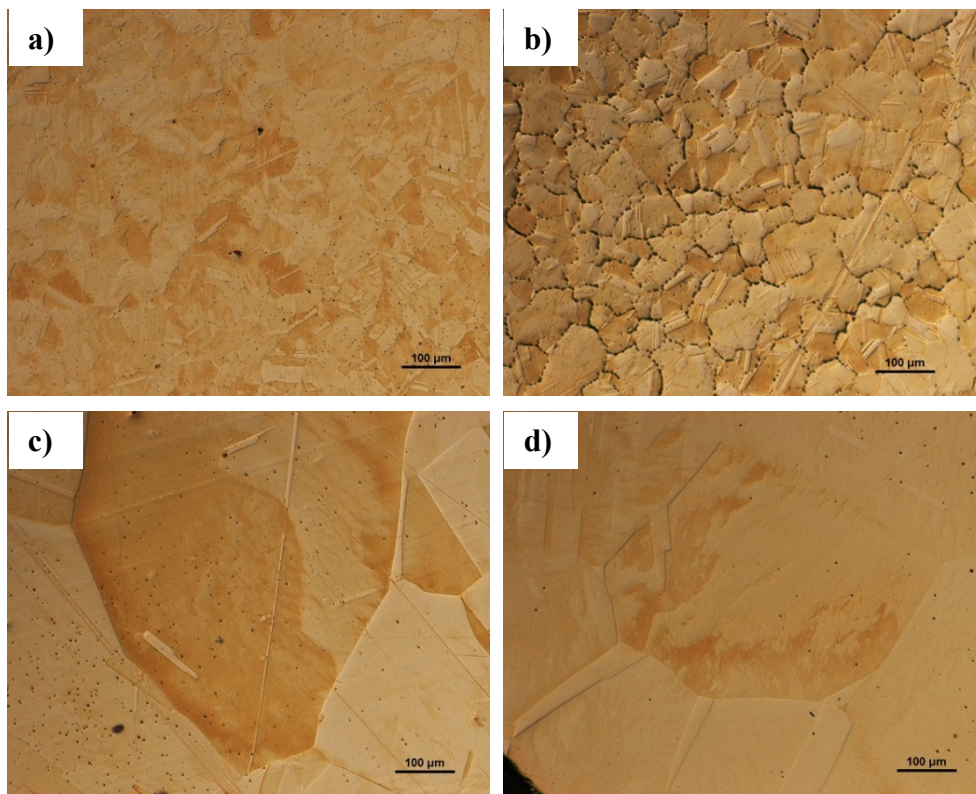


Figura 5.5 Fotomicrografía de los conductores unifilares tratados en atmósfera de bajo vacío, sección transversal (100X) **a)** 800°C durante 20 min **b)** 800°C durante 120 min **c)** 1000°C durante 20 min y **d)** 1000°C durante 120 min

Cuando se observa la sección longitudinal de los conductores unifilares tratados en atmósfera de bajo vacío, figura 5.6, se confirma lo observado en la sección transversal.

En ambos casos se observa de forma muy relevante la formación de segregaciones en borde de grano en la condición de 800°C y 120 minutos de tratamiento. Dado que el tratamiento se realiza a bajo vacío, sin atmósfera no cabe atribuir este efecto a la fragilización por hidrógeno o presencia de una atmósfera reductora. Es por ello que se considera que estas segregaciones son fruto de la difusión y precipitación de Cu_2O disuelto en el cobre en estado de entrega.

Esta precipitación se produce preferencialmente hacia el borde de grano durante el enfriamiento produciendo la fragilización del material (Kosec *et al*, 1993). Se considera además que al formarse este precipitado en borde de grano, éste bloquea o limita su crecimiento si bien, posiblemente al aumentar la temperatura y con ello el tamaño de grano se fuerza al precipitado a difundir hacia zonas periféricas del conductor.

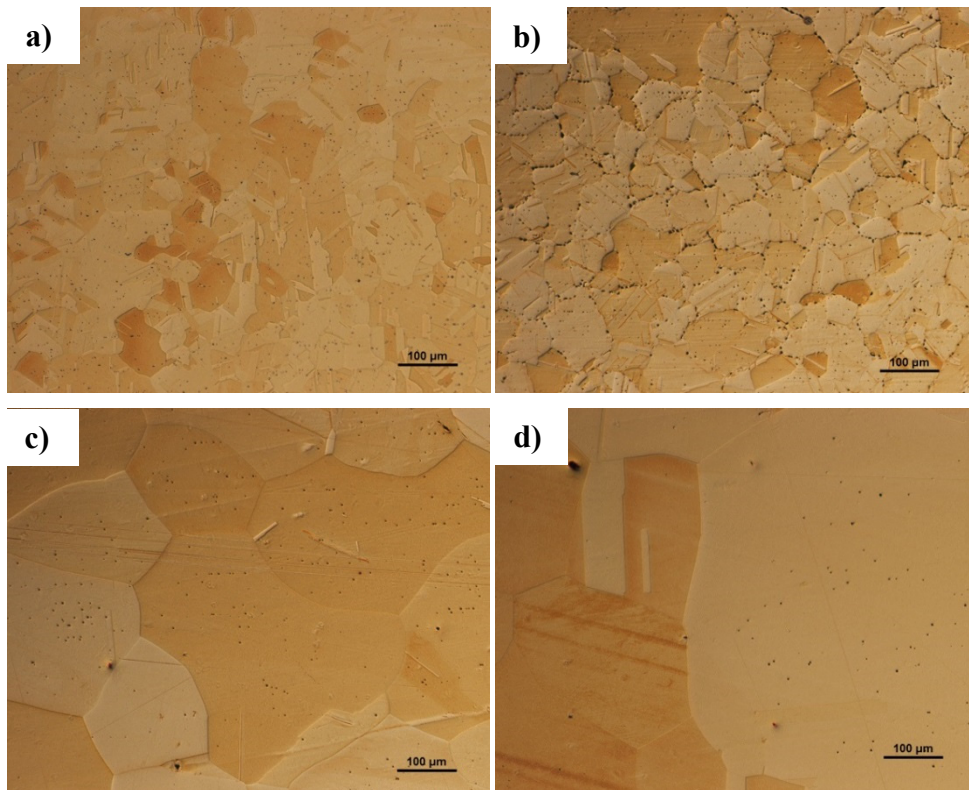


Figura 5.6 Fotomicrografía de los conductores unifilares tratados en atmósfera de bajo vacío, sección longitudinal (100X) **a)** 800°C durante 20 min **b)** 800°C durante 120 min **c)** 1000°C durante 20 min y **d)** 1000°C durante 120 min

Para el caso de los conductores multifilares se tiene un comportamiento de la microestructura algo diferente. Se observa el crecimiento del tamaño de grano con el incremento de la temperatura de tratamiento, éste se ve limitado por la geometría del hilo, por su reducido diámetro, figura 5.7.

Respecto a las segregaciones observadas en el cableado unifilar, en este caso de conductor multifilar no son visibles para las condiciones ensayadas. Sí se observa la existencia de cierta porosidad en zonas periféricas para los conductores tratados a 1000°C, ello es fácilmente visible en el corte transversal, figura 5.7d, y en el longitudinal, figura 5.8c. Se considera que esta porosidad posiblemente sea debida a la migración del Cu_2O . A 800°C y 20 minutos la porosidad se concentra en la zona central de los hilos del conductor multifilar, figuras 5.7a y 5.8a.

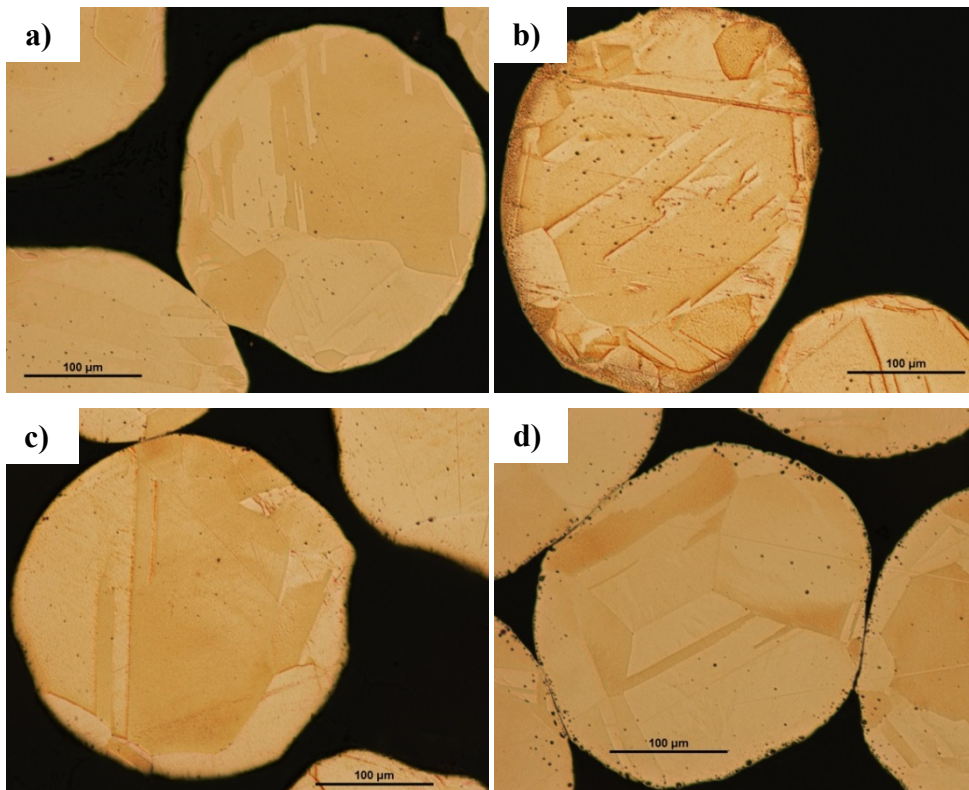


Figura 5.7 Fotomicrografía de los conductores multifilares tratados en atmósfera de bajo vacío, sección transversal (200X) **a)** 800°C durante 20 min **b)** 800°C durante 120 min **c)** 1000°C durante 20 min y **d)** 1000°C durante 120 min

Cuando se observa la sección longitudinal de los conductores de cobre multifilares tratados en vacío, figura 5.8, se tiene que se confirma el comportamiento de la microestructura observada en la sección transversal. En los cables tratados a 1000°C durante 120 min se observa que el tamaño de grano es limitado por el diámetro del conductor unifilar, figura 5.8d.

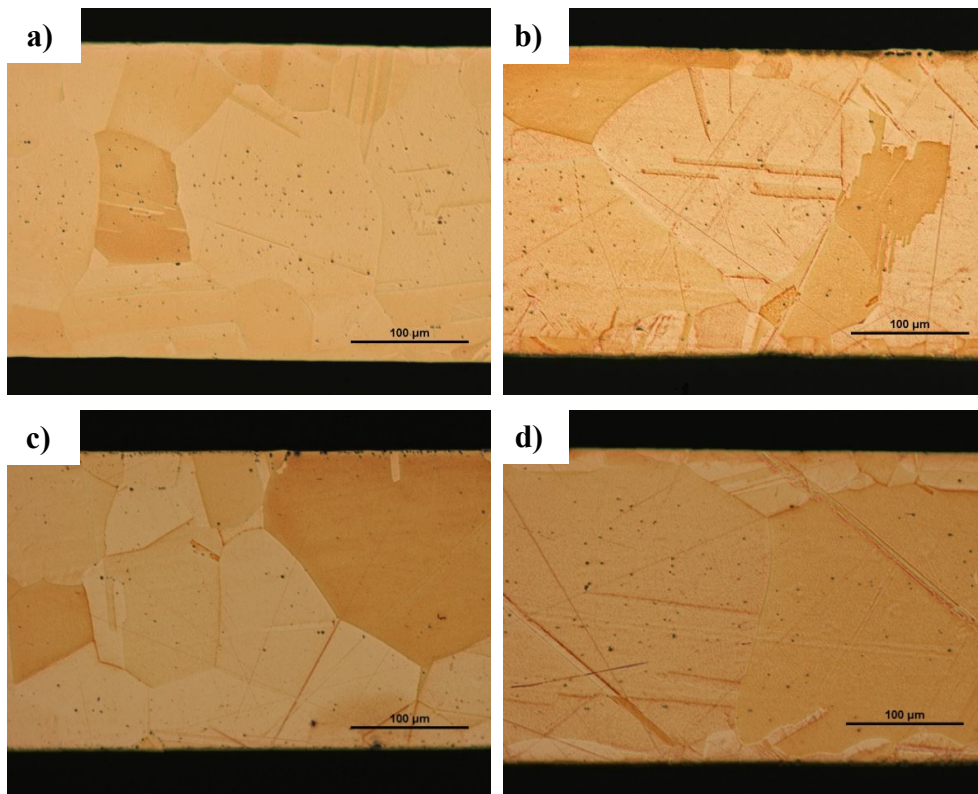


Figura 5.8 Fotomicrografía de los conductores multifilares tratados en atmósfera de bajo vacío, sección longitudinal (200X) **a)** 800°C durante 20 min **b)** 800°C durante 120 min **c)** 1000°C durante 20 min y **d)** 1000°C durante 120 min

La medición de microdureza en las muestras de cables tratados en vacío indica un ligero ablandamiento del material con el tratamiento térmico en bajo vacío, siendo las huellas de indentación de mayor tamaño, figura 5.9, si se compara con las obtenidas en la sección transversal de los cables en estado de entrega.

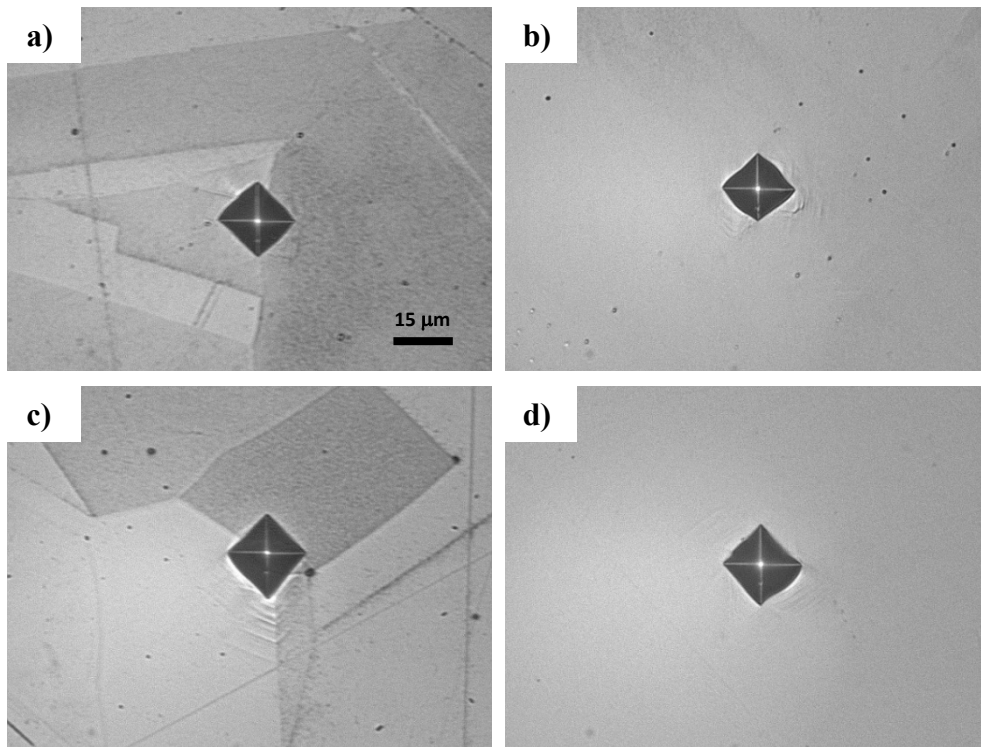


Figura 5.9 Fotografía de las indentaciones en la sección transversal de los conductores unifilares (40X) tratados en bajo vacío **a)** tratado a 800°C durante 20 min **b)** tratado a 800°C durante 120 min **c)** tratado a 1000°C durante 20 min y **d)** tratado a 1000°C durante 120 min

En la tabla 5.3 se recopilan los valores de dureza obtenidos. A modo general se obtiene una menor dureza en la sección longitudinal que en la sección transversal de los conductores tratados en vacío, debido a la menor presencia de límites de granos y de macclas observadas en la microestructura. El mayor descenso en la dureza se ha registrado en la sección longitudinal del conductor unifilar tratado a 800°C por 120 min, lo cual indica que la variable tiempo tiene una gran influencia en el recocido y engrosamiento de la microestructura del cobre cuando se expone a temperaturas ya por encima de los 500°C.

Tabla 5.3 Resumen de valores de dureza para los conductores de cobre en estado de entrega y tratados térmicamente en atmósfera de vacío

Microdureza Vickers (HV _{0.1})		Cable Unifilar		Cable Multifilar	
		Transv	Long	Transv	Long
Estado de entrega	<i>promedio</i>	52.3	53.0	55.2	52.3
	<i>desviación</i>	2.1	1.2	2.3	1.5
800°C durante 20 min en Vacío	<i>promedio</i>	49.6	36.2	43.3	36.9
	<i>desviación</i>	2.3	0.7	1.6	3.2
800°C durante 120 min en Vacío	<i>promedio</i>	50.0	34.1	46.1	42.5
	<i>desviación</i>	2.7	2.0	2.5	1.0
1000°C durante 20 min en Vacío	<i>promedio</i>	50.8	44.2	45.9	42.7
	<i>desviación</i>	1.7	2.2	1.7	1.4
1000°C durante 120 min en Vacío	<i>promedio</i>	49.6	42.2	53.4	42.5
	<i>desviación</i>	2.2	1.9	3.3	1.0

Las muestras de los cables tratados en atmósfera de bajo vacío han sido sometidas a ensayos de tracción uniaxial, una vez procesadas las curvas esfuerzo-deformación se han obtenido las propiedades mecánicas que se detallan en la tabla 5.4 para los conductores unifilares y en la tabla 5.5 para los conductores multifilares.

Tal como se observó en las fotomicrografías de los cables unifilares tratados térmicamente en vacío, para la condición de 800°C y 120 min de tratamiento, se presenta un efecto de fragilización debida a las segregaciones de precipitado de Cu₂O en los bordes de grano. Este fenómeno causa una caída drástica en las propiedades mecánicas de los conductores de cobre unifilares hasta el punto de reducir la ductilidad de los hilos a la mitad, lo cual denota una alta fragilización del material. Igualmente se reducen significativamente el límite elástico y la resistencia máxima.

En el caso de los conductores multifilares se observa una reducción en las propiedades mecánicas asociada a la disminución del límite elástico, resistencia y ductilidad, pero sin llegar a causarse la fragilidad de los conductores que constituyen el cable multifilar.

Tabla 5.4 Resumen de propiedades mecánicas para los conductores de cobre unifilares en estado de entrega y tratados térmicamente en atmósfera de vacío

Condición	Ensayo	Límite elástico (MPa)	Resistencia Máx (MPa)	Modulo Elástico (GPa)	Alargamiento (%)
Estado de entrega	1	170.88	243.02	56.60	20.50
	2	174.25	250.01	58.83	24.70
	3	173.58	250.48	40.20	24.61
	<i>promedio</i>	172.90	247.84	51.88	23.27
	<i>desviación</i>	1.78	4.18	10.17	2.40
800°C durante 20 min en Vacío	1	33.85	229.32	50.33	28.91
	2	38.67	239.04	62.15	33.55
	3	32.54	231.45	38.80	31.86
	<i>promedio</i>	35.02	233.27	50.43	31.44
	<i>desviación</i>	3.23	5.11	11.68	2.35
800°C durante 120 min en Vacío	1	34.91	115.17	17.90	2.00
	2	35.55	117.01	39.58	2.12
	3	37.30	97.66	40.88	1.46
	<i>promedio</i>	35.92	109.95	32.79	1.86
	<i>desviación</i>	1.24	10.68	12.91	0.35
1000°C durante 20 min en Vacío	1	26.14	231.45	30.52	13.55
	2	16.09	213.67	10.80	18.83
	3	24.50	219.86	29.10	15.88
	<i>promedio</i>	22.24	221.66	23.47	16.09
	<i>desviación</i>	5.39	9.03	11.00	2.64
1000°C durante 120 min en Vacío	1	21.54	219.03	22.40	23.31
	2	22.61	233.14	30.20	24.71
	3	23.16	231.21	31.85	24.51
	<i>promedio</i>	22.44	227.79	28.15	24.17
	<i>desviación</i>	0.83	7.65	5.05	0.76

Tabla 5.5 Resumen de propiedades mecánicas para los conductores de cobre multifilares en estado de entrega y tratados térmicamente en atmósfera de vacío

Condición	Ensayo	Límite elástico (MPa)	Resistencia Máx (MPa)	Modulo Elástico (GPa)	Alargamiento (%)
Estado de entrega	1	145.77	199.68	61.33	19.66
	2	152.77	205.77	61.95	22.57
	3	150.52	205.33	64.76	20.86
	<i>promedio</i>	149.69	203.59	62.68	21.03
	<i>desviación</i>	3.57	3.40	1.83	1.46
800°C durante 20 min en Vacío	1	56.62	187.54	24.00	14.08
	2	66.44	189.88	34.47	16.62
	3	57.86	189.42	36.44	14.71
	<i>promedio</i>	60.31	188.94	31.64	15.13
	<i>desviación</i>	5.34	1.24	6.69	1.32
800°C durante 120 min en Vacío	1	63.69	184.26	47.27	8.62
	2	62.10	182.39	46.10	7.94
	3	122.03	148.62	82.53	6.68
	<i>promedio</i>	82.61	171.76	58.63	7.74
	<i>desviación</i>	34.15	20.06	20.70	0.98
1000°C durante 20 min en Vacío	1	158.51	182.85	79.72	10.00
	2	127.61	158.94	73.41	6.54
	3	122.63	158.94	74.65	5.52
	<i>promedio</i>	136.25	166.91	75.93	7.35
	<i>desviación</i>	19.44	13.81	3.34	2.35
1000°C durante 120 min en Vacío	1	118.17	149.10	57.12	12.38
	2	156.69	167.38	81.74	13.06
	3	129.19	173.01	62.52	18.78
	<i>promedio</i>	134.69	163.16	67.13	14.74
	<i>desviación</i>	19.84	12.50	12.94	3.52

5.2.2. Microestructura y propiedades de los conductores tratados al aire

La microestructura obtenida en los tratamientos térmicos en aire estático se muestra a continuación. En la figura 5.10 se muestran las micrografías para el cable unifilar en su sección transversal. En ellas se observa el crecimiento de una capa de óxido superficial frágil debido al contenido de oxígeno presente en el aire, se incrementa también el tamaño de grano con el aumento de la temperatura. En estas muestras tratadas en aire no se presenta el fenómeno de fragilización en borde de grano observado en las muestras tratadas en bajo vacío.

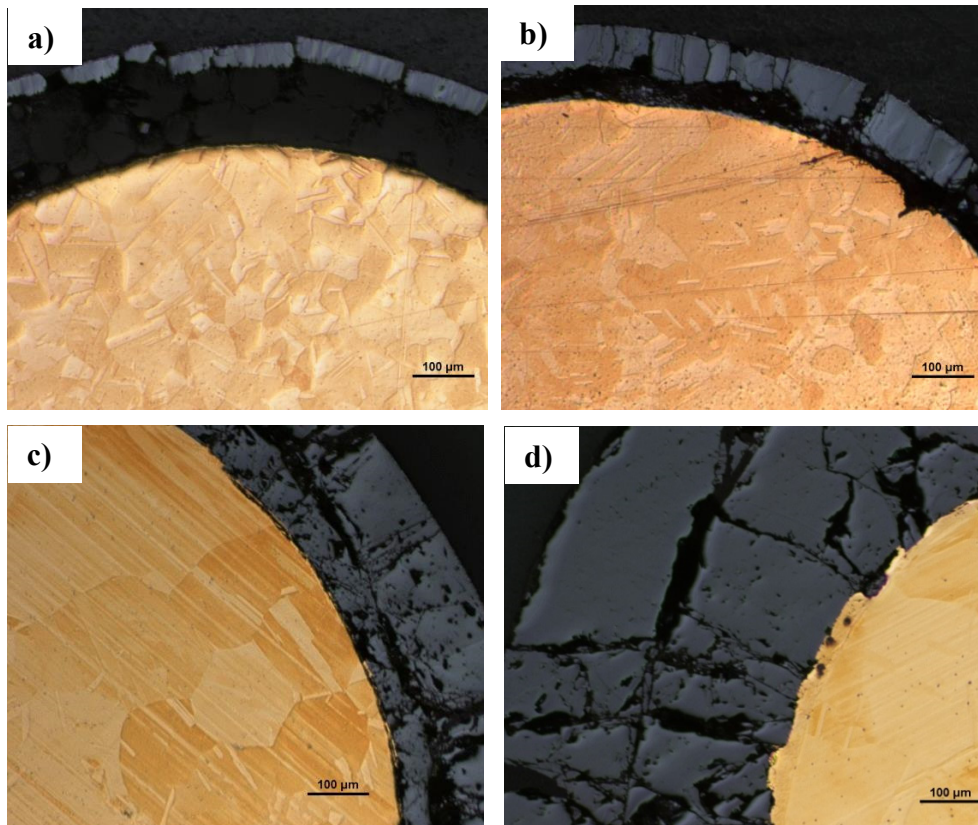


Figura 5.10 Fotomicrografía de los conductores unifilares tratados en aire estático, sección transversal (100X) **a)** 800°C durante 20 min **b)** 800°C durante 120 min **c)** 1000°C durante 20 min y **d)** 1000°C durante 120 min

Cuando se observa la sección longitudinal de los conductores unifilares tratados en aire, figura 5.11, se confirma lo observado en la microestructura de los conductores evaluados en la sección transversal; a 800°C no se observa un incremento significativo del tamaño de grano al pasar de 20 min a 120 min de tratamiento térmico, sin embargo, en el caso del tratamiento a 1000°C sí se observa un ligero incremento en el tamaño de grano al pasar de 20 min a 120 min de tratamiento, así como también en el crecimiento de la capa de óxido superficial, figuras 5.11c y 5.11d. En los conductores tratados a 1000°C se observan porosidades redondeadas en el material, sin embargo, no se encuentran en borde de grano.

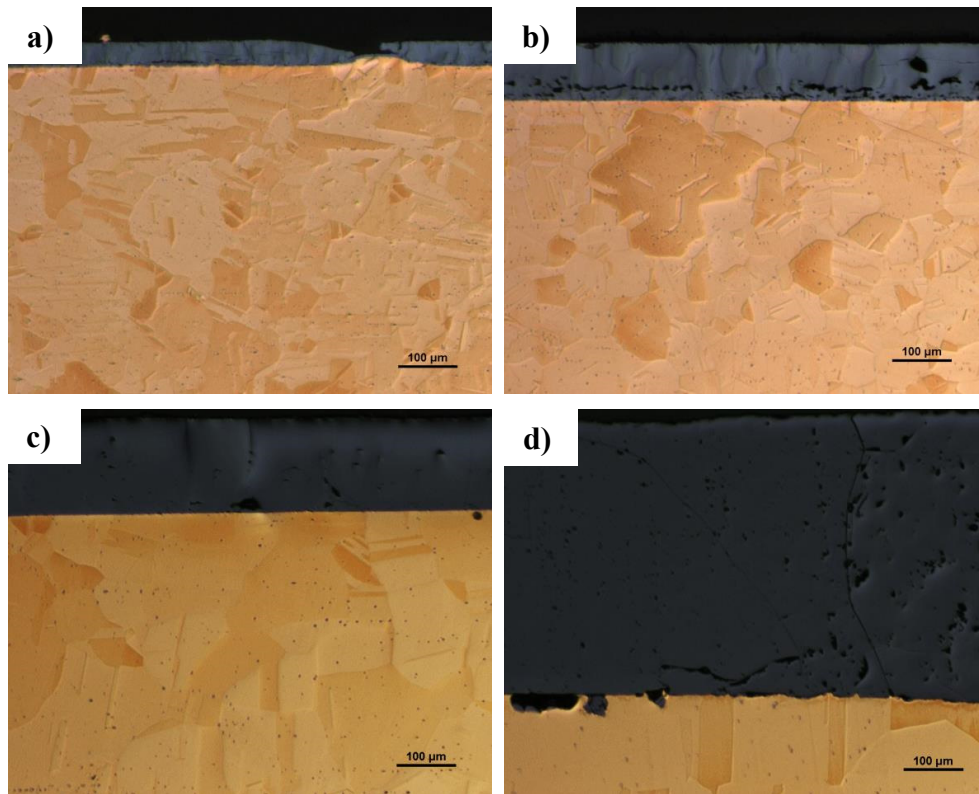


Figura 5.11 Fotomicrografía de los conductores unifilares tratados en aire estático, sección longitudinal (100X) **a)** 800°C durante 20 min **b)** 800°C durante 120 min **c)** 1000°C durante 20 min y **d)** 1000°C durante 120 min

Para el caso de los conductores multifilares se tiene un comportamiento diferente, ya que al ser los hilos de pequeño diámetro el grado de oxidación convierte todo el conductor en óxido cuando es tratado a 1000°C durante 120 min. A esta temperatura la degradación del conductor ya es notable a 20 min de tratamiento. Se observa en la figura 5.12 que para ninguna condición se presentan las segregaciones en los bordes de grano que fragilizan al cobre. Sí se observa el crecimiento del tamaño de grano con el incremento de la temperatura en las muestras tratadas a 800°C.

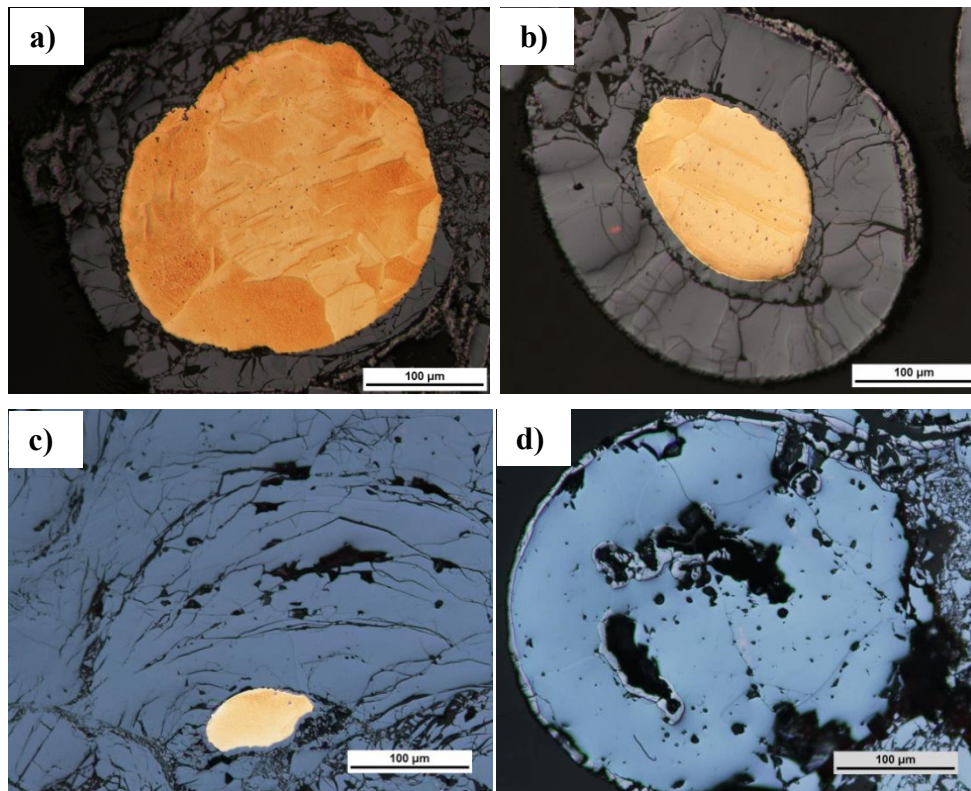


Figura 5.12 Fotomicrografía de los conductores multifilares tratados en aire estático, sección transversal (200X) **a)** 800°C durante 20 min **b)** 800°C durante 120 min **c)** 1000°C durante 20 min y **d)** 1000°C durante 120 min

Cuando se observa la sección longitudinal de los conductores de cobre multifilares tratados en aire, figura 5.13, se tiene que para la condición de 1000°C durante 120 min de tratamiento se evidencia un gran crecimiento de la capa de óxido en los conductores hasta transformar todo el conductor, figura 5.13d, debido a la presencia de oxígeno en la atmósfera de tratamiento, a diferencia de las muestras tratadas en vacío. Una considerable capa de óxido puede observarse también en las muestras tratadas a 800°C durante 120 minutos. En el caso de las muestras de alambre multifilar tratadas a 1000°C se observa que todo el conductor se ha transformado en óxido, sin embargo, en los conductores unifilares no ha sido así debido al diámetro del mismo y a que la cantidad de material en ellos es mayor y no todo se ha transformado en óxido. A partir de estas imágenes de microscopía óptica se ha podido medir el espesor de la capa de óxido presente en la superficie de las muestras tratadas en aire estático.

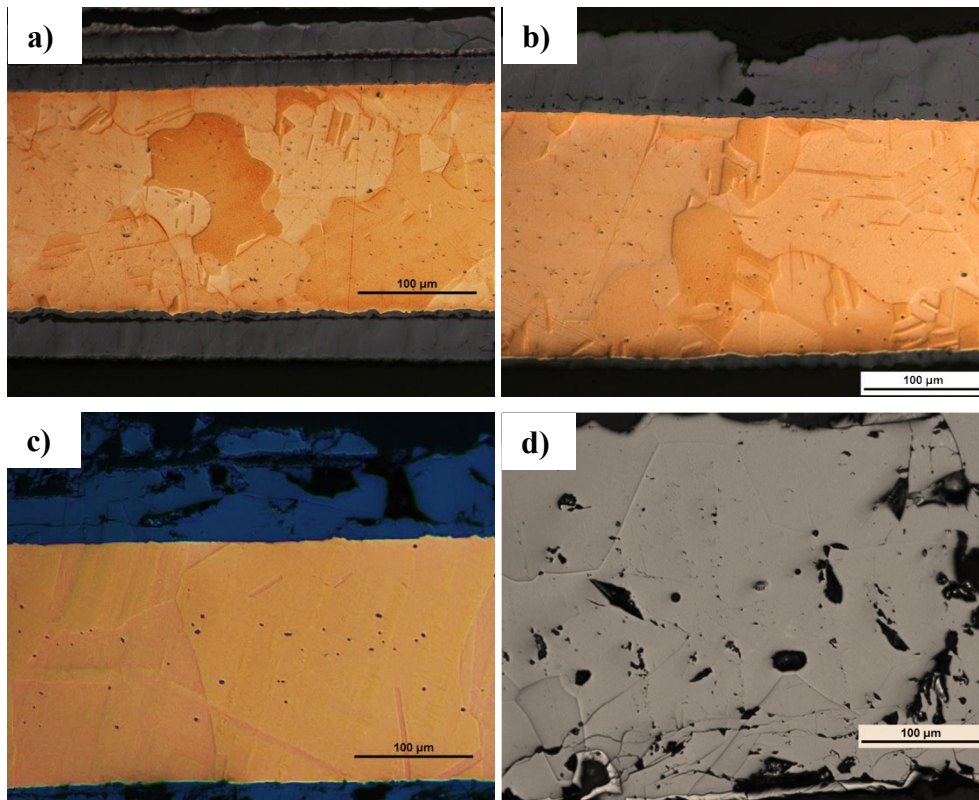


Figura 5.13 Fotomicrografía de los conductores multifilares tratados en aire estático, sección longitudinal (200X) **a)** 800°C durante 20 min **b)** 800°C durante 120 min **c)** 1000°C durante 20 min y **d)** 1000°C durante 120 min

En la tabla 5.6 se muestran los resultados obtenidos de la medición del espesor en la capa de óxido formada en la superficie de los conductores de cobre tras el tratamiento térmico en aire estático, también se ha calculado cuánto representa este espesor en relación al diámetro del cable (ya que a mayor diámetro mayor superficie externa está expuesta a la oxidación y mayor cantidad de material también).

Así pues se puede observar que los conductores multifilares tienen una mayor superficie expuesta en relación a la cantidad de material y por ello una mayor proporción de óxido se obtiene. Existe una influencia directa del tiempo de exposición y la temperatura en el fenómeno de oxidación superficial; como era de esperar, a mayor tiempo y mayor temperatura, el fenómeno de oxidación se incrementa, hasta el punto que para la condición de 1000°C y 120 min, se transforma todo el hilo en óxido para el cable multifilar.

Tabla 5.6 Resumen de medición de la capa de óxido y porcentaje que representa en función del diámetro del hilo para muestras tratadas en aire

Muestra	Tipo	Promedio (µm)	Desviación (µm)	Radio alambre (µm)	Capa de Óxido (%)	Desviación (%)
800°C 20min AIRE	Unifilar Transv	40.07	2.78	860	4.66	0.32
	Multifilar Transv	47.91	8.99	140	34.22	6.42
	Unifilar Long	43.12	1.86	860	5.01	0.22
	Multifilar Long	42.51	2.50	140	30.36	1.78
800°C 120min AIRE	Unifilar Transv	111.31	5.85	860	12.94	0.68
	Multifilar Transv	82.60	3.49	140	59.00	2.49
	Unifilar Long	97.76	1.35	860	11.37	0.16
	Multifilar Long	79.13	6.82	140	56.52	4.87
1000°C 20min AIRE	Unifilar Transv	369.58	5.97	860	42.97	0.69
	Multifilar Transv	Todo se oxidó		140	100.00	0.00
	Unifilar Long	163.67	2.70	860	19.03	0.31
	Multifilar Long	90.27	4.41	140	64.48	3.15
1000°C 120min AIRE	Unifilar Transv	369.58	5.97	860	42.97	0.69
	Multifilar Transv	Todo se oxidó		140	100.00	0.00
	Unifilar Long	459.20	10.97	860	53.40	1.28
	Multifilar Long	Todo se oxidó		140	100.00	0.00

En la figura 5.14 se representa en gráficos de barra la evolución del espesor de la capa de óxido, donde se confirma que en los cables tratados a 1000°C se transforma todo el cable en óxido. Es posible por tanto relacionar el espesor de la capa de óxido formada con la temperatura y tiempo de exposición a una atmósfera con oxígeno.

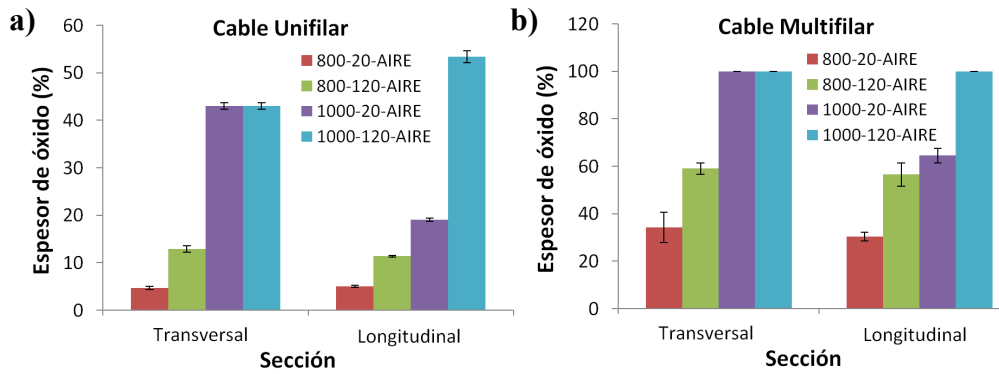


Figura 5.14 Evolución del espesor de la capa de óxido en función del diámetro del cable, evaluado en la sección transversal como en la sección longitudinal **a)** cable unifilar y **b)** cable multifilar

Se ha logrado medir la dureza de los conductores tratados en aire, tanto en el cobre como en la capa de óxido superficial que se ha formado. En la figura 5.15 se observan las indentaciones obtenidas. Se recopilan los valores de microdureza en la tabla 5.7.

Como se observa en la figura 5.15 la dureza de los alambres de cobre unifilares disminuye ligeramente con los tratamientos térmicos en aire, debido básicamente al efecto del aumento del tamaño de grano, siendo más evidente este comportamiento en la sección longitudinal debido a que el efecto de recocido es mayor en esta dirección.

La formación de la capa de óxido en las muestras tratadas en aire tiene un crecimiento proporcional al tiempo de tratamiento térmico y se observa que la dureza de la capa de óxido formada en las muestras longitudinales y transversales tiene una dureza similar. A 800°C durante 20 min la capa de óxido es menos estable y por lo tanto menos dura, a 1000°C la capa de óxido es más dura y frágil, al punto que se generan grietas en esta capa con la indentación de la medición de dureza.

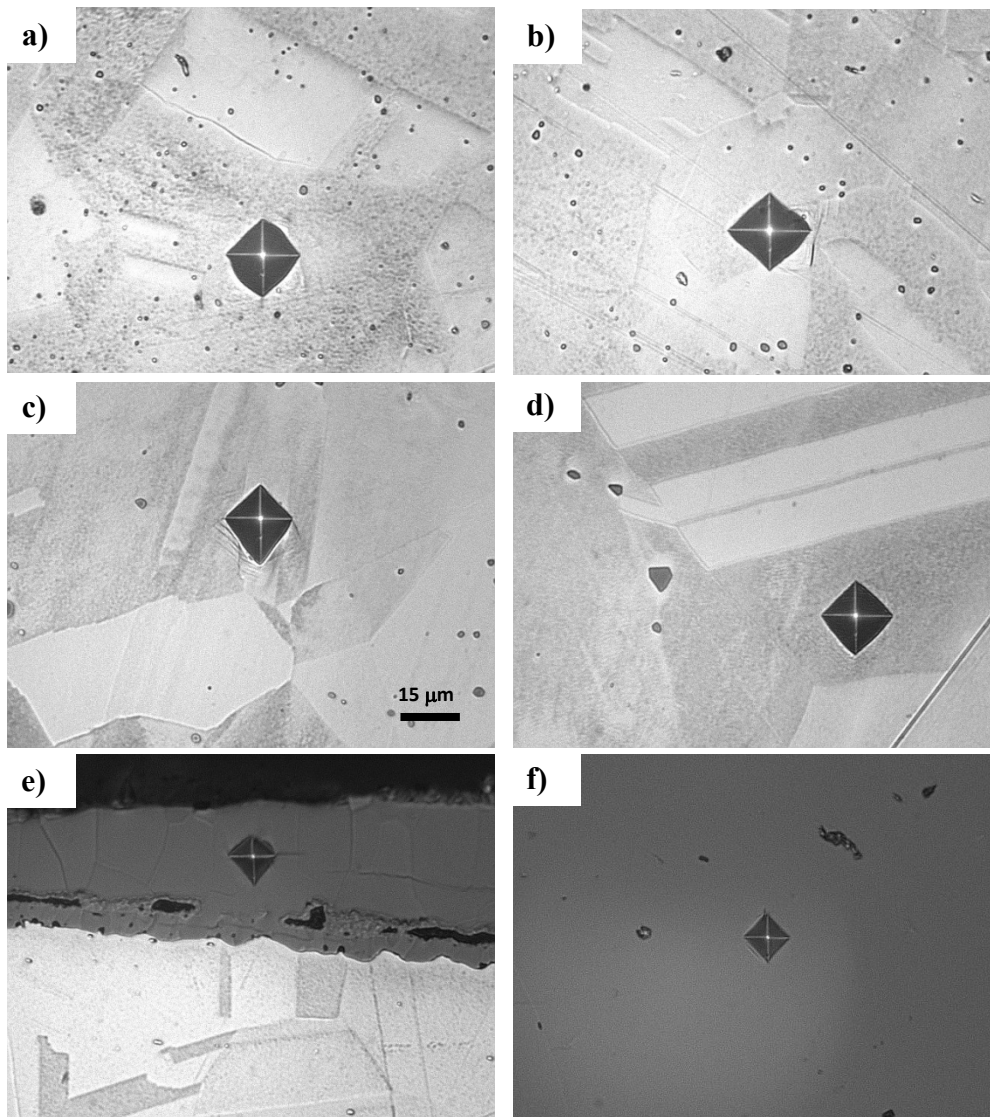
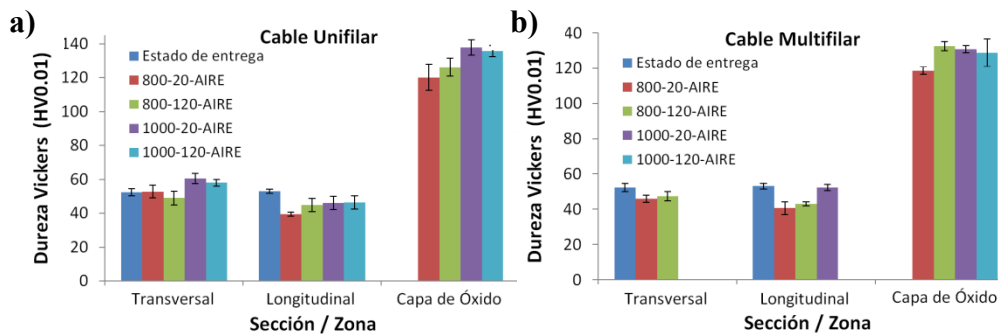


Figura 5.15 Fotografía de las indentaciones en la sección transversal de los conductores unifilares (40X) tratados en aire estático **a)** tratado a 800°C durante 20 min **b)** tratado a 800°C durante 120 min **c)** tratado a 1000°C durante 20 min **d)** tratado a 1000°C durante 120 min **e)** capa de óxido (800°C durante 20 min) y **f)** capa de óxido (tratado a 1000°C durante 20 min)

Tabla 5.7 Resumen de valores de dureza para los conductores de cobre en estado de entrega y tratados térmicamente en aire estático

Microdureza Vickers (HV _{0.1})		Cable Unifilar			Cable Multifilar		
		Transv	Long	Capa de óxido	Transv	Long	Capa de óxido
Estado de entrega	<i>promedio</i>	52.3	53.0	---	55.2	52.3	---
	<i>desviación</i>	2.1	1.2	---	2.3	1.5	---
800°C durante 20 min en AIRE	<i>promedio</i>	52.8	39.4	120.2	45.9	40.6	118.5
	<i>desviación</i>	3.9	1.1	7.5	2.1	3.6	2.2
800°C durante 120 min en AIRE	<i>promedio</i>	48.9	44.9	126.2	47.4	43.1	132.5
	<i>desviación</i>	4.0	3.9	5.2	2.7	1.2	2.6
1000°C durante 20 min en AIRE	<i>promedio</i>	60.5	46.1	137.7	óxido	52.3	130.7
	<i>desviación</i>	2.9	3.9	4.5	óxido	1.7	2.0
1000°C durante 120 min en AIRE	<i>promedio</i>	57.9	46.3	135.7	óxido	óxido	128.7
	<i>desviación</i>	2.0	3.8	3.3	óxido	óxido	7.9

**Figura 5.16** Evolución de la dureza en las muestras de cable tratado en aire, evaluada en la sección transversal, sección longitudinal y capa de óxido **a)** cable unifilar y **b)** cable multifilar

En cuanto a las propiedades mecánicas, en la tabla 5.8 se recopilan las obtenidas del ensayo de tracción uniaxial para las muestras unifilares y en la tabla 5.9 se recopilan las correspondientes para los cables multifilares tratados en aire.

Las propiedades mecánicas de los alambres tratados térmicamente en aire estático disminuyen en comparación con sus propiedades en estado de entrega, la mayor disminución se evidencia en el límite elástico, debido al crecimiento del tamaño de grano, mientras que su resistencia máxima y ductilidad disminuyen en menor proporción que los alambres tratados en vacío. La condición de tratamiento térmico de 800°C y 20 min en los cables unifilares presenta una reducción drástica en el límite elástico, esto se

debido no solo al engrosamiento de la microestructura sino al efecto de oxidación del cobre observado en microscopía. La reducción en la ductilidad de los cables tratados en aire no es tan importante como la observada en los cables tratados en vacío para la temperatura de 800°C, ya que no se ha presentado el fenómeno de fragilización.

Tabla 5.8 Resumen de propiedades mecánicas para los conductores de cobre unifilares en estado de entrega y tratados térmicamente en aire

Condición	Ensayo	Límite elástico (MPa)	Resistencia Máx (MPa)	Modulo Elástico (GPa)	Alargamiento (%)
Estado de Entrega	1	170.88	243.02	56.60	20.50
	2	174.25	250.01	58.83	24.70
	3	173.58	250.48	40.20	24.61
	<i>promedio</i>	172.90	247.84	51.88	23.27
	<i>desviación</i>	1.78	4.18	10.17	2.40
800°C 20 min Aire	1	41.09	199.18	21.89	31.56
	2	35.29	226.24	19.62	33.07
	3	36.49	212.52	21.16	33.95
	<i>promedio</i>	37.62	212.65	20.89	32.86
	<i>desviación</i>	3.06	13.53	1.16	1.21
800°C 120 min Aire	1	55.78	201.58	14.71	32.67
	2	64.35	209.23	15.81	32.91
	3	63.85	205.38	16.62	34.16
	<i>promedio</i>	61.32	205.40	15.71	33.25
	<i>desviación</i>	4.81	3.83	0.96	0.80
1000°C 20 min Aire	1	46.53	162.13	14.36	30.01
	2	48.34	160.61	14.36	30.64
	3	45.50	160.51	18.01	30.57
	<i>promedio</i>	46.79	161.08	15.58	30.41
	<i>desviación</i>	1.43	0.91	2.11	0.34
1000°C 120 min Aire	1	28.82	86.71	8.64	16.57
	2	29.99	84.05	11.76	15.51
	3	30.16	85.95	11.16	15.11
	<i>promedio</i>	29.66	85.57	10.52	15.73
	<i>desviación</i>	0.73	1.37	1.65	0.76

Un aspecto importante a destacar es que los alambres multifilares tratados a 1000°C presentan una elevada fragilidad, al punto que no se pudieron ensayar ya que se rompieron al manipularlos, esto se debe a la oxidación total de todo el cobre presentes en estos alambres debido a su pequeño diámetro (0.26 mm) y la gran superficie externa

expuesta a la atmósfera del tratamiento, sin embargo, las muestras unifilares aunque presentan elevada oxidación sí pudieron ensayarse a tracción, por lo que ello servirá de referencia en este trabajo para comparar las propiedades mecánicas obtenidas. A 800°C, los alambres multifilares pudieron ensayarse aunque presentan una reducción considerable de su ductilidad y resistencia.

Tabla 5.9 Resumen de propiedades mecánicas para los conductores de cobre multifilares en estado de entrega y tratados térmicamente en aire

Condición	Ensayo	Límite elástico (MPa)	Resistencia Máx (MPa)	Modulo Elástico (GPa)	Alargamiento (%)
Estado de entrega	1	170.88	243.02	56.60	20.50
	2	174.25	250.01	58.83	24.70
	3	173.58	250.48	40.20	24.61
	<i>promedio</i>	172.90	247.84	51.88	23.27
	<i>desviación</i>	1.78	4.18	10.17	2.40
800°C 20 min Aire	1	49.07	127.42	37.55	15.27
	2	52.09	129.95	37.57	16.76
	3	48.53	121.34	54.07	14.95
	<i>promedio</i>	49.90	126.24	43.06	15.66
	<i>desviación</i>	1.92	4.42	9.53	0.97
800°C 120 min Aire	1	28.34	39.44	11.25	4.41
	2	25.88	38.43	12.97	7.57
	3	28.33	41.97	8.19	3.61
	<i>promedio</i>	27.51	39.94	10.80	5.20
	<i>desviación</i>	1.42	1.82	2.42	2.09
1000°C 20 min Aire	1	No fue posible ensayar las muestras			
	2				
	3				
	<i>promedio</i>	No fue posible ensayar las muestras			
	<i>desviación</i>				
1000°C 120 min Aire	1	No fue posible ensayar las muestras			
	2				
	3				
	<i>promedio</i>	No fue posible ensayar las muestras			
	<i>desviación</i>				

5.2.3. Microestructura y propiedades de los conductores tratados en atmósferas combinadas de reducción/oxidación

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de los cables de cobre que han sido tratados en combinación de atmósferas y tiempos. En primer lugar se evalúa la secuencia atmósfera de reducción seguida de una atmósfera oxidante, de acuerdo a la secuencia detallada en la tabla 3.2 del capítulo 3. Con ella se busca emular la combinación de temperatura, tiempo y atmósferas que suele presentarse en un cortocircuito primario causante de un incendio. Se realiza un tratamiento térmico de las muestras a temperaturas de 800 y 1000 °C, durante dos tiempos diferentes 20 y 120 minutos en total para cada una, en atmósfera de reducción seguida de oxidación, mitad del tiempo en cada una.

A modo de referencia, y como ejemplo, se utilizará la designación 800-10R-10O para las muestras tratadas a 800°C durante 10 minutos en atmósfera reductora y posteriormente 10 minutos en atmósfera oxidante para un total de 20 minutos de tratamiento térmico, tras ello las muestras se han enfriado en el horno. Otras referencias y tratamientos serán los referenciados como 800-60R-60O, 1000-10R-10O y 1000-60R-60O. Las microestructuras de los cableados obtenidas bajo estas secuencias o combinaciones de atmósferas se muestran a continuación.

En la figura 5.17 se muestran las micrografías para el cable unifilar en su sección transversal. De las micrografías obtenidas se observa, como era de esperar, un crecimiento en el tamaño de grano con la temperatura, respecto al encontrado en la microestructura en estado de entrega, tanto en la sección transversal, figura 5.17, como en la sección longitudinal de los conductores, figura 5.18. A una misma temperatura y con mayor tiempo de tratamiento térmico también se observa un engrosamiento de la microestructura, siendo evidente en la sección longitudinal de los conductores. Otro efecto que se evidencia es el crecimiento de la capa de óxido en la superficie debido a la presencia de oxígeno en la atmósfera de tratamiento final, no se genera óxido superficial en la etapa inicial de tratamiento en atmósfera reductora y por lo tanto toda la capa de óxido puede atribuirse a la segunda etapa en atmósfera oxidante, se puede constatar que la capa de óxido que ha crecido por efecto térmico y favorecida por la atmósfera es menor que la observada en las muestras tratadas en aire, debido al menor tiempo de exposición a la atmósfera oxidante (la mitad).

Se ha observado en las muestras de alambre unifilar tratadas a 800°C segregaciones en bordes de grano, en el caso de menor tiempo de aplicación (10R-10O) éstas se dan en la periferia del conductor, de lo que se deduce que son fruto de una difusión limitada por el tiempo de aplicación de gases de atmósfera reductora, hidrógeno, a través de borde de grano y la reducción del Cu_2O , formando vapor de agua y dislocaciones intergranulares. En el caso de mayor tiempo de aplicación (60R-60O) este efecto aparece combinado con el observado a bajo vacío; puede comprobarse la fragilización en borde de grano en todo el conductor y como ésta es más pronunciada en la periferia, junto con un tamaño de grano mayor. Este fenómeno de difusión del oxígeno o hidrógeno en

estado sólido ha sido descrito por diversos autores, e involucra la difusión del hidrógeno dentro del cobre y la reacción del oxígeno ya sea directamente o por reducción de Cu_2O (Nieh y Nix, 1981), ya que en el cobre el oxígeno se encuentra en forma de Cu_2O en estado sólido (Herenguel, 1976). En estado sólido, el vapor de agua formado por la reacción de reducción en la etapa inicial de tratamiento no puede escapar más que provocando una dislocación intergranular, segregándose en los bordes de grano (Herenguel, 1976) con forma de “burbujas de agua o vapor”.

En la etapa final de oxidación no hay una recuperación de la segregación en los bordes de grano e incluso el oxígeno logra penetrar el borde de grano adyacente a la superficie del conductor generándose óxido intergranular, como se observa claramente en la figura 5.18b (corte longitudinal).

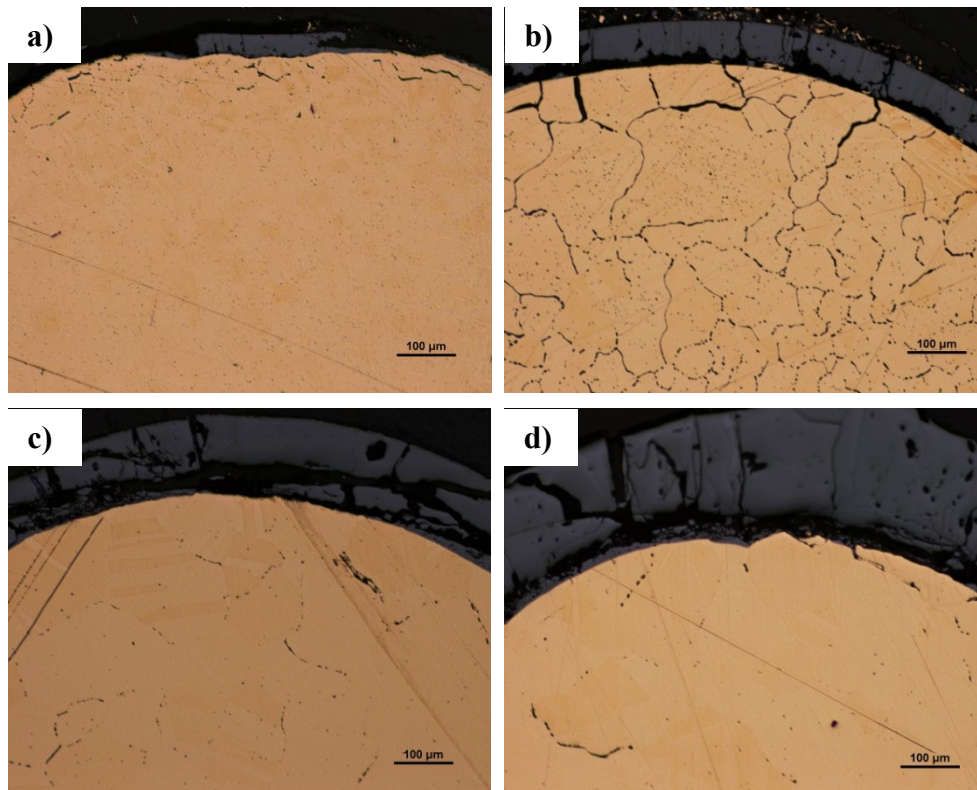


Figura 5.17 Fotomicrografía de los conductores unifilares tratados en atmósferas combinadas de reducción/oxidación, sección transversal (100X) **a)** 800-10R-10O **b)** 800-60R-60O **c)** 1000-10R-10O y **d)** 1000-60R-60O

A 1000°C, estos efectos descritos, al igual que ocurriera con el tratamiento en bajo vacío, aunque también apreciables, son menos llamativos, figuras 5.17c y 5.17d.

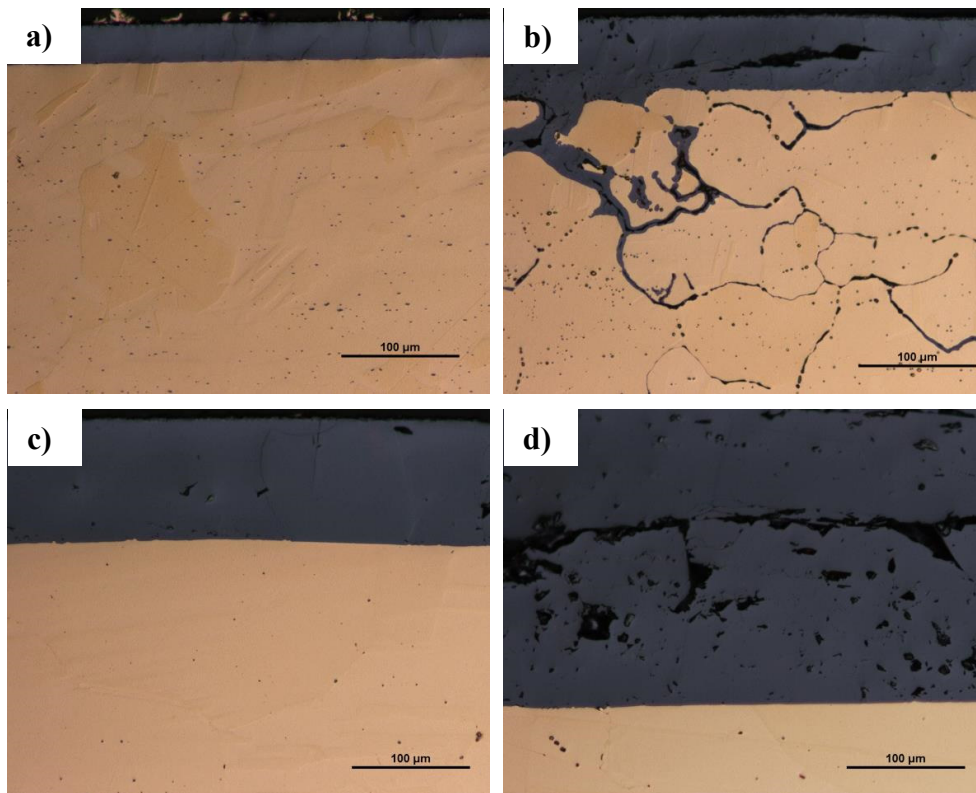


Figura 5.18 Fotomicrografía de los conductores unifilares tratados en atmósferas combinadas de reducción/oxidación, sección longitudinal (200X) **a)** 800-10R-10O **b)** 800-60R-60O **c)** 1000-10R-10O y **d)** 1000-60R-60O

En las muestras de cableado multifilar, figuras 5.19 y 5.20, se observa similar comportamiento al observado en los cables unifilares tanto para las condiciones de 800°C como para las de 1000°C. Cabe tener en cuenta la diferencia de tamaño de los hilos y entender que la difusión de hidrógeno propia de la atmósfera reductora será más rápida por el menor diámetro del conductor.

Si se compara el grado de oxidación alcanzado en este ensayo de atmósferas combinadas con los resultados obtenidos del tratamiento en aire estático se tiene que el grado de oxidación es menor y no todo el material de los cables multifilares se transforma en óxido, incluso para la condición más exigente (1000-60R-60O) tal como se observa en las figuras 5.19d y 5.20d.

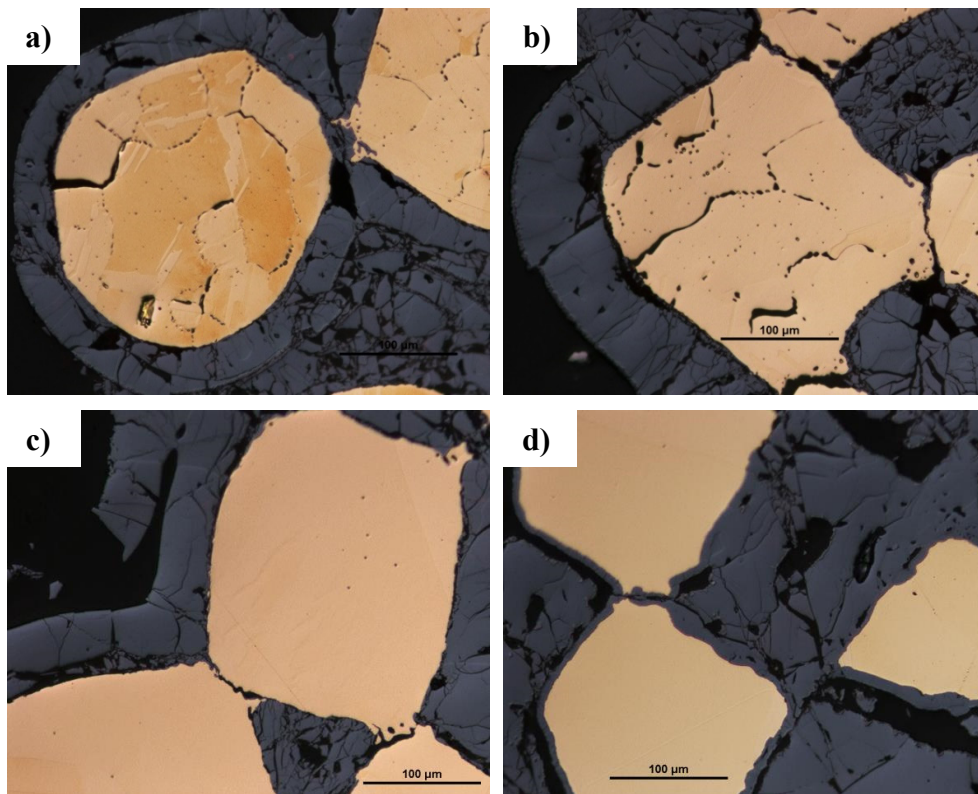


Figura 5.19 Fotomicrografía de los conductores multifilares tratados en atmósferas combinadas de reducción/oxidación, sección transversal (200X) **a)** 800-10R-10O **b)** 800-60R-60O **c)** 1000-10R-10O y **d)** 1000-60R-60O

Se comprueba sobre el cableado multifilar la formación incipiente de cuellos de sinterización entre hilos. Su forma y el hecho de que la capa de óxido no muestre a los hilos separados revela la secuencia de acontecimientos; primero ocurrió la unión y posteriormente la oxidación.

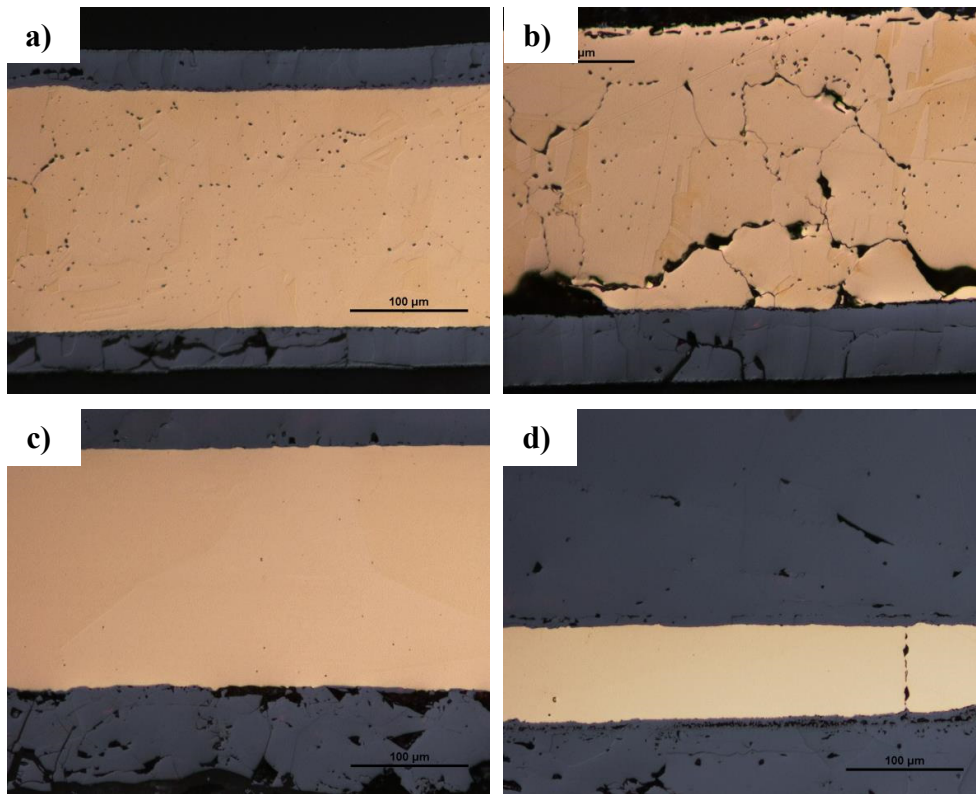


Figura 5.20 Fotomicrografía de los conductores multifilares tratados en atmósferas combinadas de reducción/oxidación, sección longitudinal (200X) **a)** 800-10R-10O **b)** 800-60R-60O **c)** 1000-10R-10O y **d)** 1000-60R-60O

Se ha medido el espesor de capa de óxido en la superficie de las muestras tratadas, ya que al combinar atmósferas de reducción seguida de una de oxidación, crece el óxido. Se ha calculado el porcentaje que representa el espesor de la capa de óxido formada en comparación con el radio inicial de cada conductor. En la tabla 5.10 se muestra la tabla resumen con los valores obtenidos.

Tabla 5.10 Resumen de medición de la capa de óxido y porcentaje que representa en función del diámetro del hilo para muestras tratadas en atmósferas de Reducción/Oxidación

Muestra	Tipo	Promedio (μm)	Desviación (μm)	Radio alambre (μm)	Capa de Óxido (% del radio)	Desviación (%)
800- 10R/10O	Unifilar Transv	37.29	1.16	860	4.34	0.13
	Multifilar Transv	33.70	1.32	140	24.07	0.94
	Unifilar Long	31.69	0.49	860	3.69	0.06
	Multifilar Long	34.24	2.55	140	24.46	1.82
800- 60R/60O	Unifilar Transv	63.62	1.12	860	7.40	0.13
	Multifilar Transv	62.71	2.36	140	44.79	1.68
	Unifilar Long	62.65	1.66	860	7.28	0.19
	Multifilar Long	57.84	1.42	140	41.32	1.02
1000- 10R/10O	Unifilar Transv	76.42	2.36	860	8.89	0.27
	Multifilar Transv	39.28	1.57	140	28.06	1.12
	Unifilar Long	99.97	2.35	860	11.62	0.27
	Multifilar Long	64.81	4.20	140	46.29	3.00
1000- 60R/60O	Unifilar Transv	167.44	7.49	860	19.47	0.87
	Multifilar Transv	56.36	1.56	140	40.25	0.00
	Unifilar Long	153.11	5.00	860	17.80	0.58
	Multifilar Long	97.80	6.30	140	69.85	4.50

Las muestras de cables tratadas en atmósfera combinada de reducción, seguida de una atmósfera oxidante no presentan una degradación total, como la que se observó en las muestras tratadas en aire estático debido a que el tiempo de exposición en la atmósfera oxidante fue menor. La capa de óxido se observa estable pero frágil en la superficie de todos los cables tratados. En las gráficas de la figura 5.21 se observa las condiciones de temperatura y tiempo donde se obtiene la mayor oxidación bajo esta combinación de reducción/oxidación.

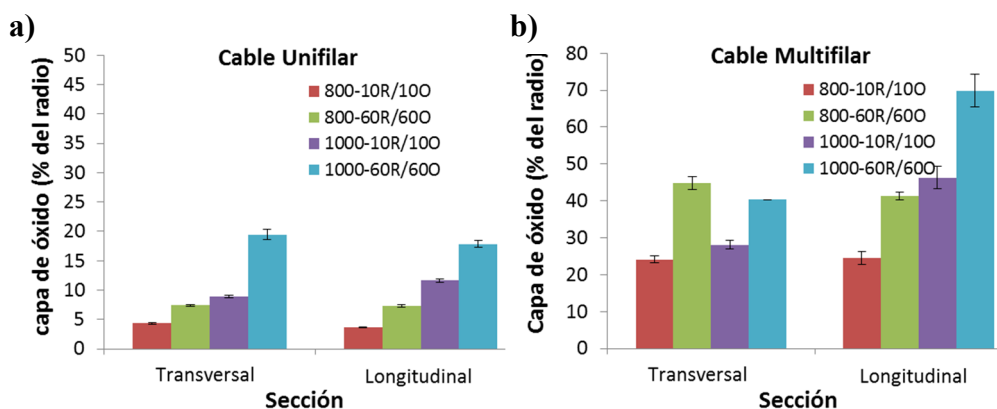


Figura 5.21 Evolución del espesor de la capa de óxido en función del diámetro del cable, evaluado en la sección transversal y en la sección longitudinal de muestras tratadas en atmósferas combinadas de reducción/oxidación **a)** cable unifilar y **b)** cable multifilar

En la figura 5.22 se observa las indentaciones realizadas en los cables unifilares, el tamaño de las indentaciones a 800°C y a 1000°C son similares para iguales tiempos de permanencia en las atmósferas combinadas. En las indentaciones realizadas en la capa de óxido, figura 5.23, se obtienen menores tamaños, por lo que estas capas son mucho más duras, y con un comportamiento frágil como se observa en la figura 5.23a. Se ha promediado los valores de dureza obtenidos de seis mediciones en cada condición y se ha calculado la desviación estándar de los datos obtenidos. En la tabla se muestran los resultados de dureza.

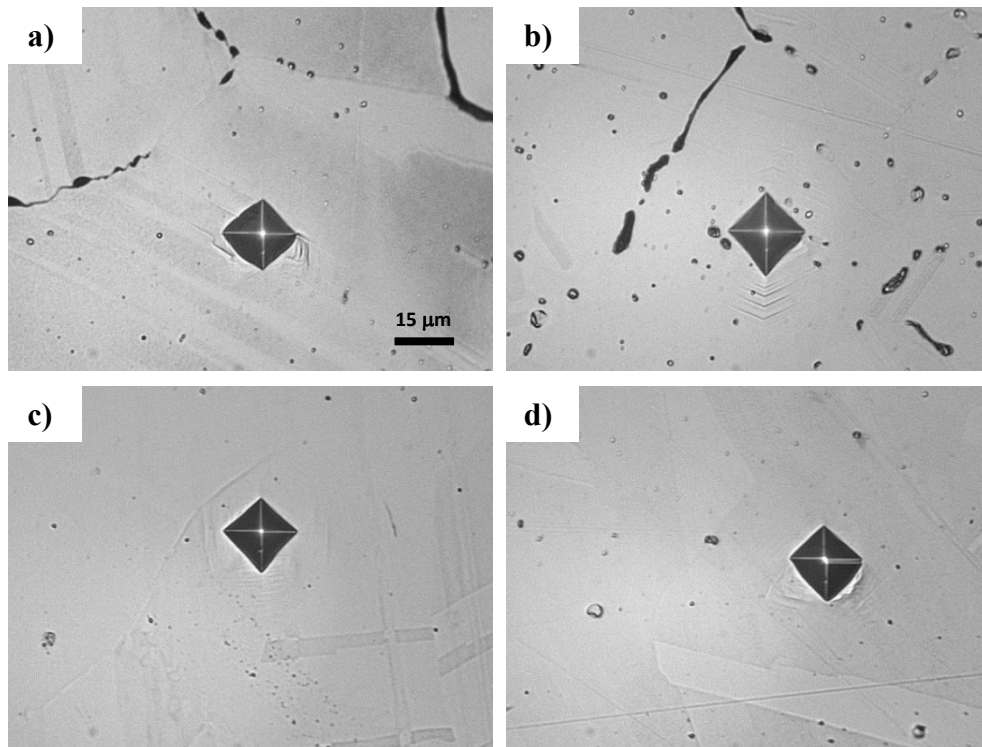


Figura 5.22 Fotografía de las indentaciones en la sección transversal de los conductores unifilares (40X) tratados en atmósferas de reducción/oxidación **a)** 800°C-10O-10R **b)** 800°C-60O-60R **c)** 1000°C-10O-10R y **d)** 1000°C-60O-60R

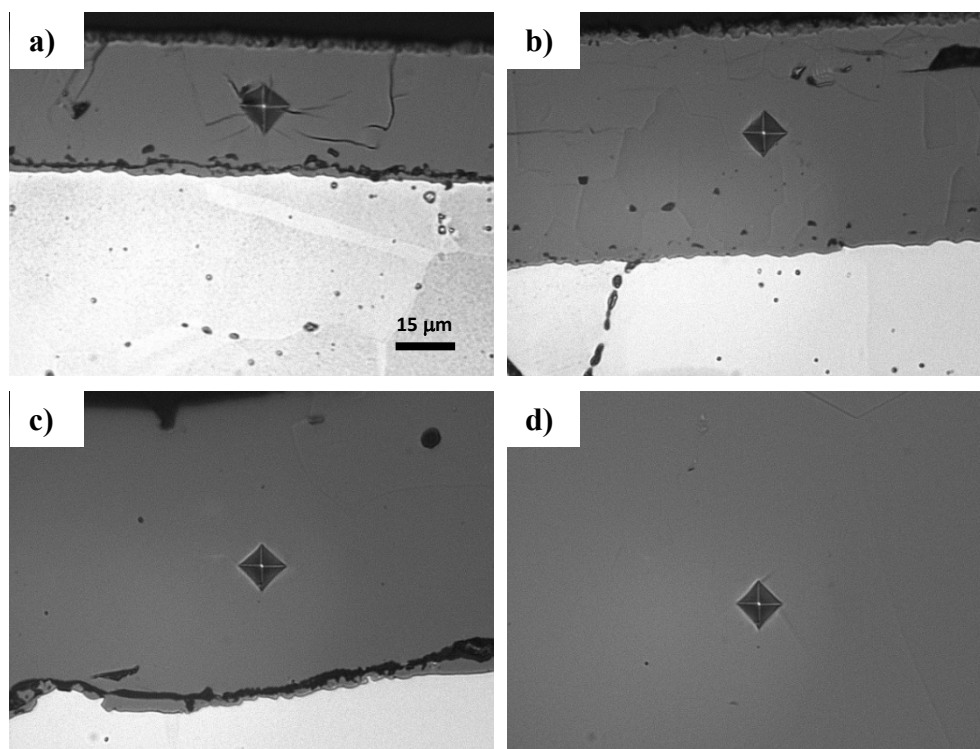


Figura 5.23 Fotografía de las indentaciones en la sección transversal de la capa de óxido superficial en conductores multifilares (40X) tratados en atmósferas de reducción/oxidación **a)** 800°C-10O-10R **b)** 800°C-60O-60R **c)** 1000°C-10O-10R y **d)** 1000°C-60O-60R

Tabla 5.11 Resumen de valores de dureza para los conductores de cobre en estado de entrega y tratados en atmósferas combinadas de reducción/oxidación

Microdureza Vickers (HV _{0.1})		Cable Unifilar			Cable Multifilar		
		Transv	Long	Capa de óxido	Transv	Long	Capa de óxido
Estado de entrega	<i>promedio</i>	52.3	53.0	---	55.2	52.3	---
	<i>desviación</i>	2.1	1.2	--	2.3	1.5	---
800-10R-10O	<i>promedio</i>	49,5	40,0	119,7	53,9	39,9	118,2
	<i>desviación</i>	1,3	1,8	9,4	1,8	2,4	8,4
800-60R-60O	<i>promedio</i>	50,1	38,8	128,3	45,5	48,1	132,0
	<i>desviación</i>	2,2	2,9	6,9	4,3	3,3	3,4
1000-10R-10O	<i>promedio</i>	48,4	49,1	133,2	42,5	47,1	130,5
	<i>desviación</i>	4,8	2,9	3,3	3,5	2,5	1,5
1000-60R-60O	<i>promedio</i>	53,0	48,0	129,0	52,1	43,2	130,5
	<i>desviación</i>	2,9	2,9	2,4	2,0	2,8	1,5

En el caso de la resistencia mecánica, se pudo observar que los conductores unifilares presentan una mayor resistencia que los multifilares, debido a que por su pequeño diámetro el grado de degradación por la oxidación final hace que los conductores sean muy frágiles, e incluso los tratados a 1000°C no pudieron ensayarse a tracción. En la tabla 5.12 se muestran los resultados obtenidos en los cables unifilares, mientras que en la tabla 5.13 se recopilan los resultados de los ensayos de tracción en cables multifilares tratados a 800°C durante 10 min de reducción seguido de 10 min de oxidación.

Los cables multifilares tratados a 800°C durante 60 min en reducción y 60 min en oxidación no se pudieron ensayar, así como tampoco los tratados a 1000°C, debido a que la oxidación en la última etapa de ensayo fragilizó de tal forma los cables, que fue imposible su manipulación (se rompieron en el montaje en la máquina de tracción).

Tabla 5.12 Resumen de propiedades mecánicas para los conductores unifilares de cobre en estado de entrega y tratados en atmósferas combinadas de reducción/oxidación

Condición	Ensayo	Límite elástico (MPa)	Resistencia Máx (MPa)	Modulo Elástico (GPa)	Alargamiento (%)
Estado de entrega	1	170.88	243.02	56.60	20.50
	2	174.25	250.01	58.83	24.70
	3	173.58	250.48	40.20	24.61
	promedio	172.90	247.84	51.88	23.27
	desviación	1.78	4.18	10.17	2.40
800°C durante 10 min RED y 10 min OXID	1	47.45	194.43	19.33	21.10
	2	38.42	204.60	16.82	21.27
	3	38.90	190.19	12.26	21.57
	promedio	41.59	196.41	16.14	21.31
	desviación	5.08	7.41	3.58	0.24
800°C durante 60 min RED y 60 min OXID	1	51.02	74.41	12.80	4.73
	2	51.00	73.99	12.32	4.21
	3	45.57	65.20	13.35	3.99
	promedio	49.19	71.20	12.83	4.31
	desviación	3.14	5.20	0.51	0.38
1000°C durante 10 min RED y 10 min OXID	1	37.95	97.41	9.80	11.89
	2	38.33	86.57	17.25	6.64
	3	36.39	104.99	15.87	10.87
	promedio	37.56	96.32	14.31	9.80
	desviación	1.03	9.26	3.96	2.78
1000°C durante 60 min RED y 60 min OXID	1	27.94	85.82	15.90	14.39
	2	30.59	91.14	10.07	13.93
	3	28.07	88.74	9.31	13.43
	promedio	28.87	88.57	11.76	13.91
	desviación	1.50	2.66	3.61	0.48

Las propiedades mecánicas de los alambres tratados térmicamente en atmósferas de reducción/oxidación disminuyen en comparación con sus propiedades en estado de entrega, o tratados en vacío, la mayor disminución se evidencia en el límite elástico, sobre todo en las muestras tratadas a 800°C, debido al crecimiento del tamaño de grano, y a la fragilización por hidrógeno/oxígeno observada mediante microscopía en el borde de grano, mientras que su resistencia máxima y ductilidad disminuyen en menor proporción que la disminución observada en alambres tratados en vacío.

Los alambres multifilares tratados durante 60 minutos de oxidación a 800°C y 1000°C, así como los cables tratados durante 10 minutos de oxidación a 1000°C, presentan una degradación total debido a la oxidación de casi todo el cobre que constituye el cable, por lo que no fue posible determinar las propiedades a tracción en estos cables. Sin embargo, en los cables unifilares si se pudo realizar el ensayo y servirán de comparación para otras condiciones de estudio.

Un aspecto importante a destacar es que los alambres unifilares tratados a 800°C durante 60 minutos de reducción y 60 minutos de oxidación presentan una elevada fragilidad, disminuyendo considerablemente su resistencia mecánica, esto se debe a que la fragilización por hidrógeno/oxígeno se incrementa con el tiempo de oxidación particularmente para esta temperatura, incrementando los defectos presentes en los límites de grano en la microestructura del conductor, lo cual reduce su resistencia, aun cuando se presenta el fenómeno de engrosamiento de la microestructura. Los resultados obtenidos permiten comparar las propiedades mecánicas obtenidas con otros tratamientos que simulen las condiciones de un incendio en el que se haya cortocircuitos primarios o secundarios, en particular para los cables unifilares.

Tabla 5.13 Resumen de propiedades mecánicas para los conductores multifilares de cobre en estado de entrega y tratados en atmósferas combinadas de reducción/oxidación

Condición	Ensayo	Límite elástico (MPa)	Resistencia Máx (MPa)	Modulo Elástico (GPa)	Alargamiento (%)
Estado de entrega	1	145.77	199.68	61.33	19.66
	2	152.77	205.77	61.95	22.57
	3	150.52	205.33	64.76	20.86
	promedio	149.69	203.59	62.68	21.03
	desviación	3.57	3.40	1.83	1.46
800°C durante 10 min RED y 10 min OXID	1	16.87	24.80	15.07	0.94
	2	21.63	25.11	14.60	0.73
	3	20.30	29.50	19.19	0.63
	promedio	19.60	26.47	16.29	0.77
	desviación	2.46	2.63	2.53	0.16

5.2.4. Microestructura y propiedades de los conductores tratados en atmósferas combinadas de oxidación/reducción

Finalizando con la evaluación de la influencia de temperatura, tiempos y combinación de atmósferas en la microestructura y propiedades mecánicas de los conductores de cobre en estudio, en esta sección se muestran los resultados obtenidos de los cables de cobre que han sido tratados en combinación de atmósferas de oxidación seguida de reducción. Con ella se busca emular la combinación de temperatura, tiempo y atmósferas que suele presentarse en un cortocircuito secundario, el cual se produce como consecuencia del alcance de las llamas. En estas circunstancias de alcance de las llamas en primer lugar existe una atmósfera oxidante y posteriormente una atmósfera reductora al verse los conductores afectados de forma directa en el seno del fuego.

A modo de referencia, y como ejemplo, se utilizará la designación 800-100-10R para las muestras tratadas a 800°C durante 10 minutos en atmósfera oxidante y posteriormente 10 minutos en atmósfera reductora para un total de 20 minutos de tratamiento térmico, tras ello las muestras se han enfriado en el horno. Otras referencias y tratamientos serán los referenciados como 800-600-60R, 1000-100-10R y 1000-600-60R. Las microestructuras de los cableados obtenidas bajo estas secuencias o combinaciones de atmósferas se muestran a continuación.

En la figura 5.24 se muestran las micrografías para el cable unifilar en su sección transversal. De las micrografías obtenidas se observa, como cabía esperar, un crecimiento en el tamaño de grano con la temperatura, respecto al encontrado en la microestructura en estado de entrega, tanto en la sección transversal, figura 5.24, como en la sección longitudinal de los conductores figura 5.25. A una misma temperatura y con mayor tiempo de tratamiento térmico también se observa un engrosamiento de la microestructura, siendo evidente en la sección longitudinal de los conductores.

El efecto de la etapa final en atmósfera reductora es la reducción de la capa de óxido formada en la etapa inicial, la cual queda porosa debido a la formación de vapor de agua, por medio del mismo mecanismo con que se forman las segregaciones causadas por fragilización por hidrógeno. En este sentido, a 800°C se comprueba la formación de segregaciones de precipitados de Cu_2O , con mayor grado de penetración en el conductor que en el caso de bajo vacío, sin duda debido a una mayor concentración de oxígeno en el interior del cobre debido a su difusión hacia el interior del conductor en la fase inicial; formándose además dislocaciones intergranulares debido a fragilización por hidrógeno a consecuencia de la difusión de éste en la fase final del tratamiento. A 1000°C estas segregaciones no aparecen posiblemente debido a la difusión de los óxidos o del vapor formado hacia el perímetro exterior del conductor.

A diferencia de las muestras tratadas en vacío, una considerable capa de óxido reducida puede observarse en las muestras tratadas durante 120 minutos (800-600-60R y 1000-600-60R). En el caso de las muestras de alambre tratadas a 1000 °C durante 20 minutos (1000-100-10R) se observa que no toda la capa de óxido formada en la etapa de oxidación ha logrado reducirse, figura 5.24c, debido a que el tiempo de tratamiento

en la atmósfera reductora no ha sido suficiente para lograr la reacción de reducción total.

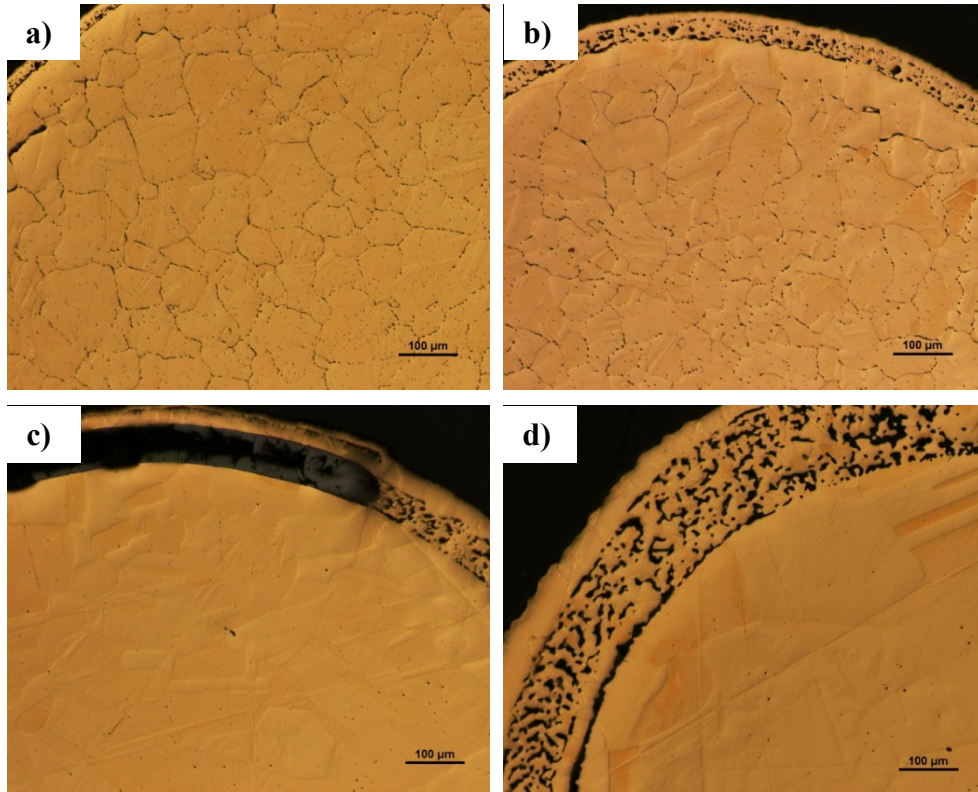


Figura 5.24 Fotomicrografía de los conductores unifilares tratados en atmósferas combinadas de oxidación/reducción, sección transversal (100X) **a)** 800-10O-10R **b)** 800-60O-60R **c)** 1000-10O-10R y **d)** 1000-60O-60R

En el caso de las muestras unifilares, una gran parte del conductor se ha transformado en óxido y luego se ha reducido éste. Sin embargo, en los conductores multifilares no ha sido así, en este caso el material oxidado se ha reducido completamente debido al reducido diámetro de los hilos y su mayor superficie de exposición, figuras 5.26 y 5.27. A partir de estas imágenes de microscopía óptica se ha podido medir el espesor de la capa de óxido de forma indirecta, al medir la capa de óxido reducido presente en la superficie.

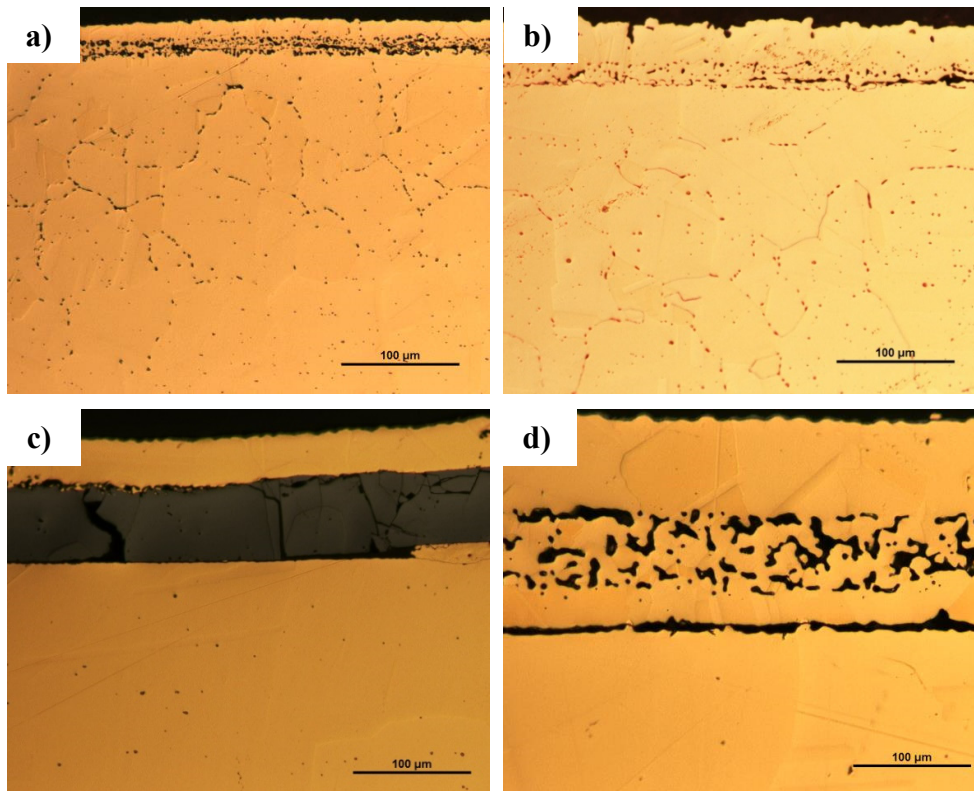


Figura 5.25 Fotomicrografía de los conductores unifilares tratados en atmósferas combinadas de oxidación/reducción, sección longitudinal del conductor (100X) **a)** 800-100-10R **b)** 800-600-60R **c)** 1000-100-10R y **d)** 1000-600-60R

Sobre el conjunto de conductores multifilares, en lo referente a la segregación intergranular se observa lo mismo que para los conductores unifilares, si bien el efecto es más pronunciado al tener un menor diámetro.

Además de ello, en esta secuencia Oxidación/Reducción se observa la ausencia de cuellos de sinterización entre los hilos del conductor, contrariamente a lo comprobado en la secuencia Reducción/Oxidación. En este caso se puede ver que la capa de óxido formada en la primera fase ha protegido al conductor de su sinterización, figura 5.26. Su forma revela la secuencia acontecida.

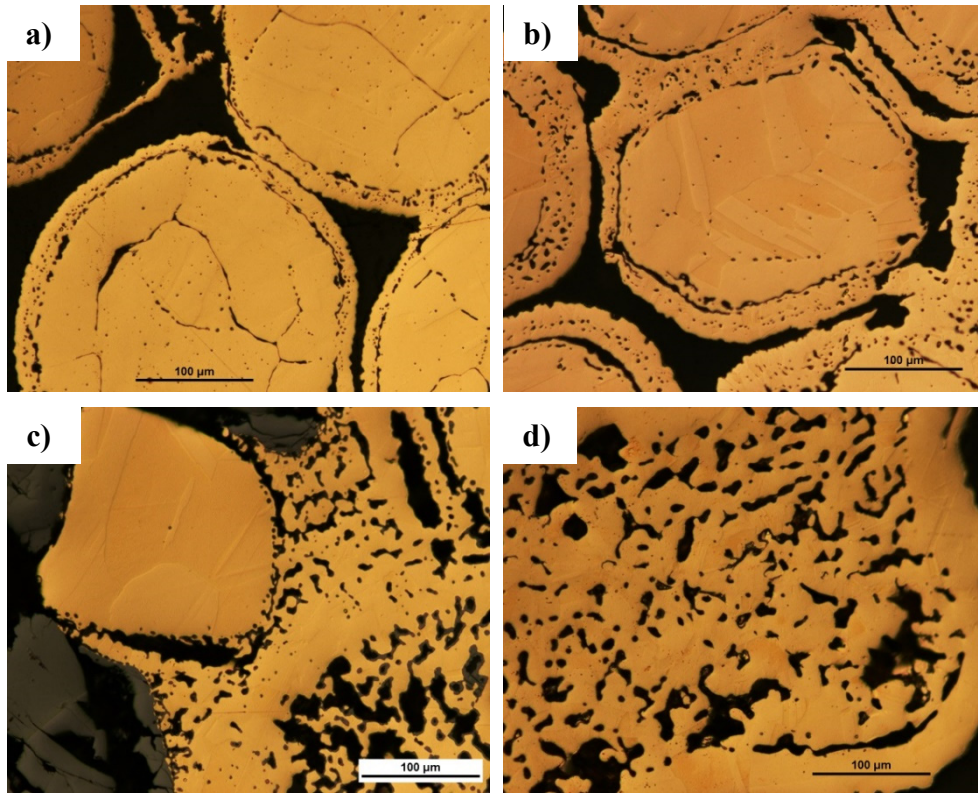


Figura 5.26 Fotomicrografía de los conductores multifilares tratados en atmósferas combinadas de oxidación/reducción, sección transversal (200X) **a)** 800-100-10R **b)** 800-600-60R **c)** 1000-100-10R y **d)** 1000-600-60R

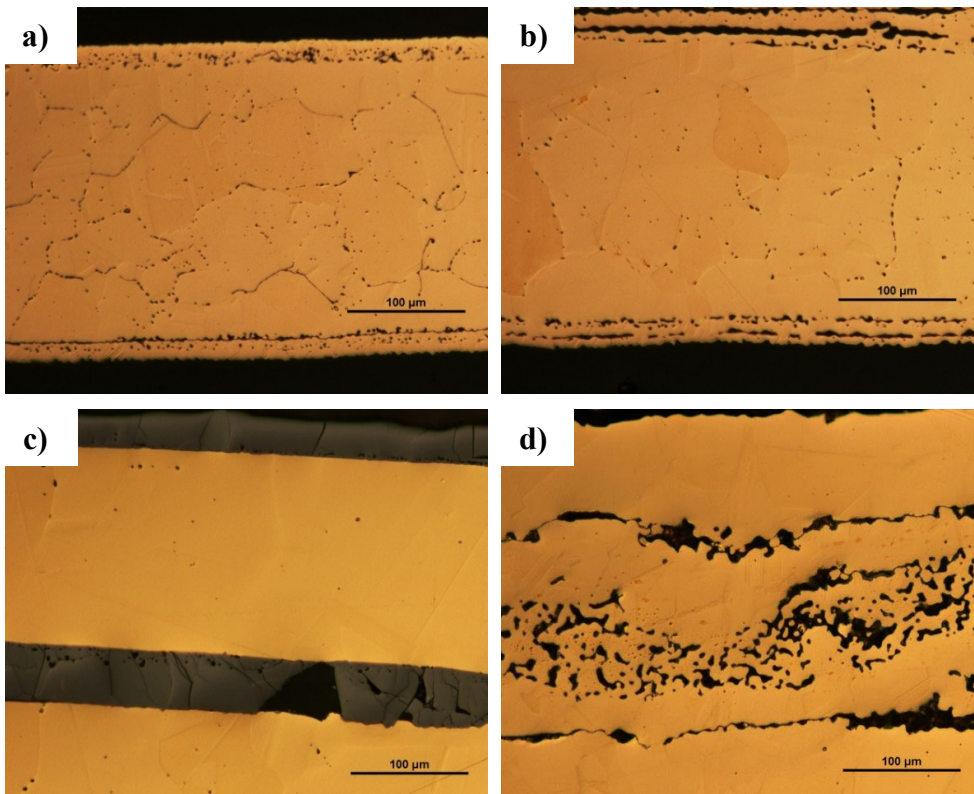


Figura 5.27 Fotomicrografía de los conductores multifilares tratados en atmósferas combinadas de oxidación/reducción, sección longitudinal del conductor (200X) **a)** 800-10O-10R **b)** 800-60O-60R **c)** 1000-10O-10R y **d)** 1000-60O-60R

Se ha medido el espesor de la capa de óxido reducida, con lo cual se puede evaluar la afectación del conductor bajo efecto de las atmósferas combinadas, en la tabla 5.14 se recopilan los valores obtenidos.

Tabla 5.14 Resumen de medición de la capa de óxido reducida y porcentaje que representa en función del diámetro del hilo para muestras tratadas en atmósferas de Oxidación/Reducción

Muestra	Tipo	Promedio (μm)	Desviación (μm)	Radio alambre (μm)	Capa de Óxido Red (%)	Desviación (%)
800- 100/10R	Unifilar Transv	24.30	1.40	860	2.83	0.16
	Multifilar Transv	17.68	0.79	140	12.63	0.57
	Unifilar Long	26.00	1.33	860	3.02	0.15
	Multifilar Long	20.34	0.98	140	14.53	0.70
800- 60O/60R	Unifilar Transv	45.18	1.86	860	5.25	0.22
	Multifilar Transv	28.93	2.11	140	20.66	1.51
	Unifilar Long	52.03	3.38	860	6.05	0.39
	Multifilar Long	23.86	2.19	140	17.04	1.57
1000- 100/10R	Unifilar Transv	93.22	2.13	860	10.84	0.25
	Multifilar Transv	31.82	3.79	140	22.73	2.70
	Unifilar Long	108.60	1.94	860	12.63	0.23
	Multifilar Long	31.17	2.35	140	22.26	1.68
1000- 60O/60R	Unifilar Transv	181.02	6.32	860	21.05	0.74
	Multifilar Transv	Todo el conductor convirtió en óxido		140	100.00	0.00
	Unifilar Long	174.51	2.96	860	20.29	0.34
	Multifilar Long	120.64	13.75	140	86.17	9.82

En la gráfica de la figura 5.28 se muestra la comparación del espesor de la capa de óxido reducida, expresada como un porcentaje del diámetro de los conductores. Las muestras de cable multifilar tratadas a 1000°C durante 60 minutos en oxidación y 60 minutos en reducción presentan una degradación total, al punto de que todo el material del cable se ha transformado en óxido y luego éste se ha reducido quedando poroso, lo cual hace que éstos sean muy frágiles.

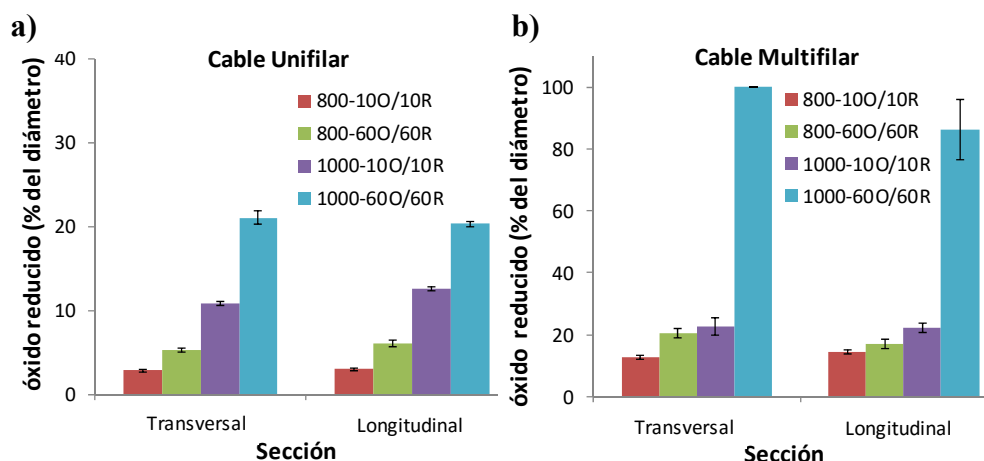


Figura 5.28 Evolución del espesor de la capa de óxido reducida en función del diámetro del cable, evaluado en la sección transversal y en la sección longitudinal de muestras tratadas en atmósferas combinadas de oxidación/reducción **a)** cable unifilar y **b)** cable multifilar

En la figura 5.29 se muestran las indentaciones realizadas en la sección transversal de los cables unifilares tratados en atmósferas combinadas de oxidación/reducción, similar comportamiento se ha obtenido en los cables multifilares. Como se observa en las figuras la dureza de los alambres de cobre unifilares disminuyen ligeramente con la temperatura y el tiempo de tratamiento térmico, debido básicamente al efecto del aumento del tamaño de grano (aunque esta tendencia no es clara en los alambres unifilares), siendo más evidente este comportamiento en la sección longitudinal debido a que el efecto de recocido es mayor en esta dirección.

La formación de la capa de óxido generada en la etapa inicial con la atmósfera oxidante es completamente reducida en la etapa de tratamiento en la atmósfera reductora con pequeños poros atrapados en el material, lo cual es típico en los procesos de reducción, la capa de óxido inicial quizás sea más dura y frágil, aunque tras la reducción el comportamiento de su dureza sea como el del cobre.

Un resultado a destacar, es que la dureza en la sección transversal del cable unifilar de las muestras ensayadas a 1000°C es similar a las muestras en estado de entrega, ya que con esta combinación de atmósferas no se genera fragilización por hidrogeno en borde de grano y se tiene baja afectación de esta propiedad. El resumen de los resultados obtenidos en la medición de microdureza se recopila en la tabla 5.15.

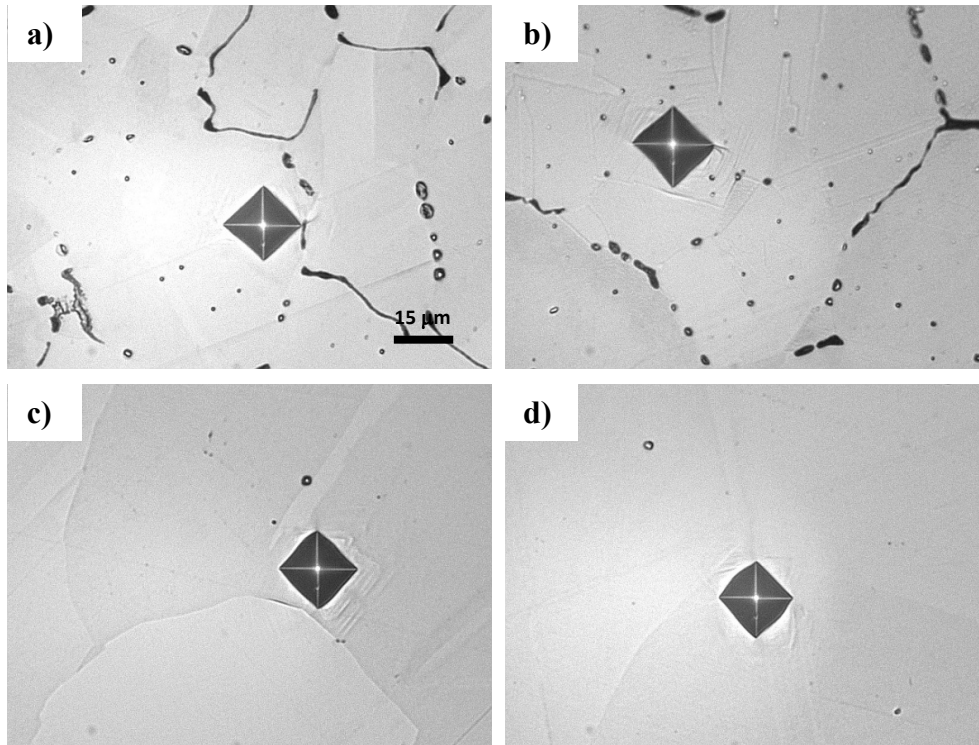


Figura 5.29 Fotografía de las indentaciones en la sección transversal de los conductores unifilares (40X) tratados en atmósferas de oxidación/reducción **a)** 800°C-10O-10R **b)** 800°C-60O-60R **c)** 1000°C-10O-10R y **d)** 1000°C-60O-60R

Tabla 5.15 Resumen de valores de dureza para los conductores de cobre en estado de entrega y tratados en atmósferas combinadas de oxidación/reducción

Microdureza Vickers (HV _{0.1})	Cable Unifilar		Cable Multifilar		
	Transv	Long	Transv	Long	
Estado de entrega	<i>promedio</i>	52.3	53.0	55.2	52.3
	<i>desviación</i>	2.1	1.2	2.3	1.5
800°C-10O-10R	<i>promedio</i>	51.0	45.7	55.8	48.8
	<i>desviación</i>	2.8	3.1	5.0	2.9
800°C-60O-60R	<i>promedio</i>	48.2	44.6	44.5	47.2
	<i>desviación</i>	2.1	1.4	1.2	1.2
1000°C-10O-10R	<i>promedio</i>	55.0	41.6	53.7	46.4
	<i>desviación</i>	2.5	2.4	2.7	1.9
1000°C-60O-60R	<i>promedio</i>	53.0	42.7	44.4	43.5
	<i>desviación</i>	3.2	2.4	3.4	1.8

En cuanto a las propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de tracción, se observa que la etapa final en atmósfera reductora reduce considerablemente la fragilidad de los conductores de cobre. En la tabla 5.16 se muestran los resultados obtenidos en los conductores unifilares, mientras que en la tabla 5.17 se tienen los obtenidos en los conductores multifilares, que en esta combinación de atmósferas sí pudieron ser ensayados.

Tabla 5.16 Resumen de propiedades mecánicas para los conductores unifilares de cobre en estado de entrega y tratados en atmósferas combinadas de oxidación/reducción

Condición	Ensayo	Límite elástico (MPa)	Resistencia Máx (MPa)	Modulo Elástico (GPa)	Alargamiento (%)
Estado de entrega	1	170.88	243.02	56.60	20.50
	2	174.25	250.01	58.83	24.70
	3	173.58	250.48	40.20	24.61
	promedio	172.90	247.84	51.88	23.27
	desviación	1.78	4.18	10.17	2.40
800°C durante 10 min OXID y 10 min RED	1	43.95	84.85	41.71	4.29
	2	36.17	80.75	15.57	5.15
	3	38.73	81.70	40.15	4.50
	promedio	39.62	82.43	32.48	4.64
	desviación	3.97	2.15	14.66	0.45
800°C durante 60 min OXID y 60 min RED	1	40.53	91.78	43.22	6.17
	2	24.60	77.32	31.04	5.47
	3	26.17	86.55	25.32	5.31
	promedio	30.43	85.22	33.19	5.65
	desviación	8.78	7.32	9.14	0.46
1000°C durante 10 min OXID y 10 min RED	1	67.49	179.96	6.49	48.49
	2	70.55	183.77	6.92	41.13
	3	75.78	182.25	6.63	41.47
	promedio	71.28	181.99	6.68	43.70
	desviación	4.19	1.92	0.22	4.16
1000°C durante 60 min OXID y 60 min RED	1	51.43	135.13	4.93	24.68
	2	47.62	130.55	5.04	23.40
	3	47.52	127.22	5.89	25.52
	promedio	48.85	130.97	5.29	24.53
	desviación	2.23	3.97	0.53	1.07

Las propiedades mecánicas de los alambres tratados térmicamente en atmósferas de oxidación/reducción disminuyen en comparación con sus propiedades en estado de entrega o tratados en vacío. La mayor disminución se evidencia en el límite elástico, sobre todo en las muestras tratadas a 800°C, debido al crecimiento del tamaño de grano, y a la fragilización por hidrógeno/oxígeno en borde de grano, mientras que su resistencia máxima y ductilidad disminuyen en menor proporción que los alambres tratados en vacío. La condición de tratamiento térmico durante 800°C y 20 minutos en los cables unifilares presenta una reducción drástica en el límite elástico, esto es debido no solo al engrosamiento de la microestructura sino al efecto de fragilización en borde grano del cobre observado en microscopía.

Tabla 5.17 Resumen de propiedades mecánicas para los conductores multifilares de cobre en estado de entrega y tratados en atmósferas combinadas de oxidación/reducción

Condición	Ensayo	Límite elástico (MPa)	Resistencia Máx (MPa)	Modulo Elástico (GPa)	Alargamiento (%)
Estado de entrega	1	145.77	199.68	61.33	19.66
	2	152.77	205.77	61.95	22.57
	3	150.52	205.33	64.76	20.86
	promedio	149.69	203.59	62.68	21.03
	desviación	3.57	3.40	1.83	1.46
800°C durante 10 min OXID y 10 min RED	1	65.65	77.10	26.21	5.58
	2	60.75	88.19	24.03	3.50
	3	70.49	101.60	16.71	3.96
	promedio	65.63	88.96	22.31	4.35
	desviación	4.87	12.27	4.98	1.09
800°C durante 60 min OXID y 60 min RED	1	76.71	86.59	16.28	3.00
	2	55.09	56.21	24.96	2.87
	3	90.44	109.75	28.92	2.27
	promedio	74.08	84.18	23.39	2.71
	desviación	17.82	26.85	6.47	0.39
1000°C durante 10 min OXID y 10 min RED	1	35.63	53.67	23.68	6.76
	2	45.31	52.41	11.54	4.72
	3	34.95	47.71	17.07	4.00
	promedio	38.63	51.27	17.43	5.16
	desviación	5.80	3.15	6.08	1.43
1000°C durante 60 min OXID y 60 min RED	1	39.14	56.50	8.29	12.00
	2	44.46	78.15	10.17	9.90
	3	22.91	43.31	10.17	8.45
	promedio	35.50	59.32	9.54	10.12
	desviación	11.22	17.59	1.09	1.78

Un aspecto importante a destacar es que los alambres multifilares tratados a 1000°C presentan una elevada fragilidad, disminuyendo considerablemente las propiedades mecánicas (tabla 5.17), esto se debe a que inicialmente en la etapa de oxidación gran parte del cobre presente en estos alambres debido a su pequeño diámetro (0.26 mm) se convirtió en óxido por la gran superficie externa expuesta a la atmósfera oxidante inicial, luego en la etapa de reducción se redujo el óxido pero quedan las porosidades que disminuyen el área efectiva, además de los defectos presentes en los límites de grano hacia la superficie del conductor, lo cual reduce su resistencia, aunque presentan mayor ductilidad que los cables tratados a 800°C por el efecto de engrosamiento de la microestructura. Los resultados obtenidos permiten comparar las propiedades mecánicas obtenidas con otros tratamientos que simulen las condiciones de un incendio generado por cortocircuitos primarios o secundarios.

5.3. Evaluación de muestras de conductores de cobre obtenidas de cortocircuitos simulados

En este apartado se presentan los resultados del análisis microestructural procedente de las muestras de conductores de cobre sometidos a cortocircuitos realizados al aire, así como con secuencia de atmósferas combinadas (primarios y secundarios), también se incluye el resultado de muestras en los que además del cortocircuito se ha inducido un sobrecalentamiento por sobreintensidad al mantener cortocircuitado el conductor. En ellos se ha realizado un análisis microestructural mediante microscopía óptica, así como por microscopía electrónica de barrido con emisión de campo.

5.3.1. Cortocircuitos al aire

La microestructura obtenida en la zona de contacto de un cortocircuito al aire puede observarse en las fotomicrografías de las figuras 5.30 y 5.31 para cables unifilares y multifilares respectivamente evaluados mediante microscopía óptica.

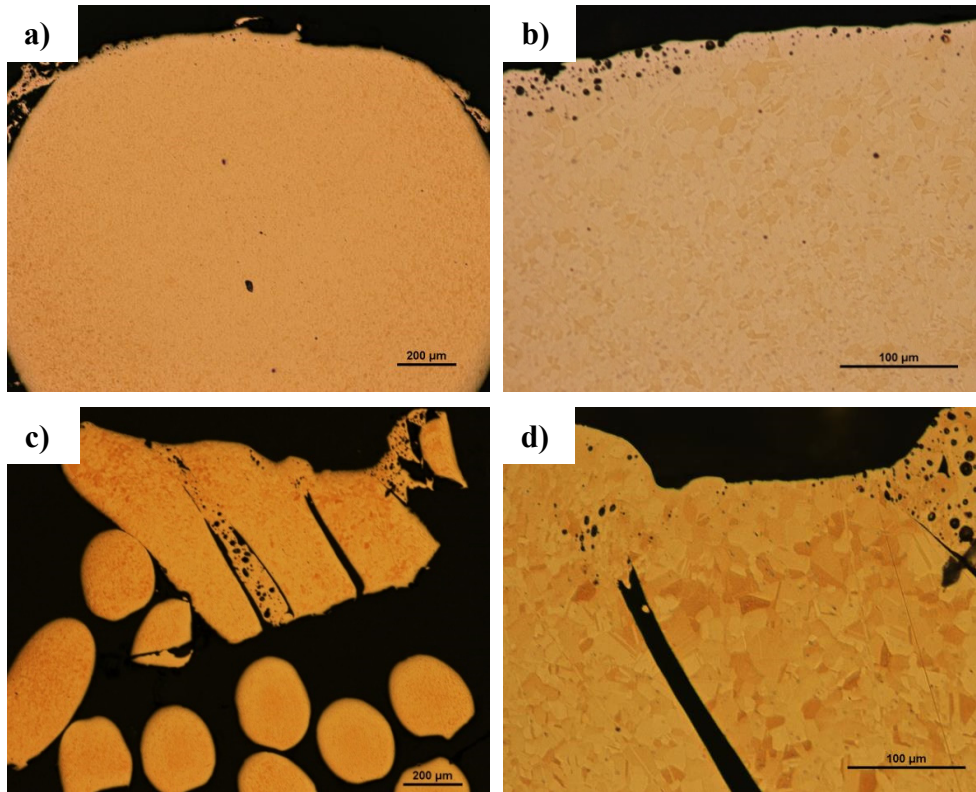


Figura 5.30 Fotomicrografía de los conductores cortocircuitados al aire, sección transversal
a) cableado unifilar (50X) b) detalle de zona de cortocircuito, unifilar (200X)
c) cableado multifilar (50X) y d) detalle zona de cortocircuito, multifilar (200X)

En las micrografías obtenidas se observa claramente la zona de material afectada térmicamente por el cortocircuito, se observa hacia la superficie de los conductores la zona de material fundido. En todos los casos analizados se observa la presencia de poros redondeados, formados quizás por gases atrapados durante la rápida solidificación del cobre fundido debido al calor generado en la zona de contacto de cables durante el cortocircuito, este tipo de poros ha sido reportado ampliamente en publicaciones de diversos autores relacionados con daños en conductores debido a cortocircuitos primarios (Wu y Han 2012, Mo *et al* 2013, Zhang *et al* 2011, Clarke 2006). Es posible identificar la variación de tamaño de grano del cobre hacia la zona del cortocircuito, debido al incremento de temperatura en la zona. En algunos casos se observa además el crecimiento columnar de grano en dirección al gradiente térmico de enfriamiento, figura 5.30b.

En las muestras de cable multifilar, figura 5.31, se observa también en ciertas zonas próximas a la superficie del conductor cortocircuitado la microestructura dendrítica propia de una solidificación rápida debido al gradiente térmico, en la cual se tiene el eutéctico Cu-O en la zona interdendrítica (color gris claro en figuras 5.31c y 5.31d), lo que indica que el conductor multifilar estuvo expuesto a una alta temperatura (superior a 1050°C) durante el arco eléctrico provocado por el cortocircuito, así como al oxígeno atmosférico. En los conductores unifilares no ha sido posible observar esta microestructura dendrítica, quizás debido a falta de ataque químico para revelarla o a que simplemente por la cantidad de material el gradiente térmico y la velocidad de solidificación del cobre fundido han sido menores. Este tipo de microestructura dendrítica también ha sido reportada por diferentes autores en marcas de cobre fundido en conductores eléctricos (Wu y Han 2012, Mo *et al* 2013, Clarke 2006, Gao *et al* 2011).

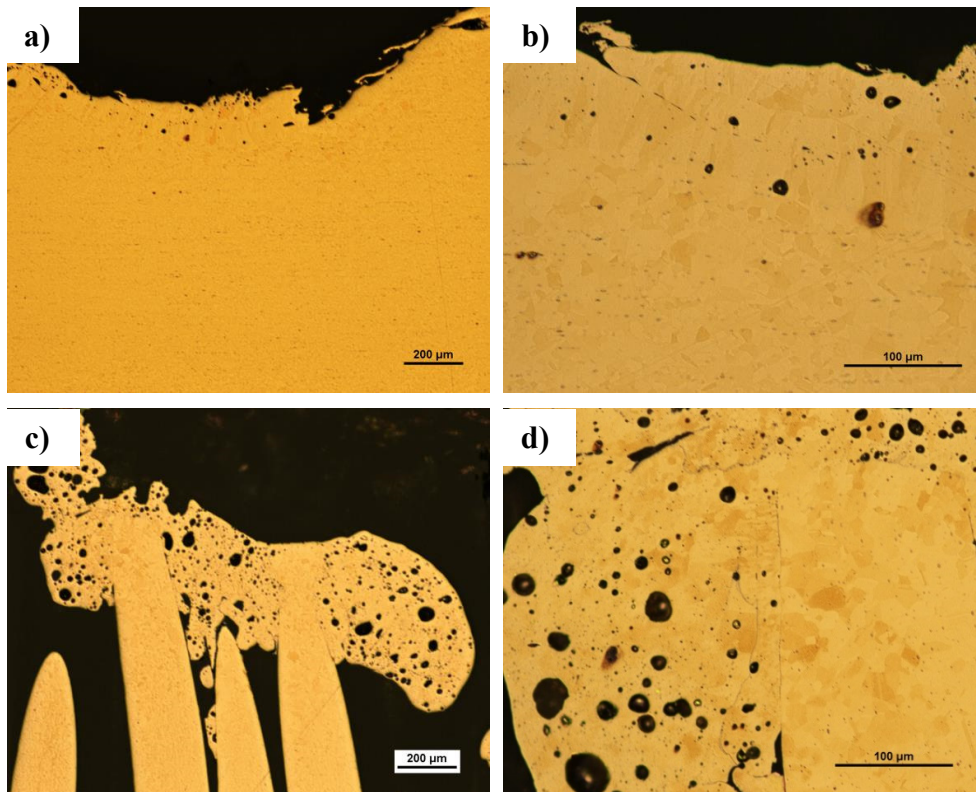


Figura 5.31 Fotomicrografía de los conductores proveniente de cortocircuitos al aire, sección longitudinal **a)** unifilar (50X) **b)** detalle de zona de cortocircuito, unifilar (200X) **c)** multifilar (50X) y **d)** detalle zona de cortocircuito, multifilar (200X)

5.3.2. Cortocircuitos primarios

Como se comentó y detalló en la tabla 3.4 de la sección 3.3 del capítulo 3 se ha realizado la simulación de un cortocircuito primario realizando la siguiente secuencia: cortocircuito-calentamiento-atmósfera reductora-atmósfera oxidante-enfriamiento. Tras preparar las muestras de conductores unifilares y multifilares, se han observado en un microscopio óptico y en un microscopio electrónico de barrido para evaluar la microestructura en la zona adyacente al cortocircuito. En la figura 5.32 se observa la microfotografía en la sección transversal de los conductores, en la figura 5.33 la sección longitudinal.

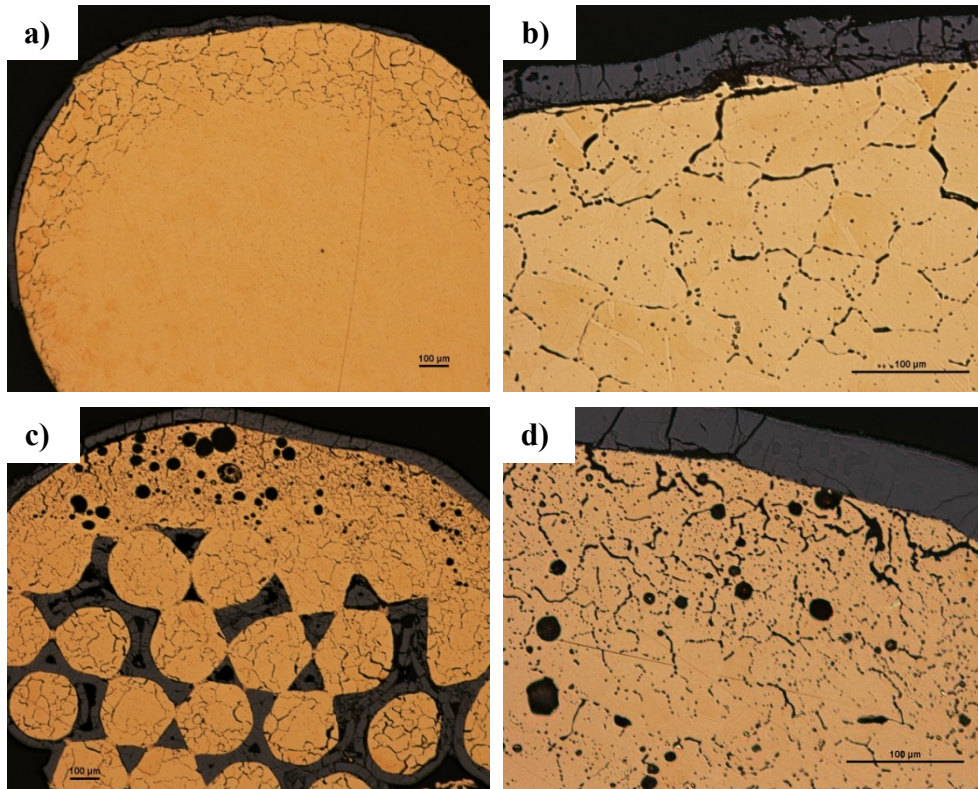


Figura 5.32 Fotomicrografía de los conductores proveniente de cortocircuito primario simulado, sección transversal **a)** unifilar (50X) **b)** detalle de zona de cortocircuito, unifilar (200X) **c)** multifilar (50X) y **d)** detalle zona de cortocircuito, multifilar (200X)

En las microfotografías obtenidas se observa claramente la capa de óxido superficial formada en la etapa final de tratamiento en atmósfera oxidante, aun así se evidencia en detalle la zona donde se vio afectado térmicamente el material por el cortocircuito inducido (material fundido hacia la superficie), aunado a que la temperatura de tratamiento térmico empleada (800°C) ha permitido la recrystalización y engrosamiento de la microestructura, tanto en la sección transversal como en la sección longitudinal de las muestras en todos los conductores. Son apreciables los efectos de difusión de hidrógeno principalmente en la zona de ocurrencia del cortocircuito, quizás al alcanzarse mayores temperaturas, y fusión del material se potencia este efecto. Del mismo modo se ve potenciada la segregación en borde de grano. En el caso de cableado unifilar no se observa abundante porosidad y fusión, la misma formó una capa muy fina y fue completamente oxidada en la segunda fase de tratamiento, figuras 5.32 y 5.33.

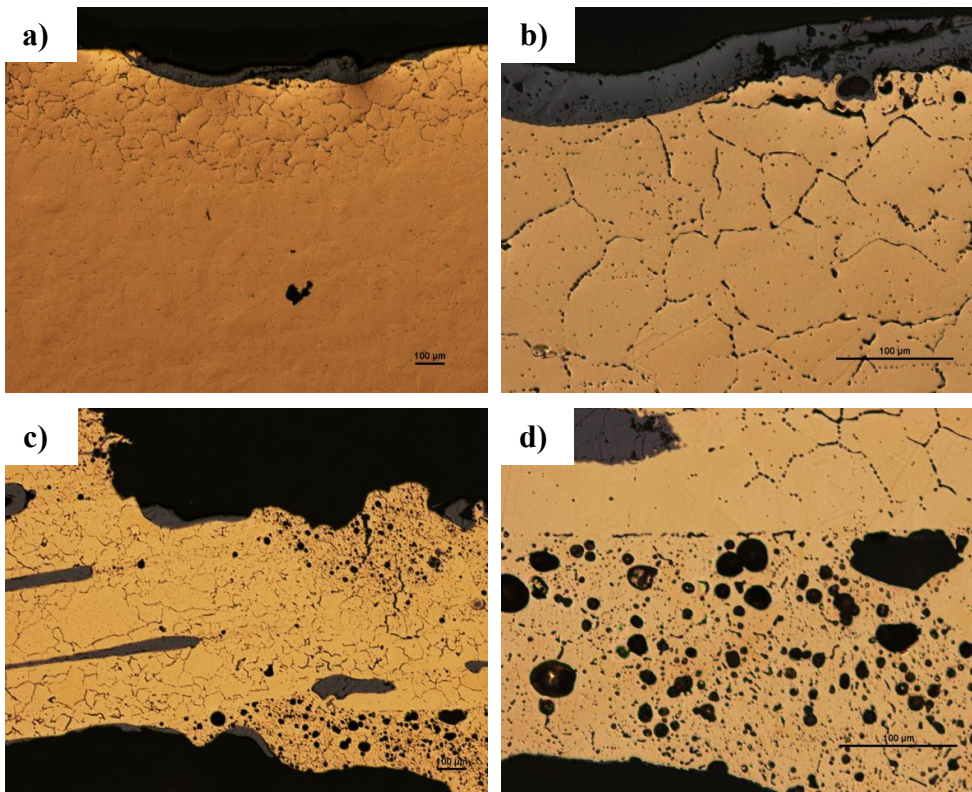


Figura 5.33 Fotomicrografía de los conductores proveniente de cortocircuito primario simulado, sección longitudinal **a)** unifilar (50X) **b)** detalle de zona de cortocircuito, unifilar (200X) **c)** multifilar (50X) y **d)** detalle zona de cortocircuito, multifilar (200X)

Sobre el cableado multifilar los efectos del cortocircuito son más llamativos. Sobre los hilos se observa la formación de cuellos de sinterización y posterior oxidación similar a lo observado en el tratamiento térmico de (reducción/oxidación, apartado 5.2.3). También son apreciables los efectos de fragilización por segregación en borde de grano, y cómo esta es particularmente intensa hacia la superficie debido al escaso tiempo de difusión, si bien lo más llamativo es la abundante porosidad observada y la gran cantidad de inclusiones o dislocaciones intergranulares a consecuencia de la absorción de hidrógeno de atmósfera reductora y su posterior oxidación, figura 5.33.

En ninguno de los casos, cableado unifilar o multifilar, es apreciable la existencia de eutéctico Cu-O en el interior del volumen afectado por fusión.

La capa de óxido en la superficie de las muestras es estable por lo que puede medirse su espesor.

Al analizar la microestructura de los cables unifilar y multifilar cortocircuitados mediante microscopía electrónica de barrido es posible estudiar la composición de la muestra en diferentes puntos, figuras 5.34 y 5.35, estas muestras no han sido atacadas químicamente para su observación.

Respecto al cable unifilar, en la figura 5.34a se muestra la sección transversal en la zona próxima al cortocircuito primario simulado en el cable unifilar; a unas 200 micras de la superficie del conductor los microanálisis por EDS realizados indican que el conductor de cobre posee una pequeña proporción de oxígeno en peso, 0.30% y 0.13%, figura 5.34b, nada fuera de lo normal. La figura 5.34c muestra la sección longitudinal, en la que se identifica una zona más próxima a la superficie, del orden de 15 y 5 micras, con un contenido de oxígeno ligeramente superior, 0.30% y 0.38%, y sobre la capa de óxido presente en la superficie, con un 10.64% de oxígeno en peso.

En lo referente al cable multifilar, figura 5.35, se muestran secciones transversales y longitudinal, en las que es apreciable la segregación en borde de grano, los microanálisis por EDS realizados indican que el conductor de cobre posee una pequeña proporción de oxígeno en peso, 0.27%, y 0.69% en zonas próximas a las segregaciones, figura 5.35d.

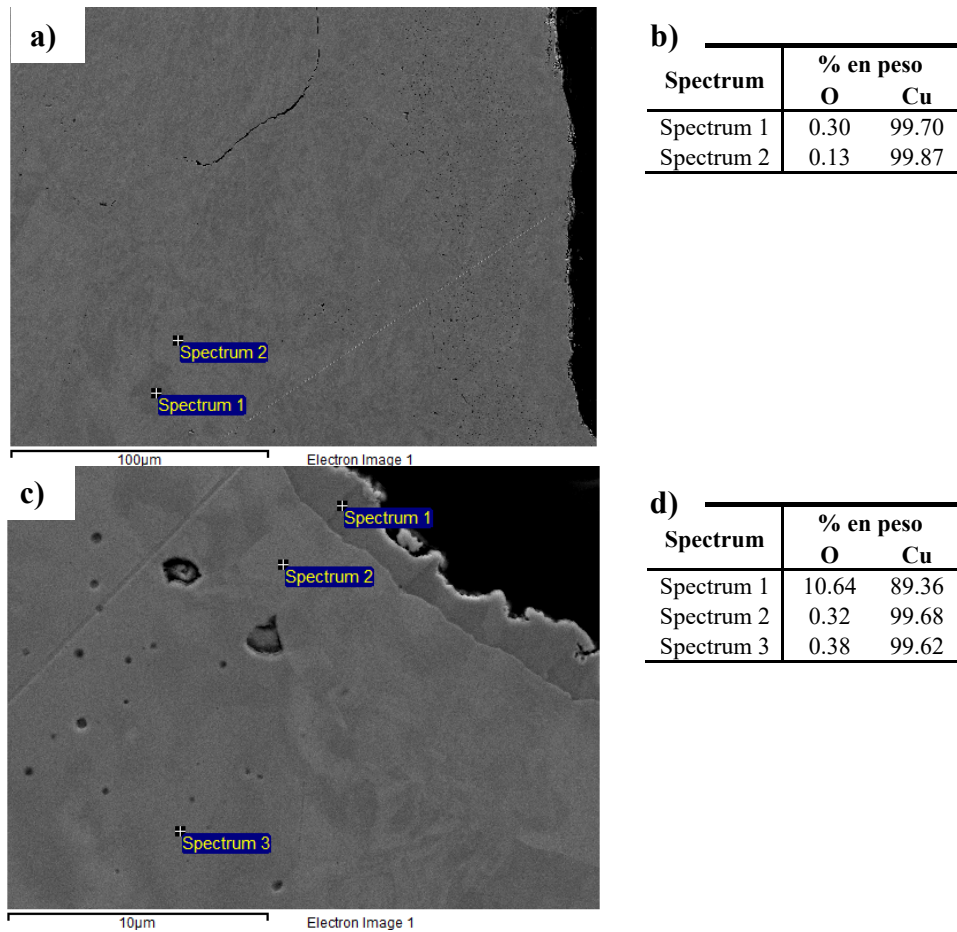


Figura 5.34 Fotomicrografías FESEM de los conductores proveniente de cortocircuito primario simulado **a)** cable unifilar (500X) en sección transversal **b)** Espectros EDS de zonas identificadas en 5.33a **c)** cable unifilar (500X) en sección longitudinal y **d)** Espectros EDS de zonas identificadas en 5.33c

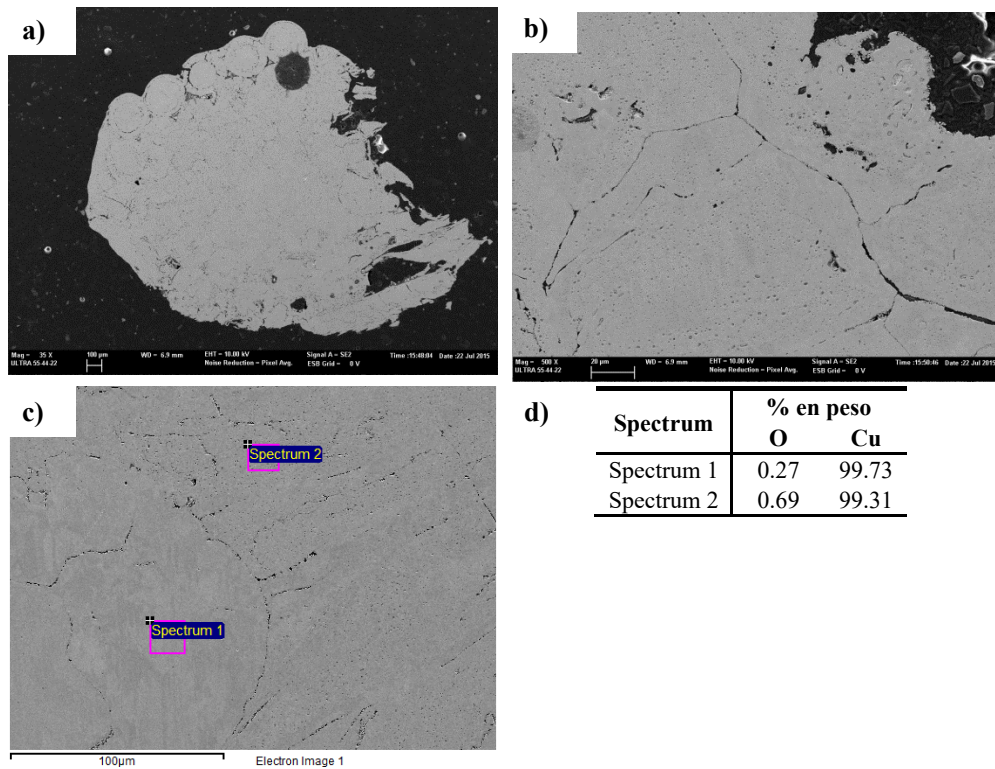


Figura 5.35 Fotomicrografías FESEM de los conductores proveniente de cortocircuito primario simulado **a)** cable multifilar (35X) en sección transversal **b)** detalle cable multifilar (500X) en sección transversal **c)** cable multifilar (500X) en sección longitudinal y **d)** Espectros EDS de zonas identificadas en 5.34c

Finalmente, con la misma secuencia que simula un cortocircuito primario, se somete a cortocircuito sostenido durante 8 segundos al cableado unifilar, produciendo una situación de sobrecalentamiento. En esta secuencia simulada de cortocircuito primario se observa similar efecto al producido por cortocircuito durante 2 segundos, si bien existe un sobrecalentamiento que ha provocado en las zonas adyacentes a la zona fundida ligeros cambios microestructurales, tal como se observa en la figura 5.36. El volumen afectado por la segregación intergranular, existiendo un crecimiento de tamaño de grano mayor. Es observable porosidad, si bien no aparece formación de eutéctico Cu-O, y se vuelve a comprobar que la superficie fundida aparece de nuevo afectada por la oxidación.

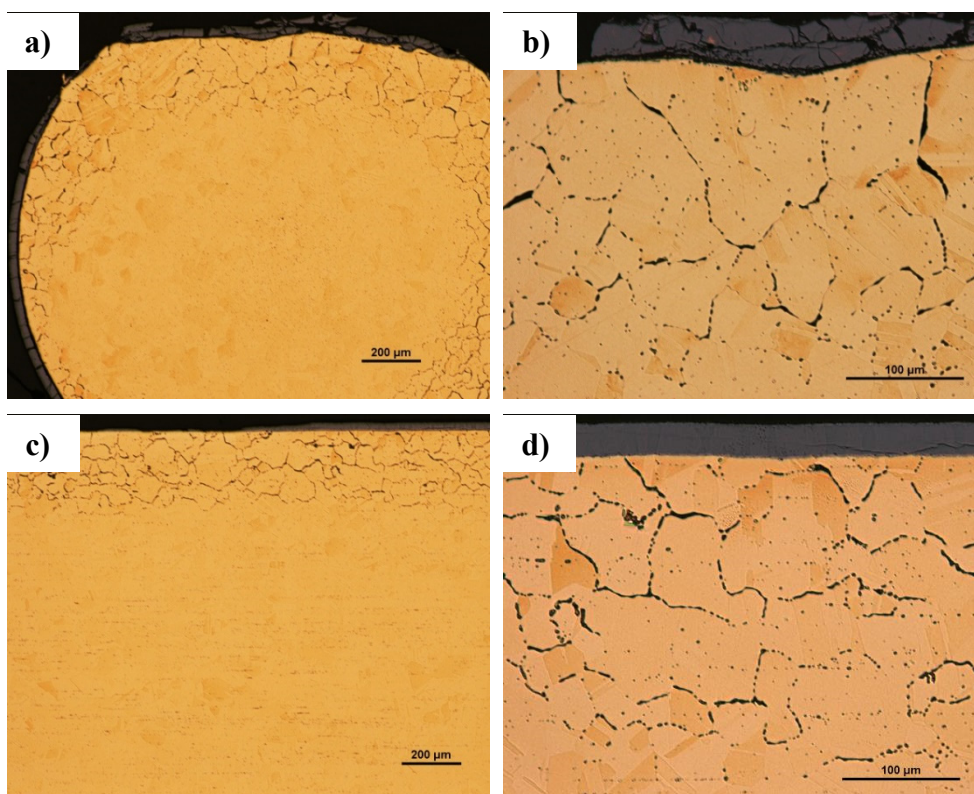


Figura 5.36 Fotomicrografía de los conductores proveniente de cortocircuito primario simulado con sobrecalentamiento **a)** cable unifilar en sección transversal (50X) **b)** detalle cable unifilar en sección transversal (200X) **c)** cable unifilar en sección longitudinal (50X) y **d)** detalle cable unifilar en sección longitudinal (200X)

5.3.3. Cortocircuitos secundarios

La secuencia de simulación de un cortocircuito secundario ha sido la siguiente: calentamiento-atmósfera oxidante-cortocircuito-atmósfera reductora-enfriamiento. Tras preparar las muestras de conductores unifilares y multifilares se han observado en un microscopio óptico y en un microscopio electrónico de barrido para evaluar la microestructura en la zona adyacente a la zona de cortocircuito. En la figura 5.37 se observa la micrografía en la sección transversal de los conductores ensayados.

En las micrografías obtenidas, tanto para el cableado unifilar como para el multifilar, se observa claramente en la superficie de los cables la capa reducida en la etapa final de tratamiento en atmósfera reductora. Se observa también claramente la zona de material fundido en la superficie de los conductores en la zona de cortocircuito, presentando en ambos casos porosidades. En el caso de los conductores multifilares se alcanzó una

mayor cantidad de material fundido, al igual que en el cortocircuito primario, figura 5.37b. Respecto al tamaño de grano se observa que su crecimiento no ha sido tan grande como en el caso anterior, figura 5.37a, lo mismo que el efecto de segregación en borde de grano que en el caso del cableado unifilar afecta a un volumen menor respecto al cortocircuito primario. El cableado multifilar presenta una degradación muy intensa, por lo que no es posible comprobar si ha existido sinterización entre hilos de forma previa a la reducción final.

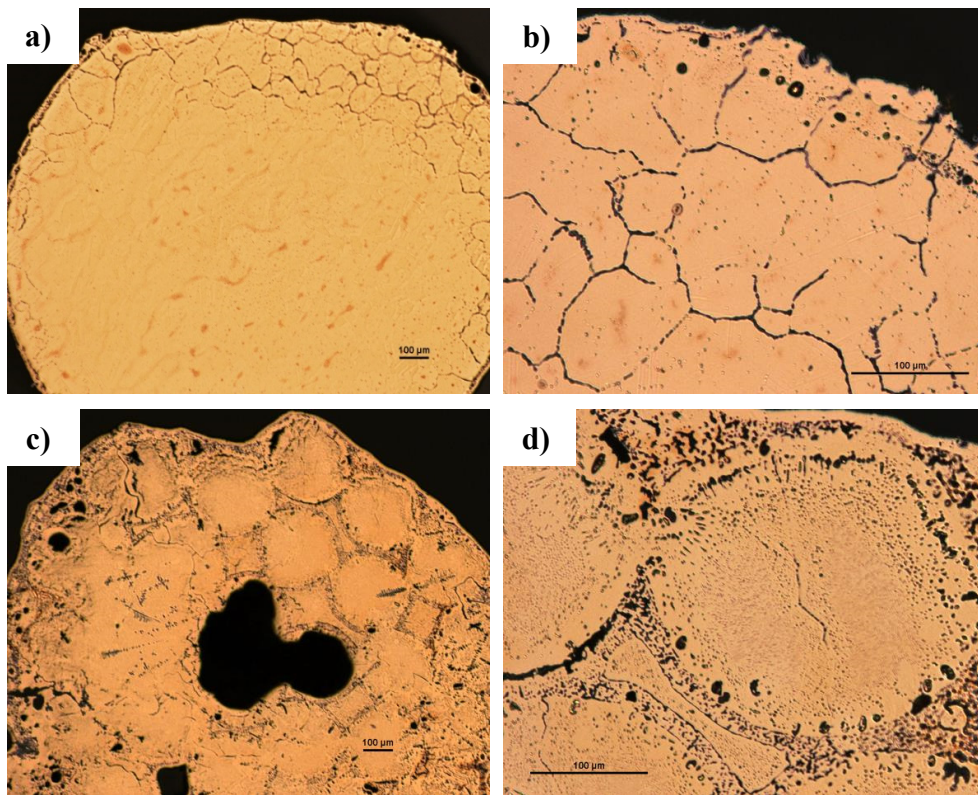


Figura 5.37 Fotomicrografía de los conductores proveniente de cortocircuito secundario simulado, sección transversal **a)** unifilar (50X) **b)** detalle de zona de cortocircuito, unifilar (200X) **c)** multifilar (50X) y **d)** detalle zona de cortocircuito, multifilar (200X)

En cambio, dentro de esta intensa afectación en el cableado multifilar, sí es observable, pese a la reducción en la fase final, la presencia de dendritas incipientes o primarias de eutéctico Cu-O, color gris en figuras 5.37d y 5.38d, cuya temperatura de fusión es de 1065°C. Esta formación de eutéctico implica la presencia de cierta cantidad de óxido de cobre, presumiblemente procedente de la primera fase de oxidación superficial, y que

se ha visto fundido junto con el cobre en el proceso de cortocircuito, dadas las elevadas temperaturas que este desarrolla. La formación estas dendritas de eutéctico se produce a temperaturas de alrededor de 1083°C, dependiendo de la presión parcial y cantidad de oxígeno (Schramm *et al* 2005), la cual es superior a la temperatura de tratamiento. Tras el cortocircuito un enfriamiento relativamente lento ha formado las dendritas con esta morfología.

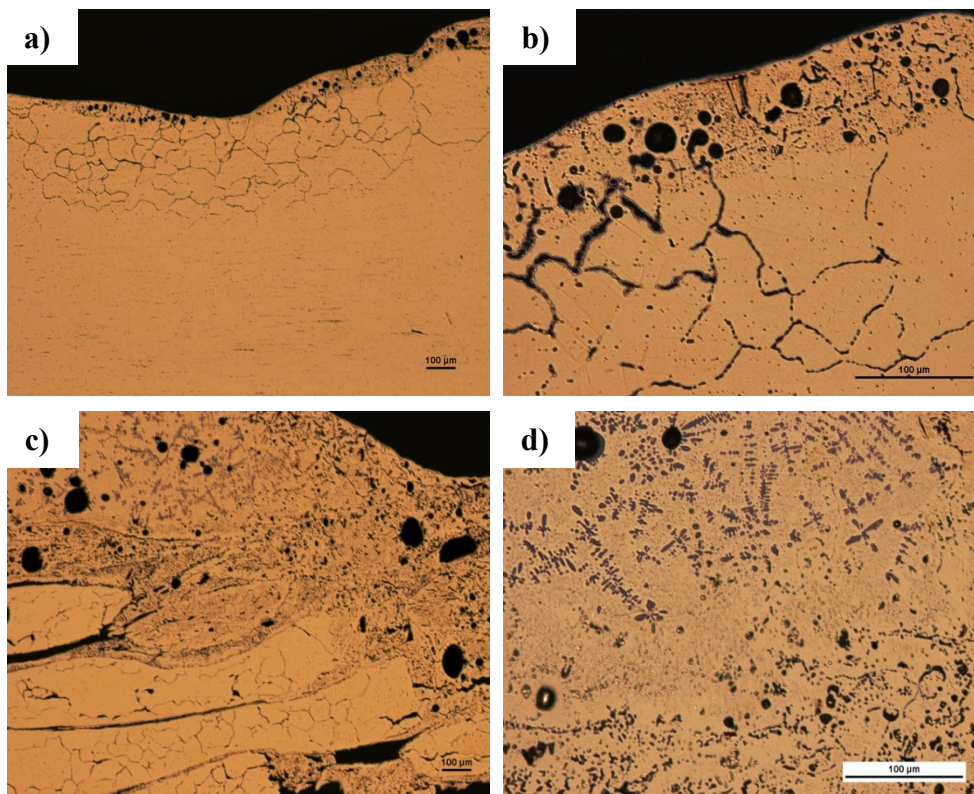


Figura 5.38 Fotomicrografía de los conductores proveniente de cortocircuito secundario simulado, sección longitudinal **a)** unifilar (50X) **b)** detalle de zona de cortocircuito, unifilar (200X) **c)** multifilar (50X) y **d)** detalle zona de cortocircuito, multifilar (200X)

En el cableado unifilar, si bien no se observa la formación de eutéctico, sí existen inclusiones de óxido propias de la primera fase oxidante, que no han llegado a reducirse en la última fase de reducción. La microestructura mediante microscopía electrónica de barrido muestra mayor detalle de las segregaciones en borde de grano. En la figura 5.39a se muestra la sección transversal en la zona próxima al cortocircuito secundario simulado en un cable unifilar donde las cavidades de las segregaciones son observadas,

esta muestra no ha sido atacada químicamente para su observación. Los microanálisis por EDS realizados indican que el conductor es de cobre y hacia la superficie de la muestra en la sección transversal es posible observar hacia la superficie la capa de óxido reducida con alto contenido en oxígeno (figuras 5.39c y 5.39d). También se detecta en el borde de grano algún contenido en oxígeno en la segregación.

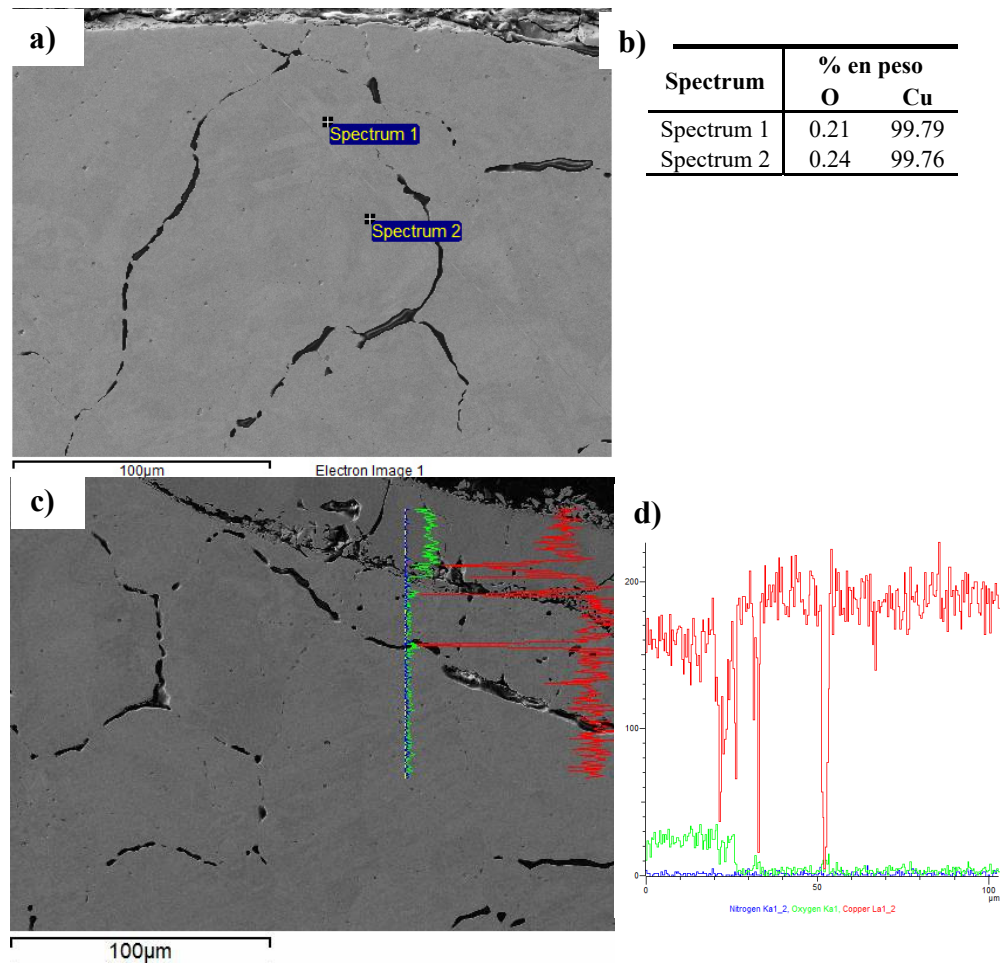


Figura 5.39 Fotomicrografías FESEM de los conductores proveniente de cortocircuito secundario simulado, sin ataque **a)** cable unifilar (500X) en sección transversal **b)** Espectros EDS de zonas identificadas en 5.39a **c)** cable unifilar (500X) en sección longitudinal y **d)** perfil de composición química del barrido lineal con EDS mostrado en 5.39c

En las muestras de cable multifilar es evidente la degradación que se genera en los conductores, oxidándose y luego reduciéndose en su superficie, figura 5.40a. Cabe destacar que la cascarilla de óxido, aunque se ha reducido en la última atmósfera, mantiene un contenido de oxígeno alto, de alrededor del 10.6% (Spectrum 1 de la figura 5.40b), con la formación del eutéctico Cu-O.

En la sección longitudinal del conductor multifilar se observa una mayor fusión de material en la zona de cortocircuito (figura 5.40c) y en la próxima del borde de grano se incrementa el contenido en oxígeno (figura 5.40d).

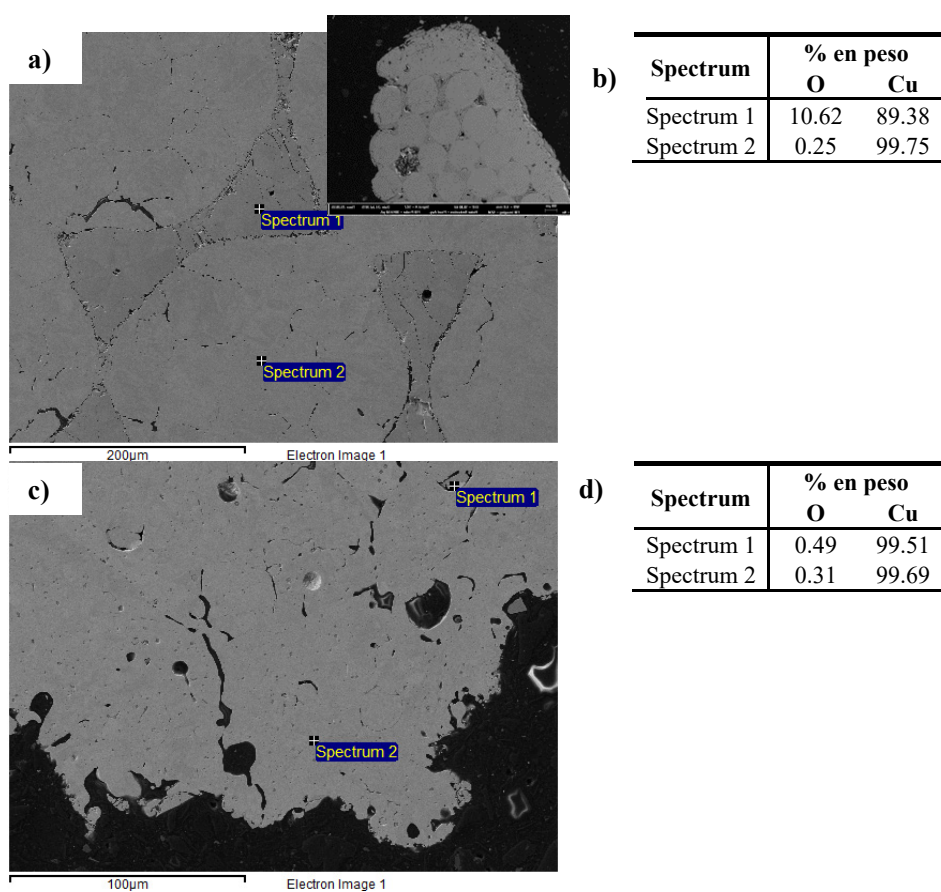


Figura 5.40 Fotomicrografías FESEM de los conductores proveniente de cortocircuito secundario simulado **a)** cable multifilar (250X) en sección transversal **b)** Espectros EDS de zonas identificadas en 5.40a **c)** cable multifilar (500X) en sección longitudinal y **d)** Espectros EDS de zonas identificadas en 5.40c

Finalmente, con la misma secuencia que simula un cortocircuito secundario, se somete a cortocircuito sostenido durante 8 segundos al cableado unifilar, produciendo una situación de sobreintensidad. Las microfografías preparadas de esta muestra presentan una microestructura dendrítica globular, figura 5.41.

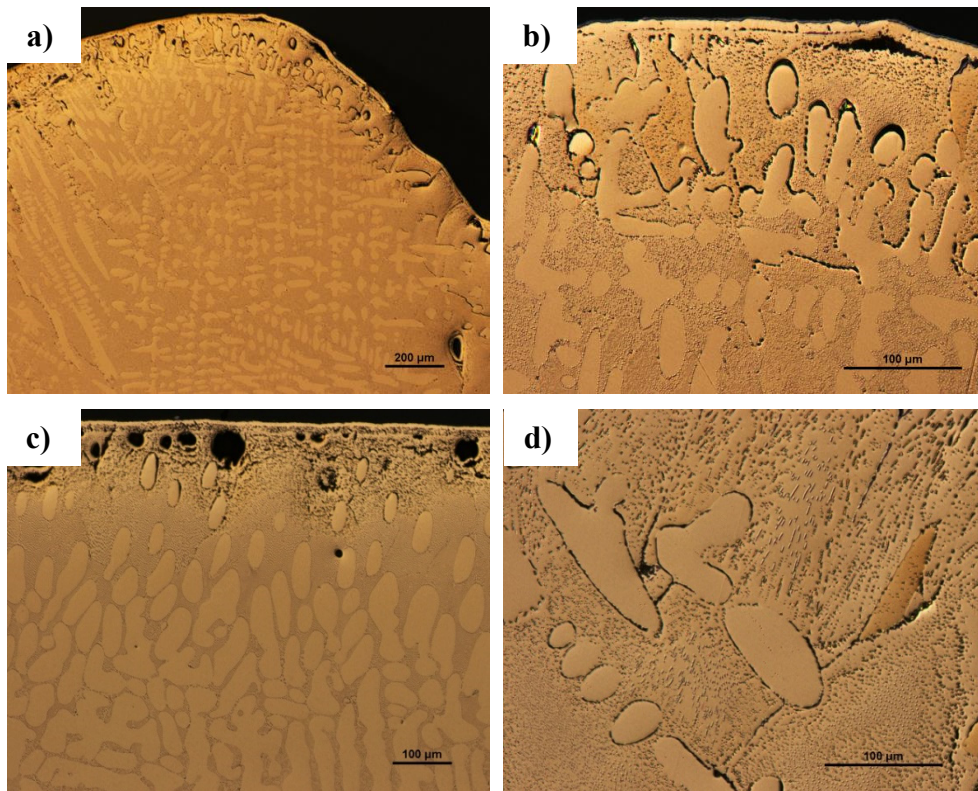


Figura 5.41 Fotomicrografía de los conductores proveniente de cortocircuito secundario simulado con sobre-calentamiento por tensión **a)** cable unifilar en sección transversal (50X) **b)** detalle cable unifilar en sección transversal (200X) **c)** cable unifilar en sección longitudinal (100X) y **d)** detalle cable unifilar en sección longitudinal (200X)

En las microfografías obtenidas se observa hacia la superficie de los hilos la capa de óxido reducida en la etapa final de tratamiento en atmósfera reductora, es relativamente estable, con porosidades entre la antigua capa de óxido y el cobre no oxidado.

Bajo la superficie reducida, la zona fundida del cortocircuito presenta porosidades redondeadas y abundantes hacia la superficie, con formaciones alargadas en dirección a la superficie del conductor.

En el interior se observa un crecimiento dendrítico, incluso en la zona del hilo conductor adyacente a la perla fundida, figura 5.41c, lo que indica que el sobrecalentamiento se dio en toda la extensión del hilo conductor y que luego de enfriamiento relativamente lento han generado dendritas con esta morfología. Tanto el cortocircuito, como la situación de sobreintensidad, produjeron el sobrecalentamiento del hilo conductor generando una elevada temperatura, cercana a la temperatura de fusión del cobre, que junto a la inclusión de oxígeno procedente de la fase inicial del procesado de la muestra favorecieron la formación del eutéctico Cu-O.

El evento de cortocircuito secundario y sobrecalentamiento no permite observar la formación de granos debido a la rápida solidificación dendrítica alcanzada, ni segregaciones en borde de grano.

5.4. Evaluación de muestras de cables de cobre tomadas de incendios reales

En este apartado se presentan los resultados de los análisis procedentes de casos de incendios reales en los que la investigación del incendio resultó satisfactoria en cuanto a la determinación exacta de la causa. Además de ello se ha realizado una selección pertinente que se ajusta en gran medida a la tipología de cableado empleada en la experimentación realizada, siendo también una variable de selección de estos casos que se trate de incendios comunes en cuanto a la dinámica del incendio se refiere, es decir sin presencia de acelerantes de la combustión, efectos multiplicadores por la existencia de combustible próximo o efecto horno. Se han seleccionado los casos de modo que se obtenga representatividad completa en cuanto a los efectos causados por la temperatura, atmósferas, llamas y cortocircuitos primarios o secundarios.

Los resultados analíticos se intentarán relacionar con los resultados obtenidos principalmente por medio de las transformaciones microestructurales sufridas.

En todos los casos, las muestras fueron procesadas de idéntica forma al desarrollo experimental expuesto en esta tesis, si bien en alguno de los casos de incendios reales las muestras fueron tratadas o reveladas con ataque químico de dicromato potásico con el objeto de obtener mayor detalle.

5.4.1. Microestructura del cableado del CASO 1

En este caso se obtuvo cableado unifilar afectado térmicamente de forma poco intensa, principalmente a consecuencia del alcance térmico, sin observarse evidencias físicas de avería o fallo eléctrico. Se analizaron dos muestras de cableado denominadas Muestra 1 y Muestra 2 compuestas por varios cables unifilares cada una de ellas, que corresponden a fases, neutro y tierra, véase figura 5.42. La Muestra 1, figura 5.42a, presenta un importante deterioro en su superficie, de ella se realizaron dos preparaciones metalográficas, corte longitudinal y transversal. La Muestra 2, figura 5.42b, presenta un mayor deterioro en toda su extensión, de ella se preparó un corte transversal.

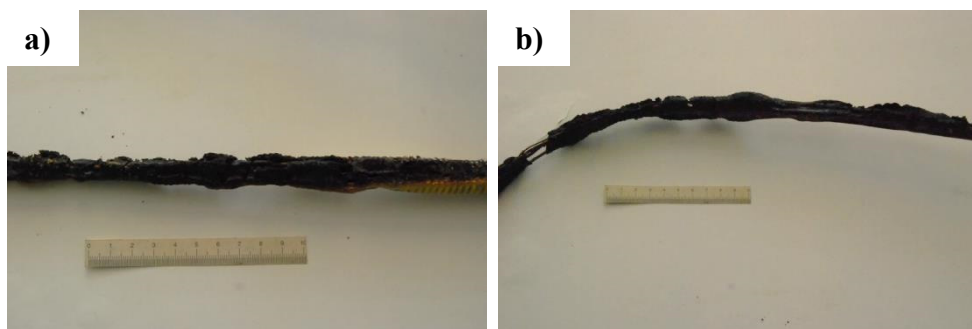


Figura 5.42 Detalles de las muestras sometidas a análisis a) Muestra 1 y b) Muestra 2

El corte longitudinal realizado en la Muestra 1, ver figura 5.43, revela una deformación importante en el centro de los hilos, correspondiente al proceso de trefilado de la fabricación de los mismos. El efecto térmico sufrido por los cables ha sido poco relevante.

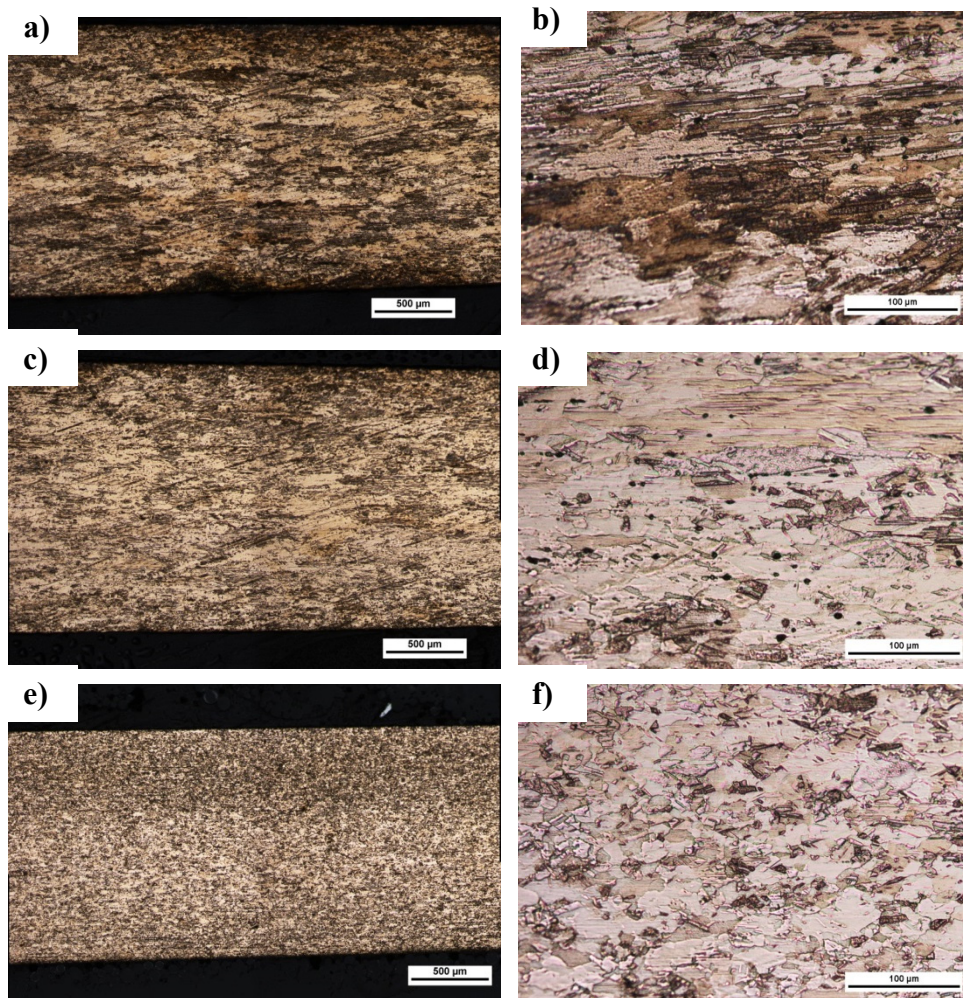


Figura 5.43 Microestructura del corte longitudinal de la Muestra 1 **a)** hilo 1, microestructura maclada y deformada por el trefilado (50X) **b)** detalle del centro del hilo 1 (200X) **c)** hilo 2 (50X) **d)** detalle del centro del hilo 2 (200X) **e)** hilo 3 (50X) **f)** detalle del centro del hilo 3 (200X)

El cableado presenta en todos sus conductores un ligero engrosamiento de grano en su zona central, véanse las figuras correspondientes a mayores aumentos, figuras 5.43b,

5.43d y 5.43f. Este leve engrosamiento fue causado por el calentamiento del cableado debido al paso diario de corriente eléctrica en su tiempo de servicio. Se trata de cableado compuesto por conductores activos de la misma sección con un neutro o tierra de menor sección no activo, que por tanto no ha sufrido el paso de corriente en su servicio. Este conductor neutro, al no tener actividad, presenta menor efecto de engrosamiento de grano, figura 5.43f. Su aspecto y tamaño de grano es similar al observado en el apartado 5.1.3, donde se analizó la microestructura de los conductores en estado de entrega. El mismo efecto se aprecia en el corte transversal realizado en la zona de mayor deterioro de la Muestra 1, figura 5.44; en el que se observa un engrosamiento mayor del grano en los hilos 1 y 2, figuras 5.44a y 5.44b.

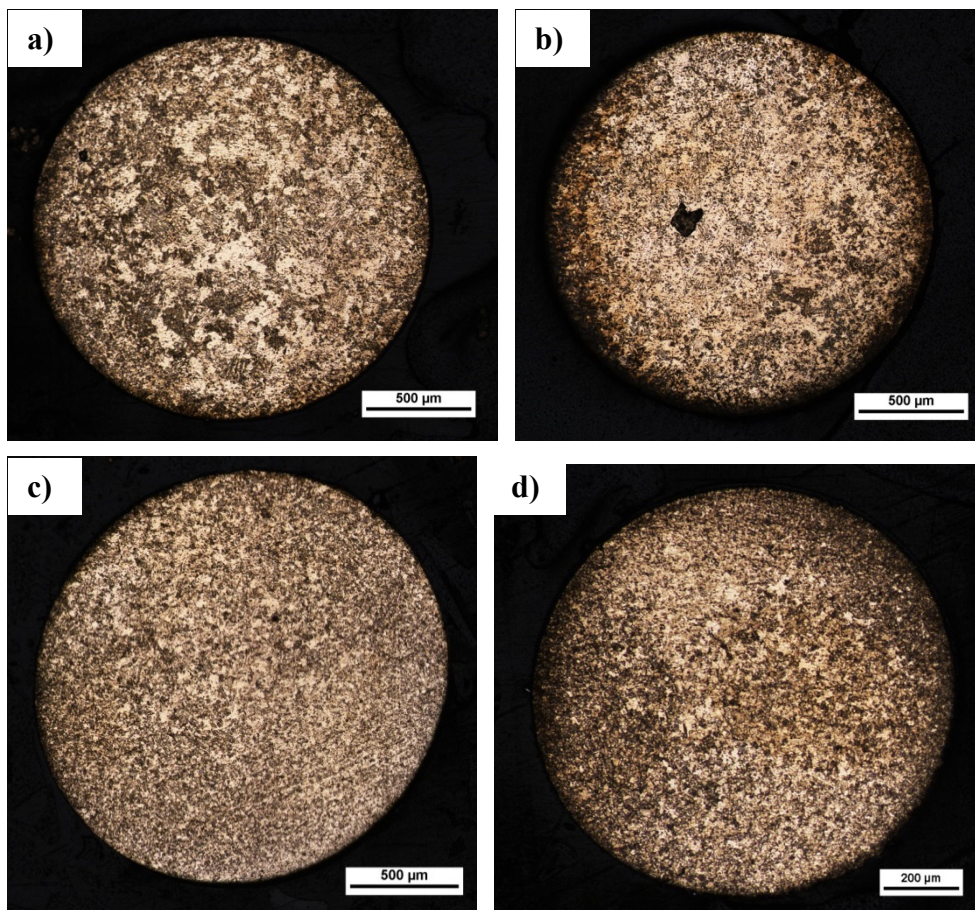


Figura 5.44 Microestructura del corte transversal de la Muestra 1 **a)** hilo 1, fase activa (50X) **b)** hilo 2, fase activa (50X) **c)** hilo 3, fase poco activa (50X) **d)** hilo 4, neutro no activo (50X)

El cable con menor actividad presenta un tamaño de grano menor y más uniforme, figura 5.44c. Por su parte el hilo de tierra o neutro, figura 5.44d, presenta todavía un menor tamaño de grano, aunque la imagen pueda llevarnos a engaño por la diferente escala a la que están representadas.

Semejante resultado se ha obtenido en el corte realizado de la Muestra 2, véase figura 5.45.

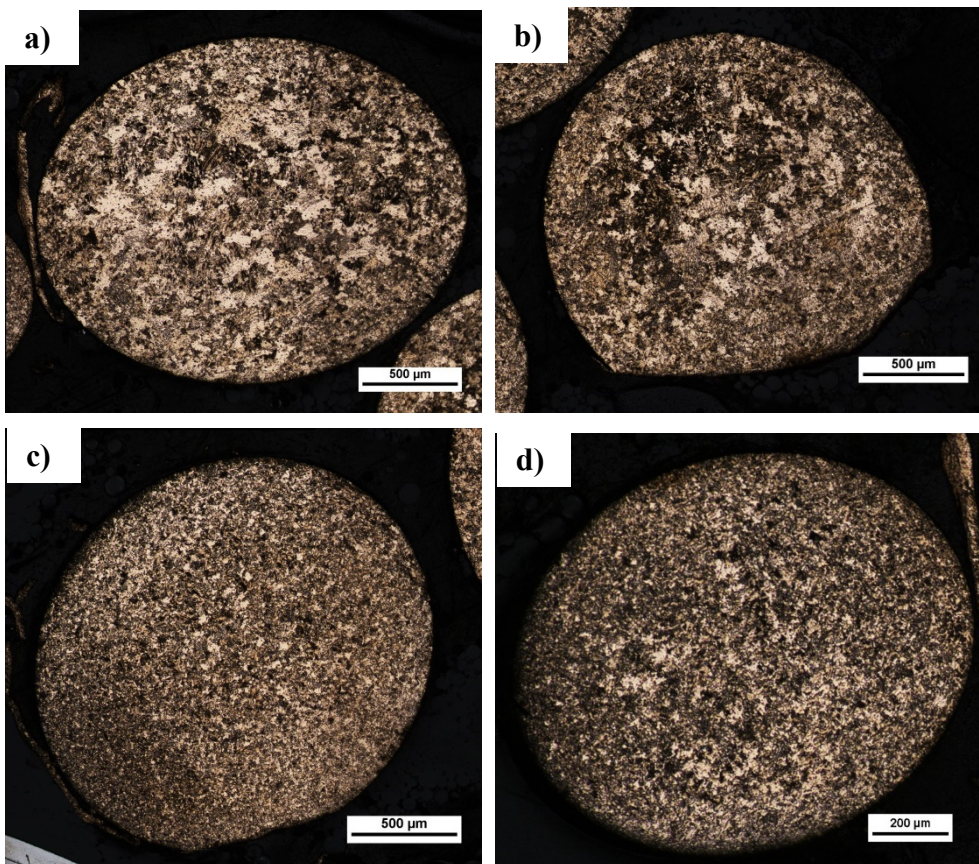


Figura 5.45 Microestructura del corte transversal de la Muestra 2 **a)** hilo 1, fase activa (50X) **b)** hilo 2, fase activa (50X) **c)** hilo 3, fase poco activa (50X) **d)** hilo 4, neutro no activo (50X)

5.4.2. Microestructura del cableado del CASO 2

En este caso se obtuvo cableado multifilar afectado por el calor y las llamas, calcinándose por completo su funda plástica aislante, sin observarse evidencias físicas de avería o fallo eléctrico. Sobre la muestra se aprecia un gran deterioro superficial, figuras 5.46 y 5.47. En ella se realizaron tres cortes transversales denominados corte 1, corte 2 y corte 3.

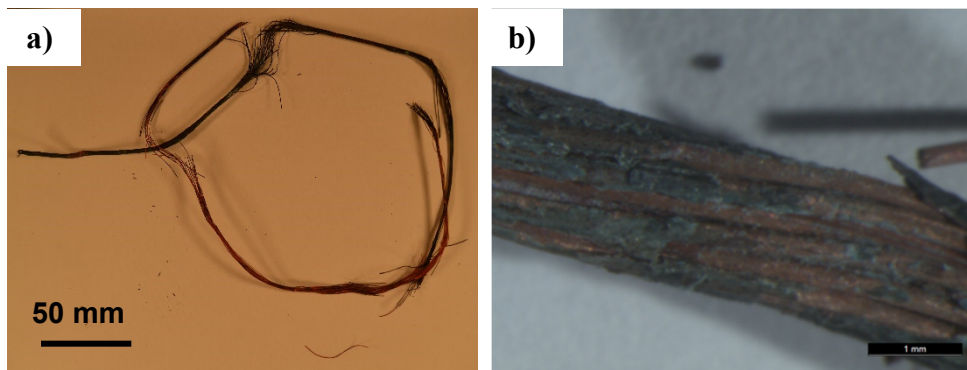


Figura 5.46 Restos de cableado eléctrico sometidos a análisis **a)** tramo completo del conductor **b)** detalle del deterioro superficial con oxidación y reducción parcial

Las macrografías realizadas presentan el aspecto superficial del cable de cobre en el que en algunas zonas se aprecia la corrosión superficial importante con reducción muy parcial de esta oxidación, véase figura 5.46b; en otras se presenta un aspecto negrozco completamente oxidado, véase figura 5.47.

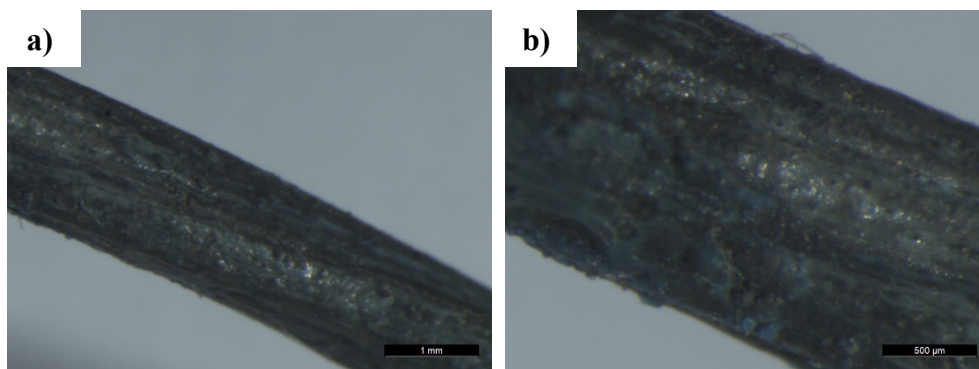


Figura 5.47 Detalle de la superficie del conductor sometido a análisis **a)** en el que se presenta una gran oxidación superficial **b)** detalle del deterioro superficial

En las micrografías de los cortes transversales se observa la total ausencia de masa fundida, sinterización o unión entre hilos, figura 5.48. Los conductores, presentan una importante oxidación superficial, con espesores de hasta 100 micras, figura 5.48b, con hilos de cobre de menos de 200 micras. Los mismos poseen un fuerte engrosamiento de grano resultante del recocido del material al verse sometido a temperaturas elevadas.

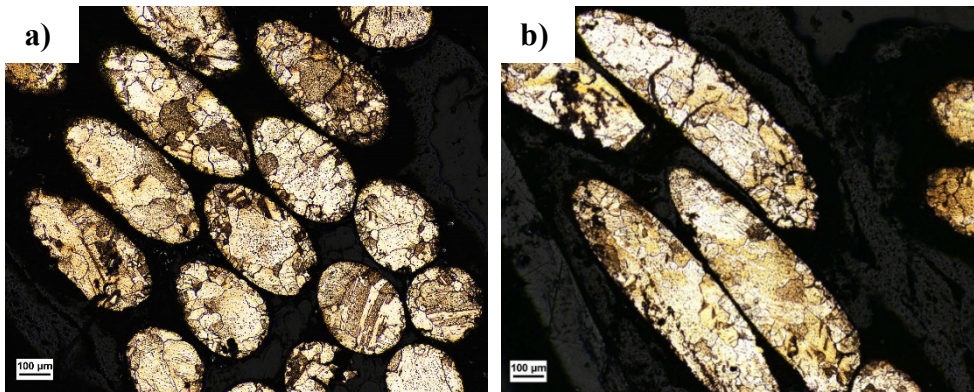


Figura 5.48 Microestructura metalográfica de los hilos (X50) a) corte 1 b) corte 2

Las micrografías a mayores aumentos (200X), figura 5.49, y (500X), figura 5.50, revelan en detalle estos efectos; mostrándose un fuerte engrosamiento de granos, un importante efecto de maclado y fragilización por hidrógeno con segregaciones en el borde de grano. También se aprecia penetración de la oxidación hacia el interior del material.

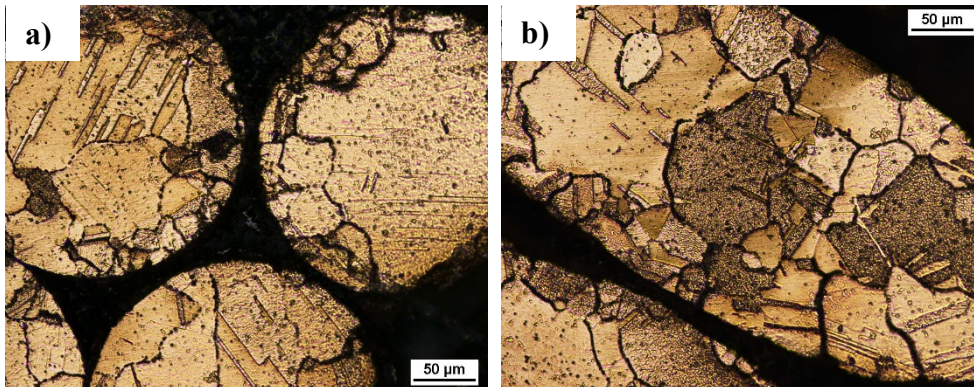


Figura 5.49 Detalle de la microestructura en la que se aprecia la formación de óxidos y segregación en el borde de grano, así como su fragilización (200X)

Estos efectos fueron observados en los casos desarrollados en laboratorio, para las secuencias de ensayo 800-10R-10O y 800-60R-60O, sobre cableado multifilar, en las que se somete al conductor a una atmósfera reductora y posteriormente a una oxidante, véase apartado 5.2.3.

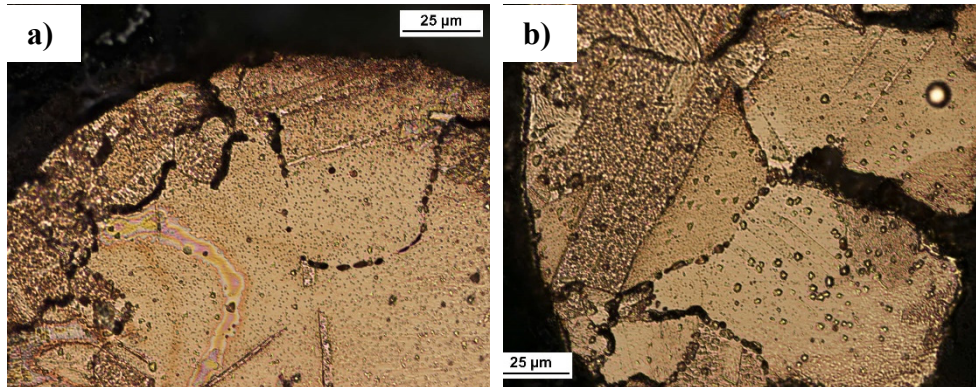


Figura 5.50 Detalle de la microestructura en la que se aprecia fuerte engrosamiento de grano, fragilización del borde de grano y maclado (500X)

5.4.3. Microestructura del cableado del CASO 3

En este tercer caso, del incendio se obtuvo cableado unifilar de tres hilos, el cual, según la investigación efectuada, resultó afectado inicialmente por calor y posteriormente por las llamas, es decir por alcance del incendio, produciéndose fusiones por cortocircuito de carácter secundario, véase figura 5.51. El cortocircuito produjo el seccionamiento del cableado en dos, parte del mismo se encontraba protegido por un refuerzo con armadura de hilos de acero, figura 5.51b, el resto no, figura 5.51a.

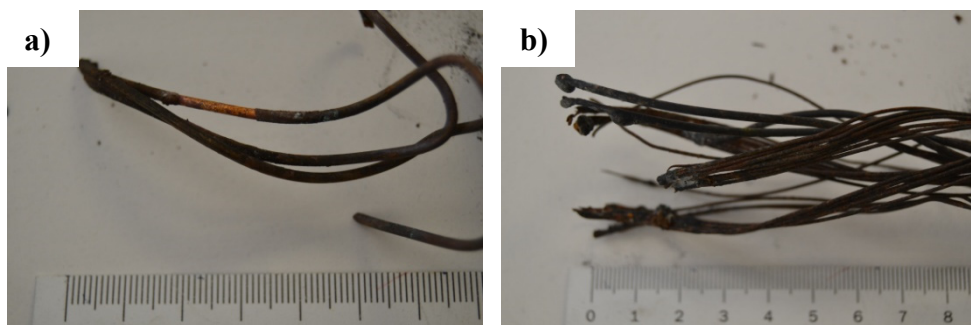


Figura 5.51 Detalle de los hilos conductores a) cableado no apantallado b) cableado protegido por malla de acero

Para este análisis se seleccionaron dos conductores de cobre con particulares afectaciones por fusión, denominándose a los mismos Cobre 1 y Cobre 2, de los que se preparó cortes transversales y longitudinales.

La metalografía del corte correspondiente al Cobre 1, resulta típica de un material de colada, véanse las figuras 5.52 y 5.53. En ellas se aprecia gran porosidad y microestructura globular dendrítica de los materiales fundidos y solidificados posteriormente.

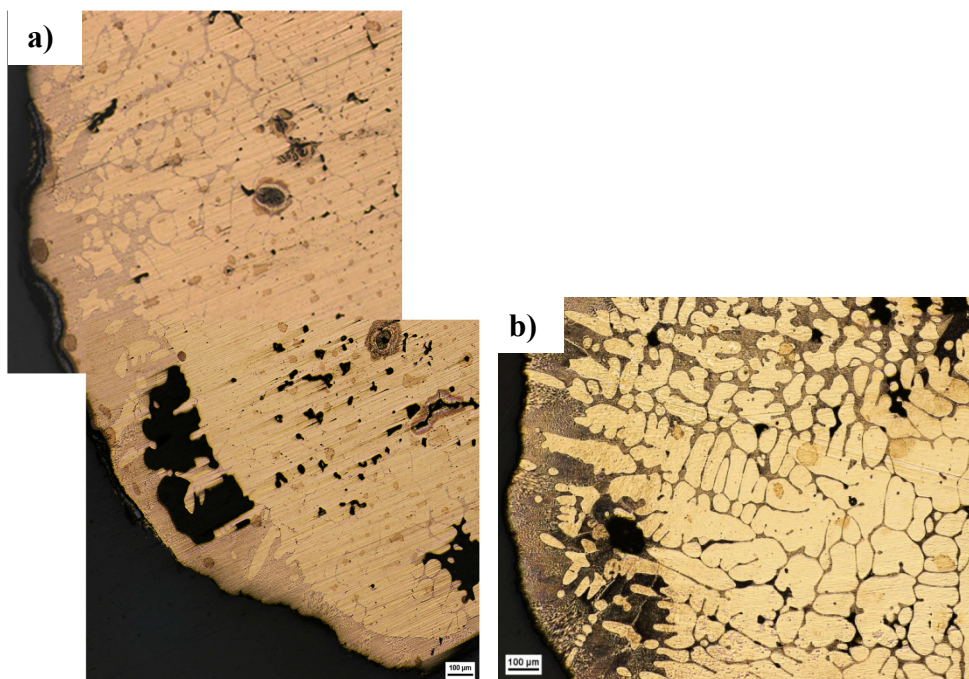


Figura 5.52 Microestructura del corte transversal del cobre 1 **a)** estado de pulido (50X)
b) atacado (50X)

En estas microestructuras de solidificación dendríticas se observa la formación de eutéctico Cu-O y la difusión de oxígeno hacia el interior del conductor con una formación hipoeutéctica, figura 5.53. En la superficie de la zona fundida prácticamente no se observa capa de óxido, si bien sí existe una extensa formación de eutéctico Cu-O, que se extiende hacia el interior a través de los espacios interdendríticos. Esta estructura es resultante de una importante absorción de gases u óxidos superficiales, por parte del cobre, en estado líquido de modo que en la solidificación tiene lugar la transformación eutéctica y por ello el aspecto característico de la estructura laminar del mismo, figuras 5.52b y 5.53.

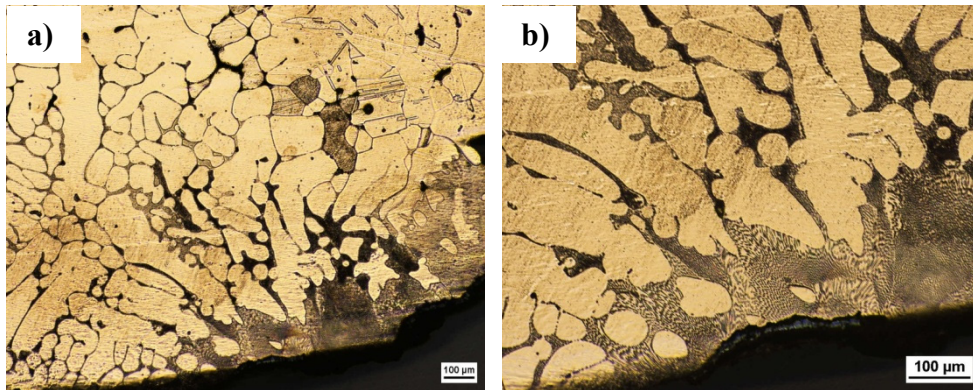


Figura 5.53 Microestructura de otra zona del corte transversal del Cobre 1 **a)** atacado (50X)
b) otra zona, atacado (100X)

Este mismo efecto, y microestructura semejante, se observa en el corte longitudinal del Cobre 1, véase la figura 5.54.

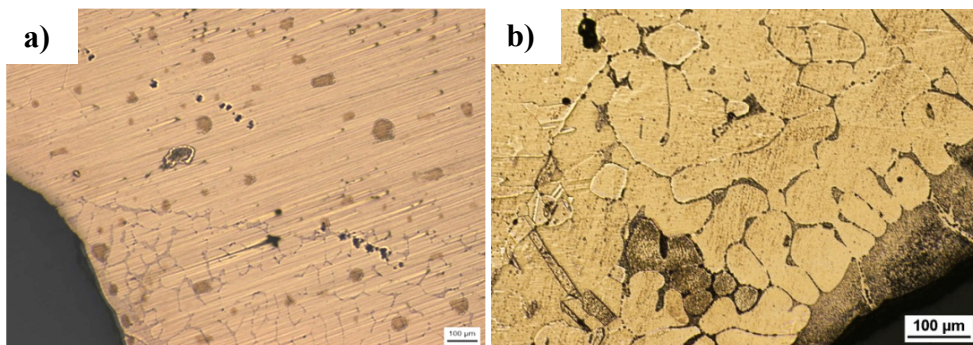


Figura 5.54 Microestructura en el corte longitudinal del Cobre 1 **a)** en el encuentro del material base del hilo con la pegadura fundida (50X, pulido) **b)** detalle en el encuentro del material base del hilo con la pegadura fundida (100X, atacado).

En ellas se aprecia la microestructura maclada del hilo recubierta por completo con el material fundido y posteriormente solidificado con una importante capa de oxidación resultante de la exposición a temperaturas elevadas a atmósferas oxidantes. Sin embargo, no se aprecia oxidación en la superficie por la exposición a atmósferas reductoras, que por una parte eliminan por reducción la capa de óxidos superficiales que pudiera formarse y generan en el hilo la reducción de los óxidos del borde de grano que provo-

ca la fragilización del material, véase en figura 5.55 la superficie del hilo conductor en una zona carente de fusiones.

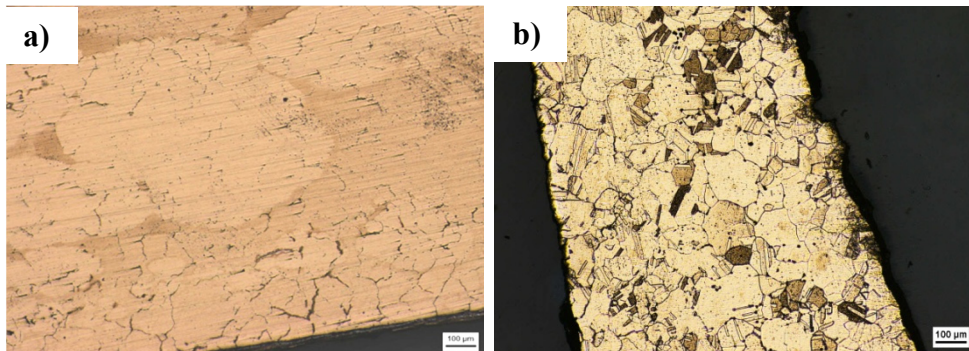


Figura 5.55 Microestructura en el corte longitudinal del Cobre 1 a) pulido (50X) b) atacado (50X)

Precisamente en estas zonas de los conductores sin fusiones se aprecia una fuerte fragilización por hidrógeno como resultado de la primera oxidación y posterior reducción de los óxidos en el borde de grano, tal y como se pudo comprobar experimentalmente en el cableado unifilar del apartado 5.2.4, ensayado a 800°C (800-10O-10R y 800-60O-60R). Esta fragilización en borde de grano también se produjo en laboratorio en condiciones de reducción y posterior oxidación, si bien formándose capa de óxido en superficie que en este caso del Cobre 1 no se da.

Este efecto, se aprecia perfectamente en las imágenes correspondientes al corte longitudinal de los hilos conductores, figura 5.56, y las transversales del Cobre 2, figura 5.57, en las que puede observarse el efecto de oxidación a través del borde de grano que penetra prácticamente hasta el mismo centro del hilo, con formación de gran porosidad en el centro del mismo y bloqueo del crecimiento de grano que tendría lugar por las elevadas temperaturas.

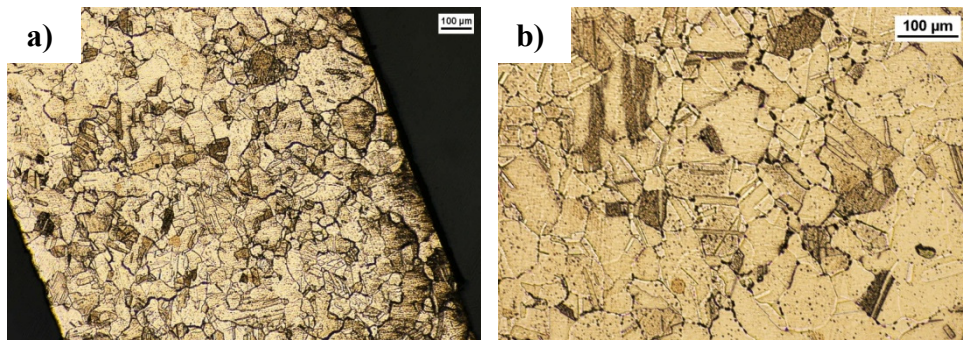


Figura 5.56 Microestructura en el corte longitudinal del Cobre 1 **a)** atacado (50X) **b)** otra zona atacado (100X)

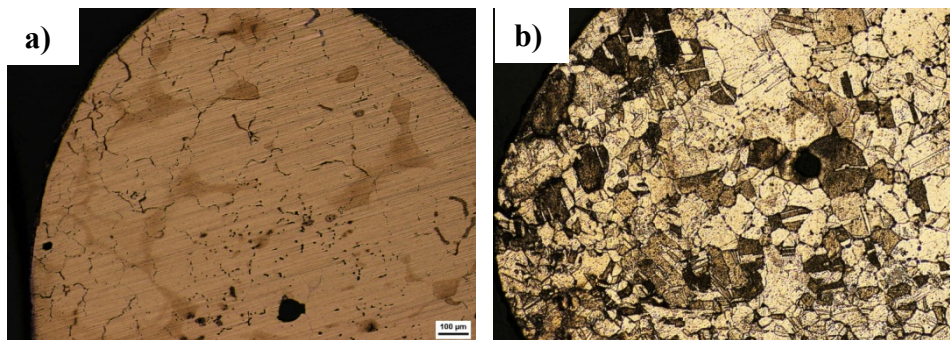


Figura 5.57 Microestructura en el corte transversal del Cobre 2 **a)** difusión de oxígeno, pulido (50X) **b)** crecimiento de granos, atacado (50X)

En el corte transversal del Cobre 2 resulta muy evidente la transformación general de la pegadura alrededor del hilo conductor a microestructuras hipoeutécticas, figura 5.58, que en algunas zonas presentan una transformación casi completa al eutéctico del oxígeno, lo que representa fuertes incrementos de este elemento y temperaturas superiores a los 1065°C para su formación.

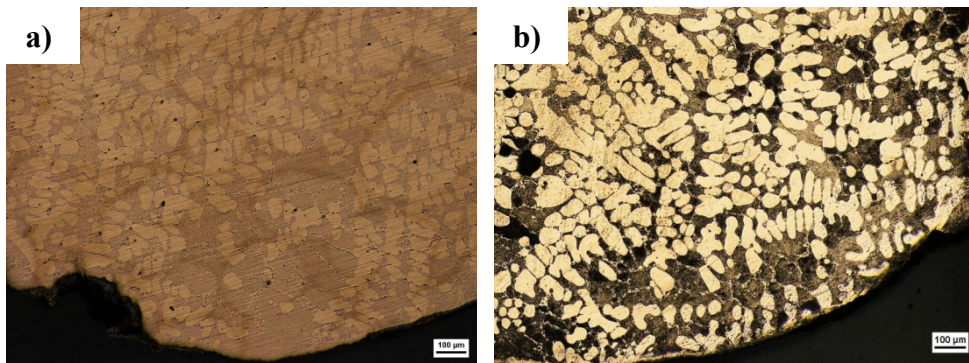


Figura 5.58 Microestructura en el corte transversal del Cobre 2 **a)** transformación eutéctica, pulido (50X) **b)** transformación eutéctica, atacado (50X)

En la unión de la pegadura con el hilo conductor, figura 5.59, se aprecia la progresión del óxido hacia el interior del conductor, a través del borde de grano provocando con la acumulación de temperaturas, y elevados recocidos que engrosan el grano. Además se aprecia la formación de importante porosidad interna por las elevadas temperaturas a las que se ha visto sometido el hilo conductor.

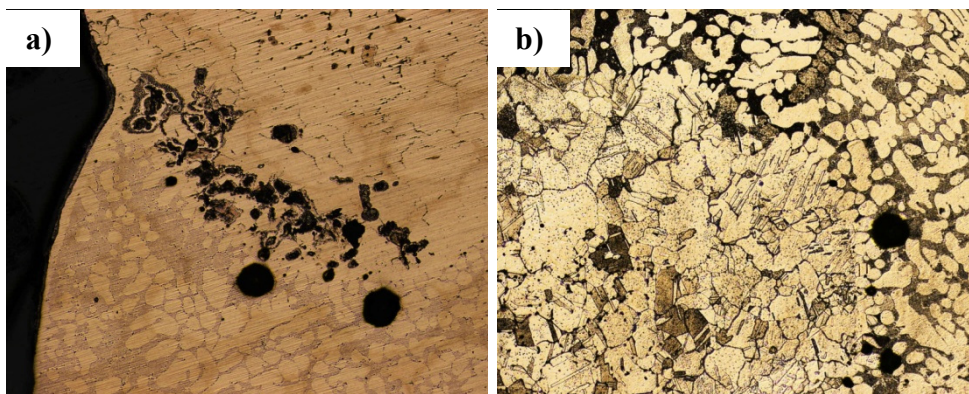


Figura 5.59 Microestructura en el corte transversal del Cobre 2 **a)** unión de la pegadura con el hilo, pulido (50X) **b)** unión de la pegadura con el hilo, con una zona de fusión periférica y microestructura de engrosamiento de grano, atacado (50X)

En el corte longitudinal preparado, figura 5.60, se aprecia un efecto semejante en cuanto a la transformación eutéctica en la zona fundida y fuertes porosidades, principalmente en las zonas de unión entre el material fundido y el hilo conductor.

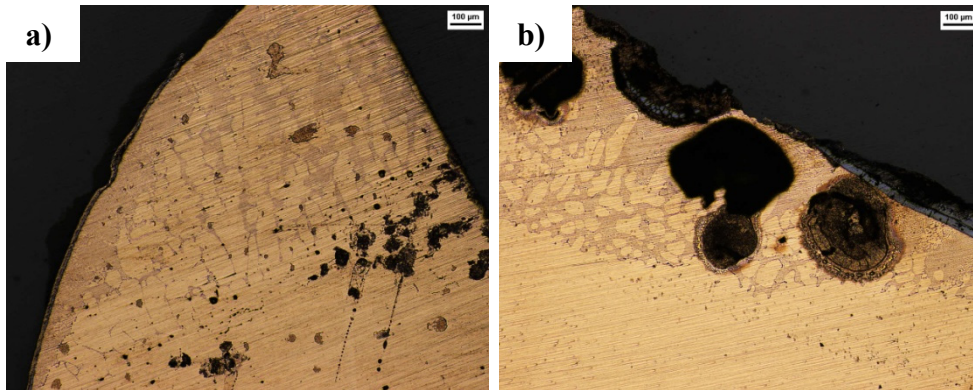


Figura 5.60 Microestructura en el corte longitudinal del Cobre 2 **a)** formación eutéctica, pulido (50X)
b) formación de eutéctico y porosidad en superficie con restos de corrosión superficial, pulido (50X)

Cuando se ataca la preparación se aprecia con mayor detalle la interacción entre el metal fundido y el hilo conductor original, revelando una estructura de difusión del oxígeno hacia el interior del hilo, aunque se marca perfectamente la microestructura que corresponde a cada uno de los materiales, véase las figuras 5.61 y 5.62. Principalmente, en la figura 5.62 en la que se realiza un montaje fotográfico de uno de los extremos con fuerte deterioro y donde queda patente la deposición en la superficie del material fundido y al tiempo el fuerte engrosamiento de grano que alcanza valores superiores a las 200 micras de diámetro equivalente.

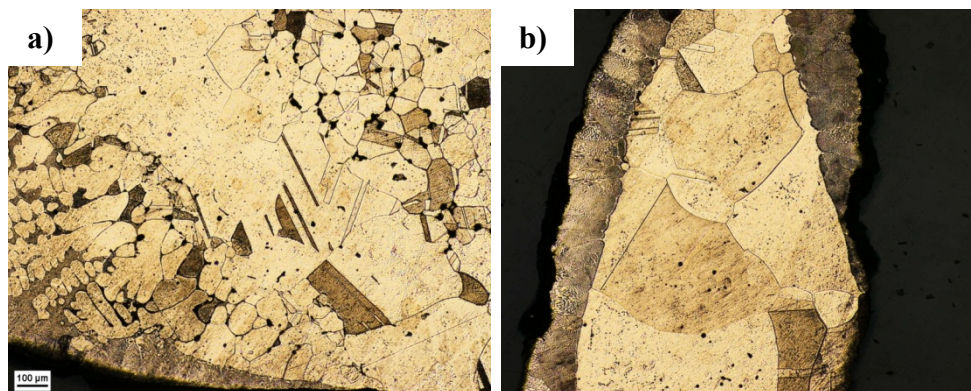


Figura 5.61 Microestructura en el corte longitudinal del Cobre 2 **a)** zona de fusión y conductor, atacado (50X) **b)** extremo del conductor, atacado (50X)

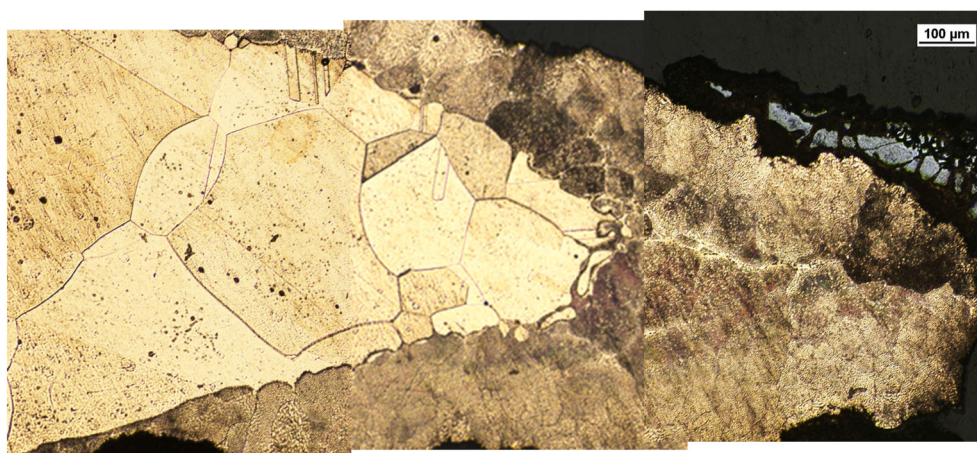


Figura 5.62 Detalle del corte longitudinal del Cobre 2, extremo del conductor, atacado (100X)

5.4.4. Microestructura del cableado del CASO 4

En este caso se obtuvo cableado unifilar con diferentes pegaduras y fusiones del cobre que los compone, así como con intensas afectaciones de calor y llamas. Se trata de cableado extraído del foco origen del incendio, siendo considerado el incendio de carácter accidental y causado por una avería o fallo eléctrico. De entre los restos recuperados se seleccionan tres trozos de cableado característicos, denominándose cada una de las muestras A1, A2 y A3, de las que se prepararon cortes transversales y longitudinales, figura 5.63.

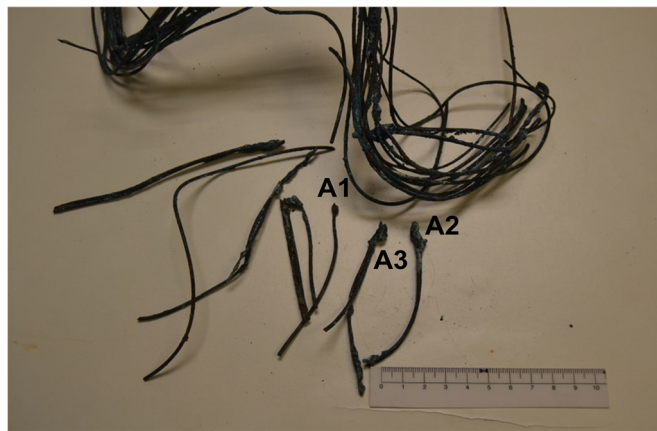


Figura 5.63 Detalle del cableado sometido a análisis y elementos seleccionados.

Las micrografías del corte longitudinal de la muestra A1, figuras 5.64 y 5.65, muestran el conductor de cobre que acompaña a la pegadura y que presenta un importante adelgazamiento en la parte izquierda de la figura 5.64; ello es resultado de una fuerte oxidación superficial y posterior reducción de los óxidos.

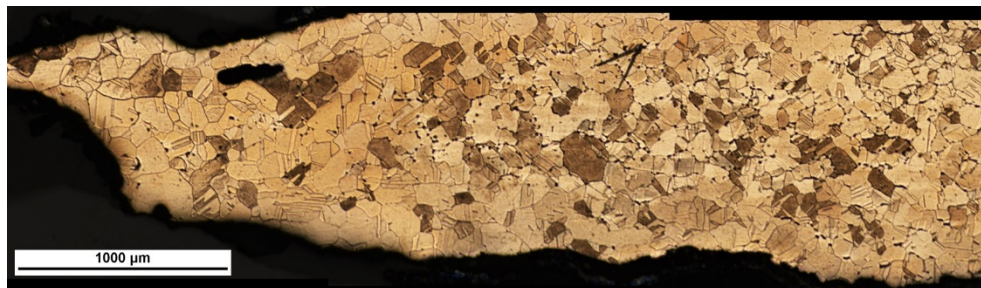


Figura 5.64 Microestructura del corte longitudinal del hilo de la muestra A1, cerca de su zona de estricción

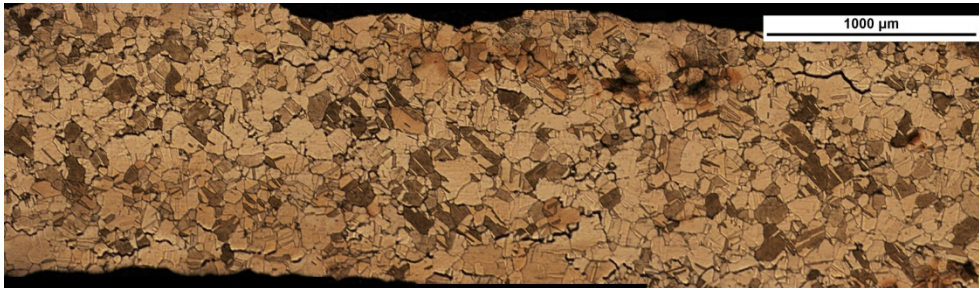


Figura 5.65 Microestructura en la continuación del hilo

En ambas imágenes se observa una microestructura, que a pesar de un aumento de su tamaño de grano, mantiene un grano suficientemente fino, con fragilización por hidrógeno en borde de grano, tal como se aprecia mejor en las imágenes de detalle, figura 5.66.

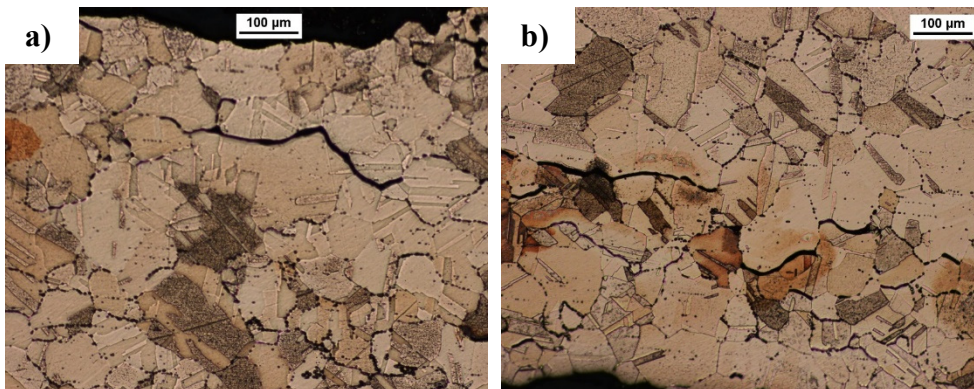


Figura 5.66 Microestructura del conductor de la muestra A1 **a)** fragilización por hidrógeno en la zona superficial **b)** fragilización por hidrógeno en el borde de grano, efecto que va penetrando hacia el interior del material

En el mismo corte longitudinal pero sobre la pegadura, al final del conductor, véase figura 5.67, se aprecia la formación de granos redondeados con algunas maclas, por solidificación del cobre. En la superficie de la pegadura hay una importante difusión de oxígeno principalmente a través del borde de grano, donde se forma el eutéctico Cu-O, y que se detiene en la línea de poros que divide el sólido de la zona de fusión.

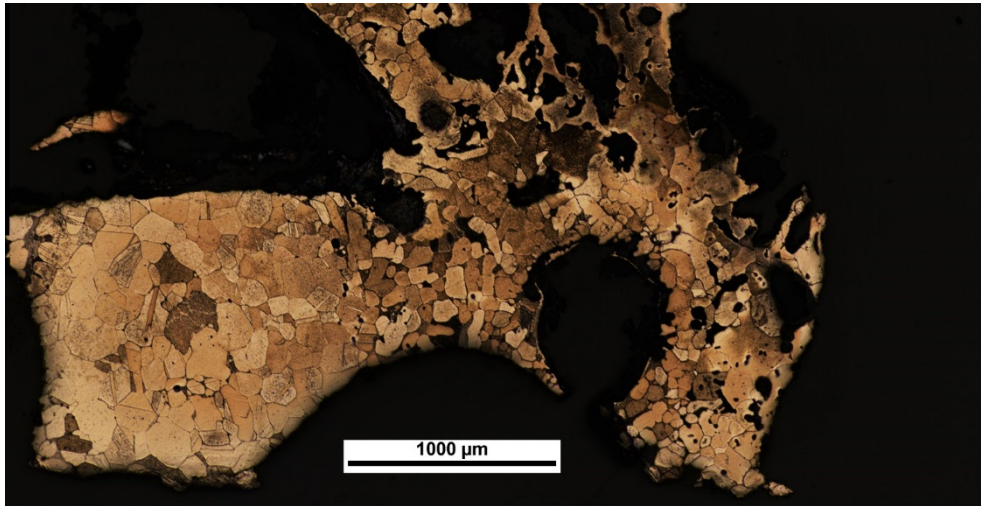


Figura 5.67 Corte longitudinal de la pegadura de la Muestra A1, donde se aprecia dos microestructuras diferentes; a la izquierda microestructura del hilo conductor a la derecha zona fundida en forma de pegadura, atacado (50X)

En la zona de la pegadura más alejada del conductor también se aprecia la formación del eutéctico Cu-O en borde de grano, junto a porosidades que responden a contracciones en caliente durante la solidificación del metal.

En el corte transversal de la muestra A1, figura 5.68, se aprecia diferentes zonas que presentan microestructuras claramente distintas. Las zonas más externas presentan formación de eutéctico Cu-O, con incorporación de oxígeno a través del borde de grano.

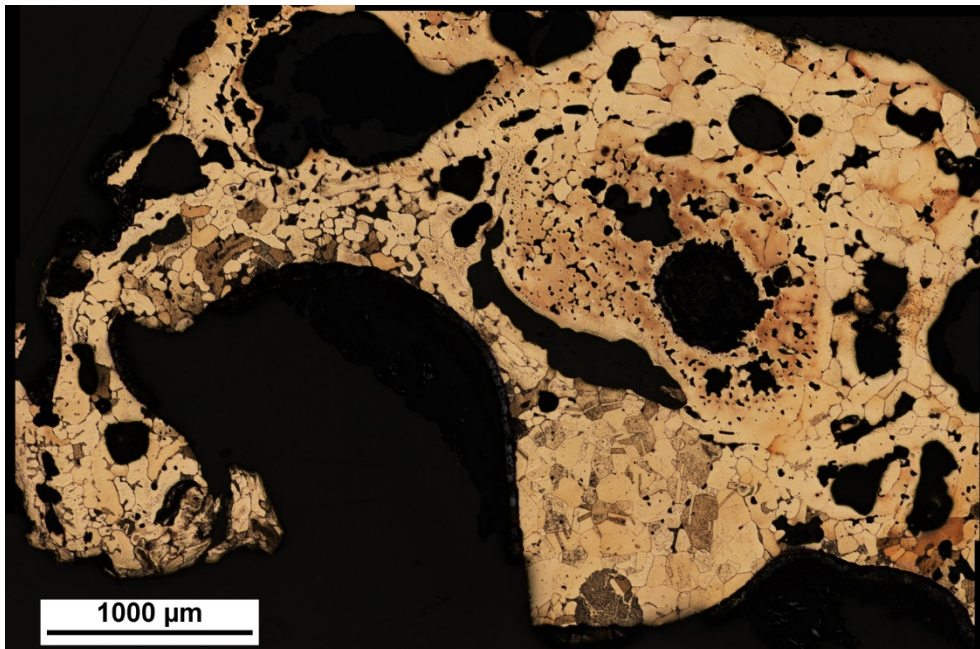


Figura 5.68 Corte transversal de la pegadura de la muestra A1; imagen general con zona fundida y restos microestructurales del conductor sin fundir, atacado (50X)

La zona central, corresponde a material fundido con fuerte porosidad obtenida por enfriamiento rápido lo que proporciona una especial irregularidad en los poros. En esta figura se aprecia la acumulación de poros en el borde de los granos, pero no la formación de óxidos ni transformación eutéctica. Este detalle se aprecia igualmente en la zona correspondiente al centro de la pegadura, en la que los bordes de grano aparecen prácticamente limpios, y los poros irregulares y exentos de oxidación superficial. Todo ello confirma la formación de esa microestructura en aire calmo sin una atmósfera especialmente oxidante.

En la muestra A2, las micrografías mostradas en las figuras 5.69 y 5.70 recogen un montaje de una extensa zona de los cortes longitudinal y transversal realizados en la muestra A2, correspondiente a dos hilos conductores prácticamente fundidos entre sí.

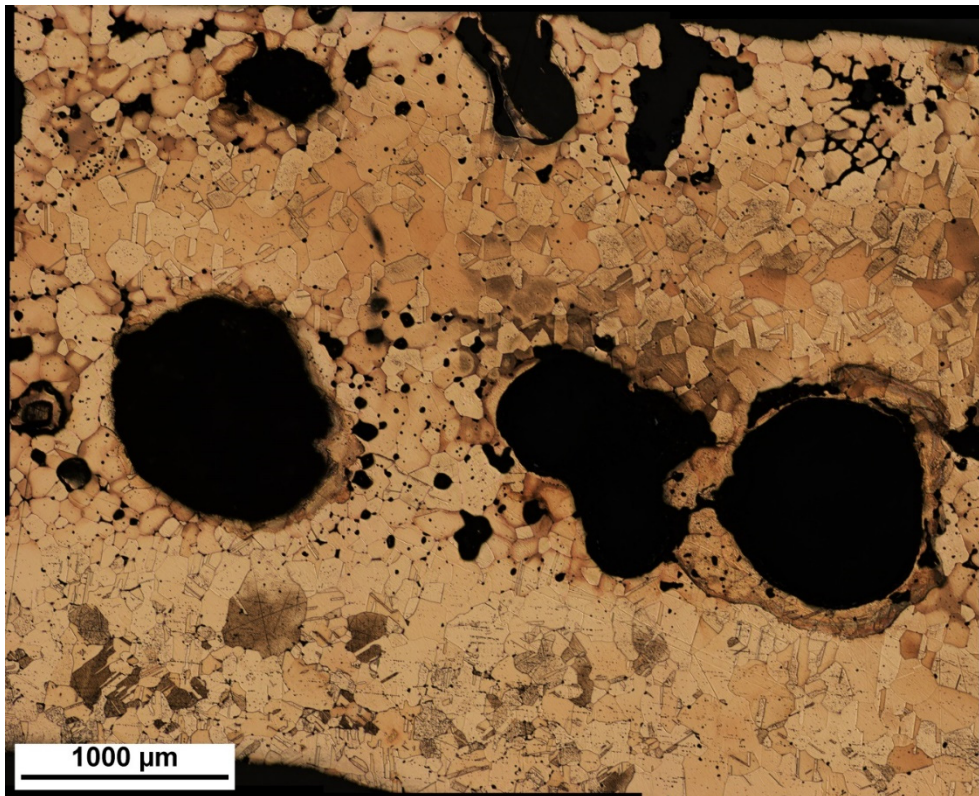


Figura 5.69 Microestructura del corte longitudinal de la muestra A2, en la que se aprecia la fusión entre dos hilos de cobre (50X)

En estas figuras se aprecia una microestructura de granos redondeados con una importante porosidad, sobre todo en las zonas completamente fundidas, y un borde de grano muy limpio. La microestructura del cable conductor, permanece aún con los granos poligonales que aunque engrosados y redondeados por el efecto térmico, todavía permanecen con un tamaño medio por la rápida acción del calor en la fusión del material y su posterior solidificación.

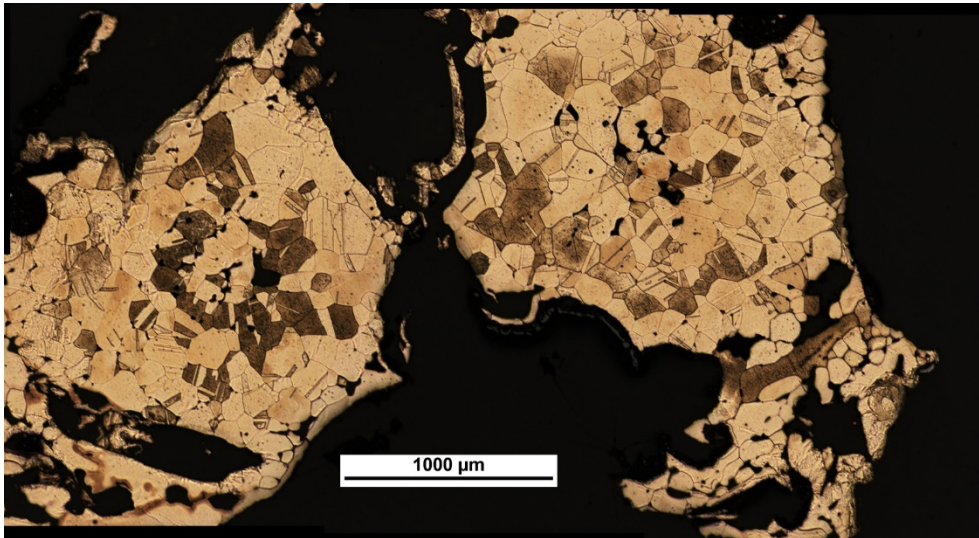


Figura 5.70 Detalle de la microestructura en el corte transversal de la muestra A2 (50X)

Esto mismo se aprecia de manera notable en el corte transversal, figura 5.70, en cuyos detalles de la microestructura general del conductor aparece con los granos con un fuerte engrosamiento bloqueado por la formación de poros, sin embargo, y al igual que sucedía en la muestra A1, en la superficie de la pegadura aparece la formación de transformación eutéctica en borde de grano. De hecho, prácticamente todo el material fundido, hasta contactar con el conductor, presenta la formación de eutéctico muy fino en borde de grano.

En el caso de la muestra A3, el corte longitudinal se presenta en las figuras 5.71 y 5.72 pues se ha deseado obtener información tanto de la parte de los conductores como de la zona fundida.

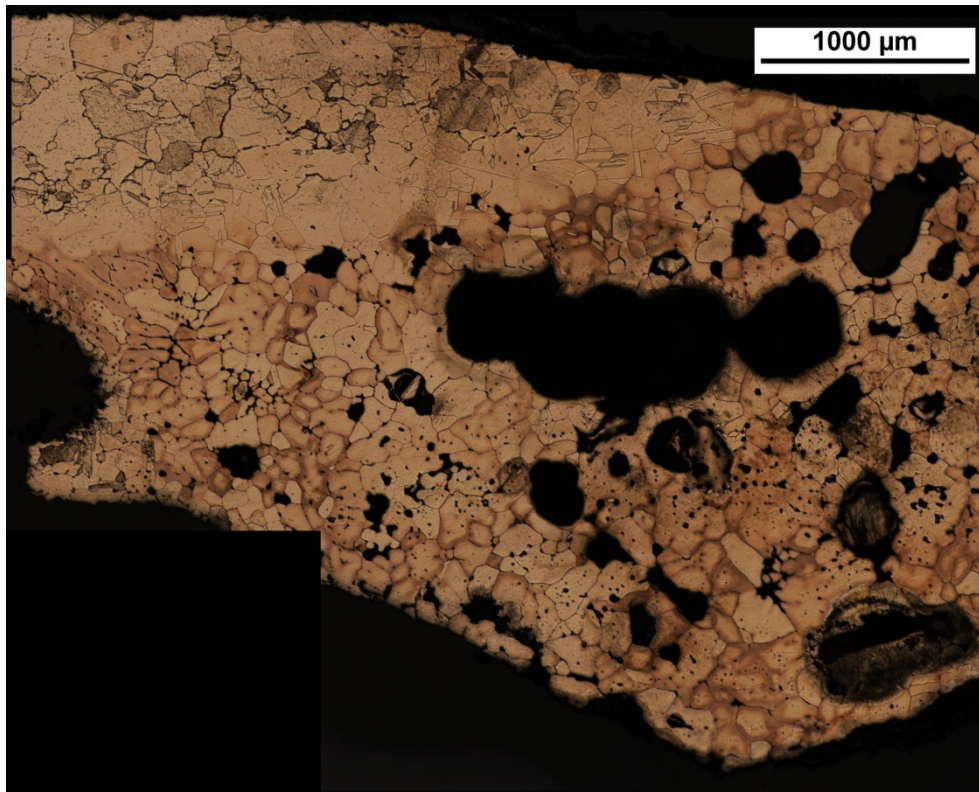


Figura 5.71 Microestructura general del corte longitudinal de la muestra A3 (50X), en la zona que posee tanto cable conductor (parte superior) como zona fundida solidificada posteriormente (zona inferior). La zona fundida se prolonga en la pegadura, recogida en la figura 5.72

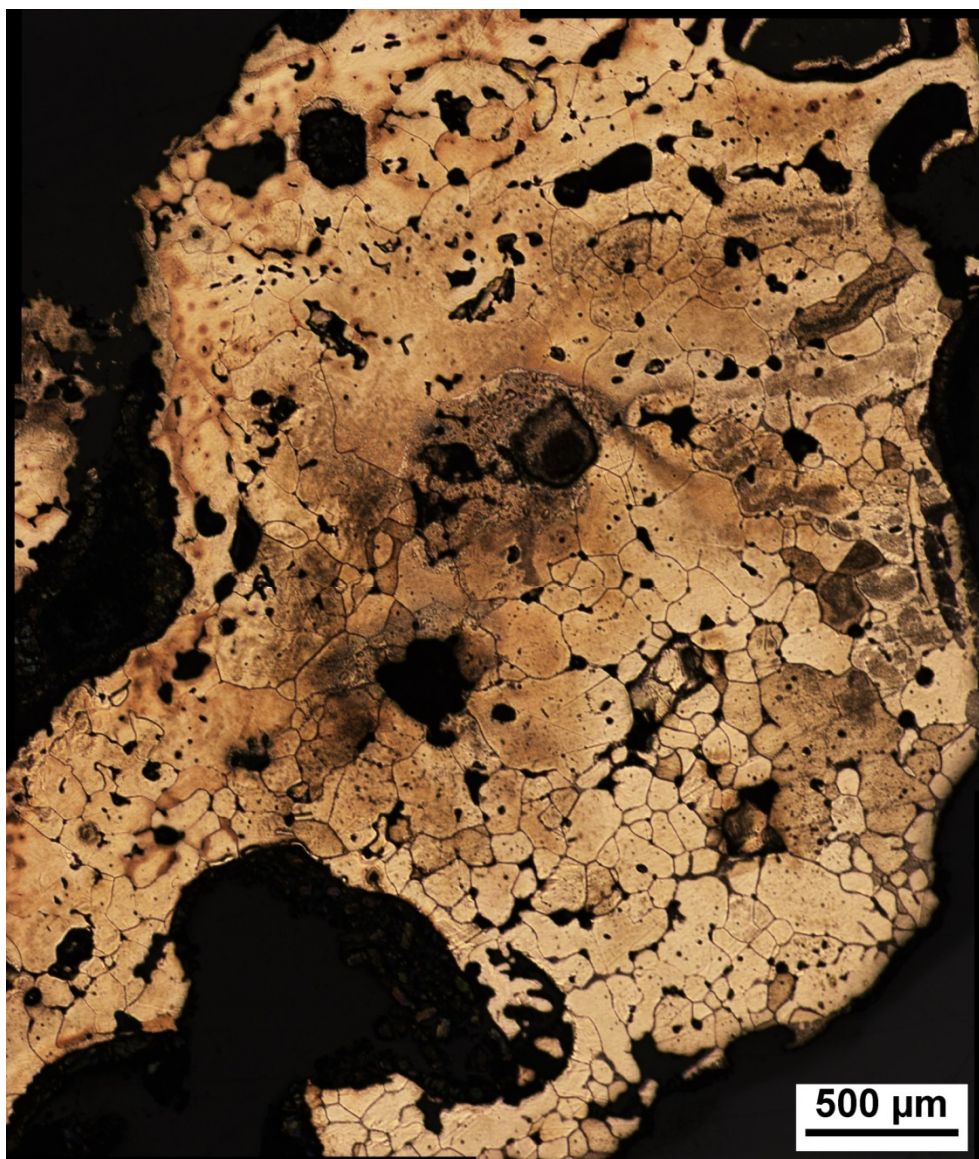


Figura 5.72 Microestructura del corte longitudinal de la muestra A3 en la zona de la pegadura, en el extremo del conductor (50X)

En la primera, figura 5.71, en la parte superior de la micrografía, se aprecia la forma del conductor de cobre, con una importante zona fundida en su parte inferior, con una microestructura que combina algunas zonas limpias, con otras donde se aprecia con claridad la formación de eutéctico Cu-O. Por otra parte, el cable presenta indicios de fragilización por hidrógeno. Sin embargo en las cercanías de la fusión, el material se encuentra especialmente limpio.

En el corte transversal de la pegadura, figura 5.73, se observa una clara microestructura de fusión y posterior solidificación con zonas refundidas procedentes del conductor, tal como se aprecia por la formación de una barrera intermedia de porosidad en su zona central.

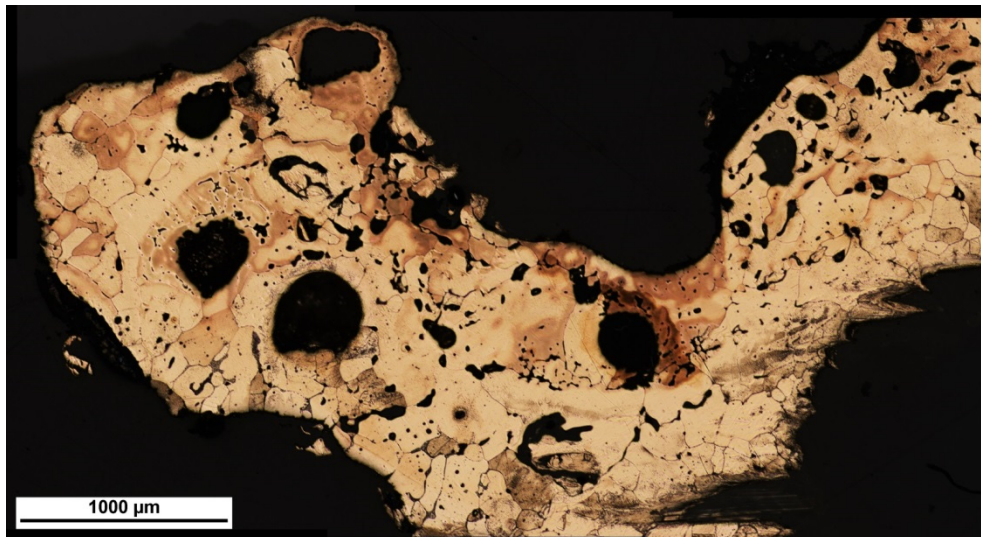


Figura 5.73 Microestructura general del corte transversal de la muestra A3 (50X)

Pese a encontrar una microestructura de grandes granos, algunos de ellos cercanos al milímetro, se da una transformación eutéctica. No obstante quedan zonas en las que se observan grandes granos incluso superiores a las 200 micras y que ya presentan óxidos en el borde de grano, por absorción de oxígeno de la atmósfera durante la fusión del material. Sin embargo su cantidad es muy pequeña y corresponde a fusiones en atmósferas todavía no muy oxidantes.

5.4.5. Microestructura del cableado del CASO 5

En este caso se obtuvo cableado multifilar afectado intensamente por el incendio, observándose evidentes síntomas de cortocircuito en el mismo por medio de fusiones puntuales del material de cobre del que se componen. Las muestras se componen de tres cableados multifilares denominadas Muestra 1, Muestra 2 y Muestra 3, véase figura 5.74. Sobre la Muestra 1 se realizaron dos cortes transversales A y B, uno en cada uno de los tramos de cable de que se dispone. En la Muestra 2 se realizó un único corte transversal en la posición de una pegadura existente. Sobre la Muestra 3 se realizaron dos cortes A y B.



Figura 5.74 Vista general de las muestras sometidas a análisis **a)** y **b)** componen la Muestra 1 al tratarse del mismo cable seccionado **c)** Muestra 2 y **d)** Muestra 3

En referencia a la Muestra 1 se preparó dos cortes transversales, uno en cada uno de los dos tramos de cableado de que se dispone.

El corte A de la Muestra 1 corresponde al corte transversal del extremo del cableado mostrado en la figura 5.74a, en el que existe una fusión casi completa de los hilos, figura 5.75a, con una formación de eutéctico en borde de grano que el oxígeno forma con el metal líquido. Sin embargo, en el centro del conductor todavía quedan granos equiaxiales de los hilos conductores de cobre, figura 5.75b.

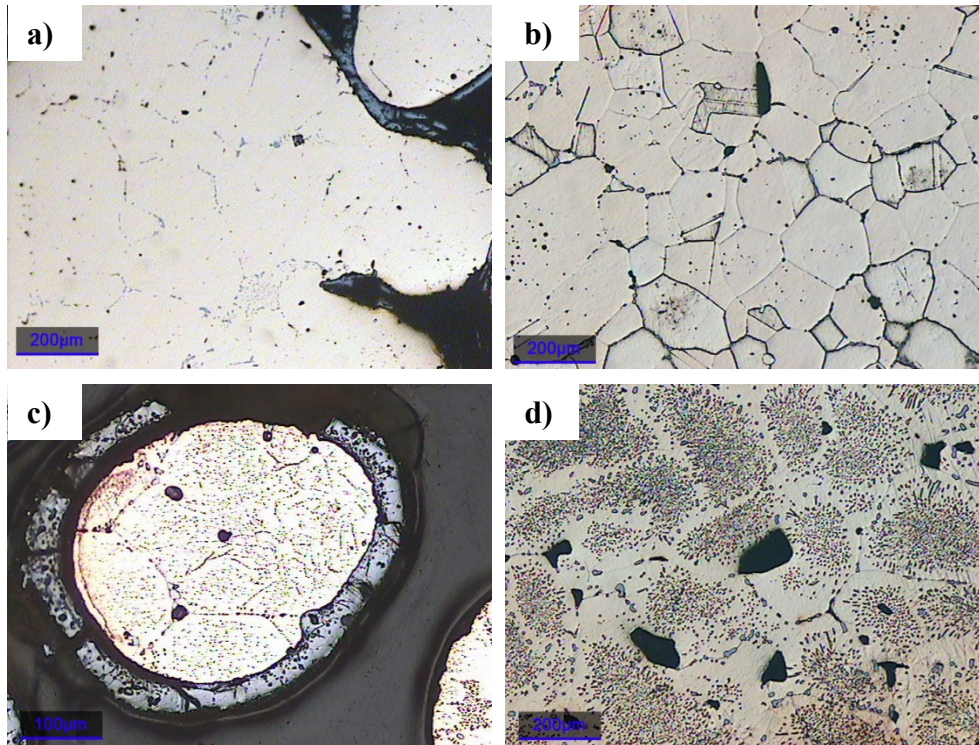


Figura 5.75 Microestructura del Corte A, corte transversal de la fusión en el extremo del conductor
a) hilos fundidos, pulido (50X) **b)** microestructura en el centro del conductor, atacada (50X)
c) capa de óxido alrededor de hilos en la parte externa del conductor, atacado (100X) **d)** fuerte corrosión en la zona exterior del conductor, atacado (50X)

No obstante, en los hilos de la periferia todavía queda una importante cantidad de óxido superficial de algo más de 50 micras, figura 5.75c, en cuyo interior se aprecia una fragilización del borde de grano y una formación masiva de óxidos en el interior de los granos, figura 5.75d.

El Corte B de la Muestra 1, corresponde al extremo del conductor fundido mostrado en la figura 5.74b. La microestructura de esta fusión presenta granos bastante limpios que embeben algunos óxidos que se forman preferentemente en el borde de grano aunque algunos de ellos se ubican en el interior de los mismos, figuras 5.76a, 5.76c y 5.76d. En la periferia de la zona más fundida los hilos aparecen con una fuerte fragilización, figura 5.76b

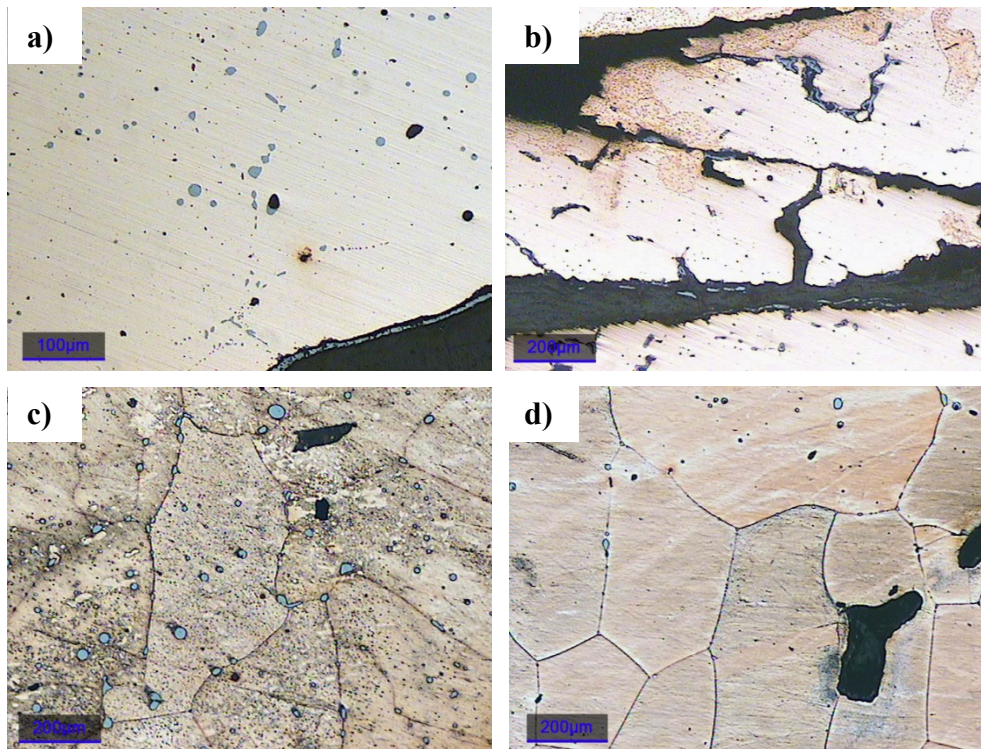


Figura 5.76 Microestructura del Corte B, corte transversal de la fusión en el extremo del conductor **a)** hilos fundidos con incorporación de óxido de la superficie, pulido (100X) **b)** detalle de deterioro de los hilos con fuerte oxidación superficial, pulido (50X) **c)** microestructura de los hilos en la zona exterior, atacada (50X) **d)** microestructura en el interior de los hilos, pulido (50X)

Respecto a la Muestra 2, se preparó un único corte transversal en el extremo fundido del cable, en el que se observan algunas perlas de fusión, figura 5.74c.

Mediante las micrografías se observa que los hilos conductores no presentan un estado de oxidación excesivo en la su superficie de los hilos ni fragilización en borde de grano, tal como se aprecia en la figura 5.77a. Sin embargo la zona fundida presenta una gran porosidad que se provoca por la rápida solidificación del material fundido en contacto con el material del cable, más frío, véase la figura 5.77b.

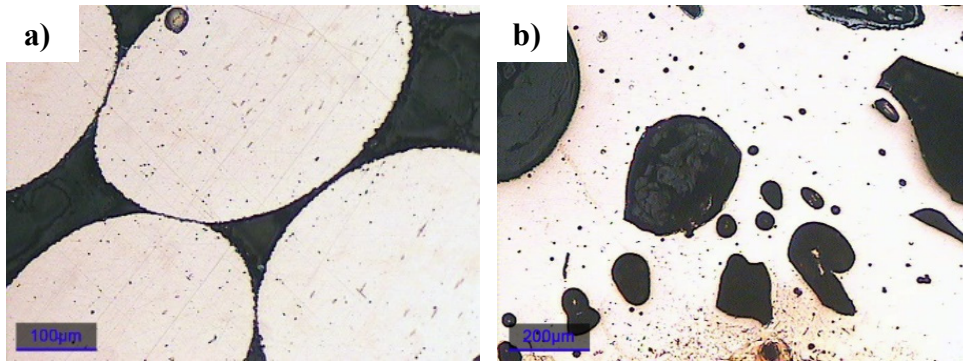


Figura 5.77 Microestructura de los hilos de la Muestra 2 **a)** zona de hilos, pulido (100X) **b)** zona fundida, pulido (50X)

Cuando se ataca la preparación metalográfica, figura 5.78, se aprecia que la microestructura de los hilos corresponde a un importante engrosamiento de grano sin formación de cuellos de unión, figura 5.78a. En los hilos en el interior del cable se aprecia una fuerte reducción de su diámetro, como resultado de la oxidación superficial de los mismos de modo que de las dimensiones originales de unos 250 micrómetros de diámetro pasa en algunos casos a un diámetro no superior a los 150 micrones.

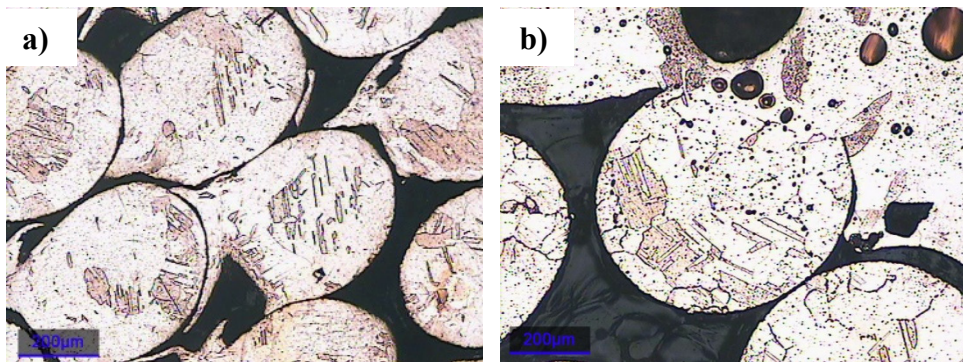


Figura 5.78 Microestructura de los hilos de la Muestra 2 **a)** atacado (50X) **b)** material fundido externo a los hilos conductores, atacado (50X)

Sin embargo el óxido superficial encontrado es muy poco por lo que nos está indicando que tras la fuerte oxidación, el óxido ha sido reducido en atmósferas fuertemente reductoras.

Respecto a la Muestra 3, se prepararon dos cortes transversales, A y B. El corte A de la Muestra 3 corresponde al corte transversal del extremo del cableado mostrado en la figura 5.74d, en el que existe una fusión casi completa de los hilos. Este corte presenta una microestructura de hilos muy limpia, con un material fundido que se ha depositado en el exterior pero que no ha fundido el material de los hilos, véase la figura 5.79a. El material fundido presenta una enorme porosidad con sopladuras que se dirigen tímidamente en una dirección de evacuación de los gases incluidos en el líquido, figura 5.79b. Estos poros micro y macroscópicos no poseen estructura eutéctica por reacción con oxígeno.

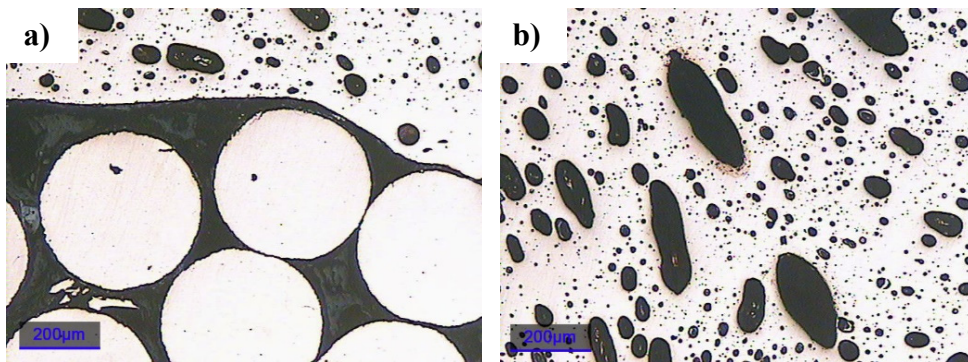


Figura 5.79 Microestructura en el corte A de la Muestra 3 **a)** hilos y material fundido externo a los hilos, pulido (50X) **b)** zona fundida con abundante porosidad, pulido (50X)

Estas sopladuras se aprecian perfectamente en la figura 5.80, donde además del direccionamiento en el sentido de evacuación de los gases, se observa la fusión específica de uno de los hilos del cable, quedando el resto sin mayores alteraciones que el aumento del tamaño de grano, apreciable principalmente en los hilos más periféricos y que va siendo menos patentes según los hilos se encuentran más al interior del cable.

La microestructura de la zona fundida atacada, revela una formación de granos columnares que se forman en la misma dirección de evacuación de los gases, y están completamente exentos de formación de estructuras oxidadas.

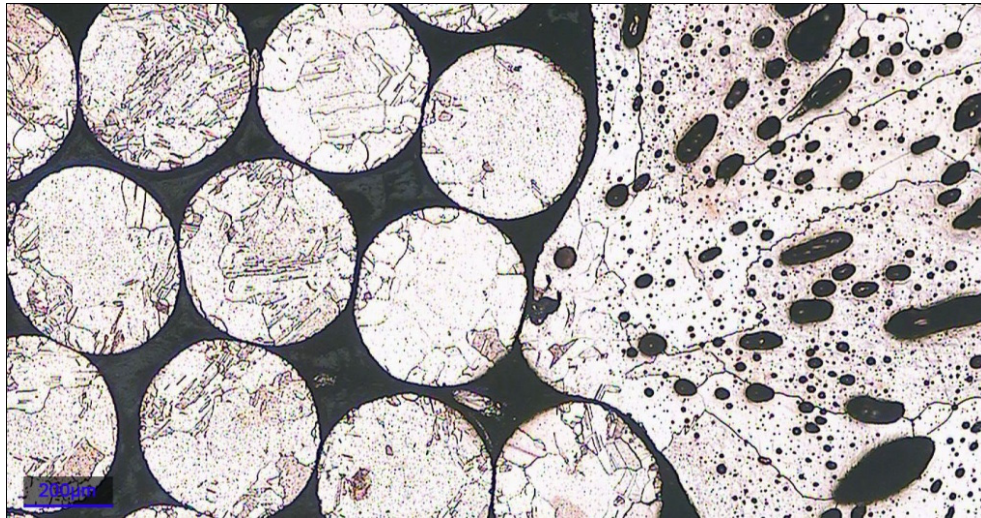


Figura 5.80 Microestructura del Corte A de la Muestra 3, donde se observa los hilos conductores y la zona fundida con sopladuras, atacado (50X)

A unos 10 centímetros del Corte A se realiza la preparación del corte B, en una zona no afectada por fusiones, figura 5.81. Se contraponen microestructuras de los hilos interiores que no presentan fragilización en borde de grano, figura 5.81a, con hilos periféricos que sí presentan fragilización por hidrógeno, figura 5.81b.

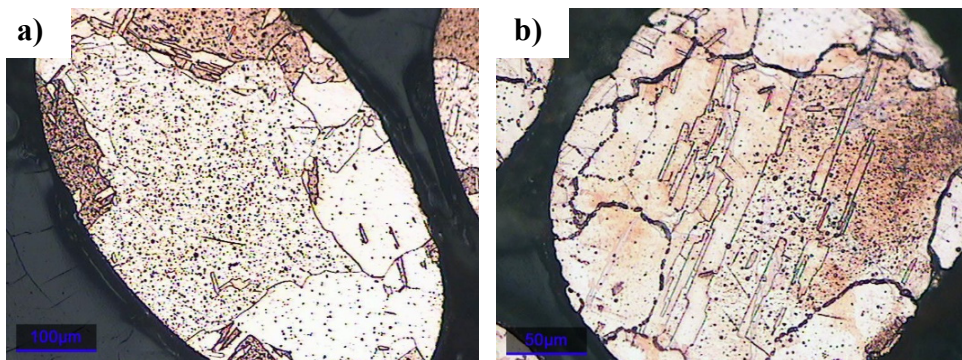


Figura 5.81 Microestructura del Corte B de la Muestra 3 **a)** microestructura de los hilos en el interior, atacado (100X) **b)** microestructura de los hilos periféricos, atacado (200X)

Capítulo 6

Análisis de resultados y su discusión

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos y se realizará la discusión correspondiente, buscando correlacionar los resultados obtenidos en la experimentación en laboratorio con los resultados de la evaluación de muestras obtenidas de casos reales de incendios, para finalmente comparar con lo reportado hasta la fecha por otros autores y aportar el conocimiento que permita el cumplimiento de los objetivos de esta tesis.

6.1. Influencia de la temperatura, tiempo y atmósferas de tratamiento, en la microestructura y propiedades mecánicas de los conductores de cobre

En el presente apartado se evalúa los resultados obtenidos de las comprobaciones sobre la microestructura y propiedades mecánicas de los conductores de cobre unifilares y multifilares sometidos a diferentes temperaturas, tiempos y atmósferas. Los tratamientos ensayados fueron a temperaturas de 800 y 1000°C, durante 20 y 120 minutos, y en atmósferas de bajo vacío, en aire estático, en secuencia de atmósfera oxidante/reductora y en secuencia de atmósferas reductora/oxidante. Las observaciones sobre la microestructura se ejemplificarán por medio de observaciones realizadas sobre muestras obtenidas de incendios reales procedentes de los casos expuestos en el apartado 5.4.

De forma genérica, tras el tratamiento térmico de conductores en laboratorio o en las muestras obtenidas de incendios reales, el primer efecto observable en su microestructura es el engrosamiento de tamaño de grano, sin embargo, cuando se exponen los conductores a determinadas atmósferas se agregan otros fenómenos que pueden ser observados con el análisis microestructural. Las propiedades mecánicas de los conductores, tales como su límite elástico, resistencia máxima a la tracción o módulo de elasticidad, se ven de igual forma altamente influenciadas por la temperatura, tiempo y atmósfera a la que son expuestos.

6.1.1. Ensayos a bajo vacío

Para evaluar el comportamiento del material sin intervención de atmósfera alguna se realizaron ensayos de los conductores en condiciones de bajo vacío, lo cual elimina cualquier efecto de los gases contenidos en la atmósfera circundante, los resultados son comparados con los ensayos de las muestras en estado de entrega.

Sobre las muestras tratadas a bajo vacío y a temperaturas de ensayo de 800°C y 1000°C se confirma el incremento de tamaño de grano en comparación con las muestras en estado de entrega. El crecimiento de grano con la temperatura sigue una relación del tipo Arrhenius (López, 2009). Un estado intermedio, de escaso crecimiento de grano, fue observado en el caso de incendio real CASO 1, en el que los conductores unifilares no se vieron afectados por el fuego de forma intensa, siendo notable que el leve crecimiento de grano observado en los conductores era debido al paso de corriente en su normal y cotidiano funcionamiento, figuras 5.43 y 5.44.

Además del crecimiento de tamaño de grano fue significativo el hallazgo de un efecto de fragilización aparecida en borde de grano de todo el conductor para la condición de 800°C y 120 minutos, figura 6.1. Este efecto de fragilización en borde de grano fue llamativo dada la ausencia de atmósfera alguna en este tratamiento que pudiera afectar al material, por ejemplo mediante fragilización por hidrógeno. Dada esta circunstancia se deduce que la fragilización observada es consecuencia del contenido en oxígeno del material, ya que el mismo, en forma de Cu_2O disuelto en el cobre del conductor, es preferencialmente difundido a borde de grano durante el recocido, donde al enfriar lentamente precipita formando la fragilización observada (Kosec *et al*, 1993). Esta segregación pudo verse favorecida por el efecto de succión de la presión negativa aplicada. Se considera que este efecto limitó inicialmente el crecimiento de grano y que no fue observado a temperaturas mayores, 1000°C, debido a la difusión del precipitado hacia la periferia del conductor y al crecimiento de grano a estas temperaturas. La presencia de este óxido de cobre evidencia que el cobre que compone el conductor unifilar adquirido, pese a que pueda estar desoxidado, posee cierta cantidad de oxígeno en su composición.

En ningún caso pudiera achacarse estas segregaciones en borde de grano al efecto de fragilización por hidrógeno, dada la ausencia de atmósfera reductora.

En el cableado multifilar no se observó este efecto a cualquier temperatura, bien por contener menos oxígeno o bien porque los hilos de menor diámetro tienen mayor capacidad de difusión al perímetro. En este sentido, en el cableado multifilar se observó porosidades en la zona periférica de los hilos.

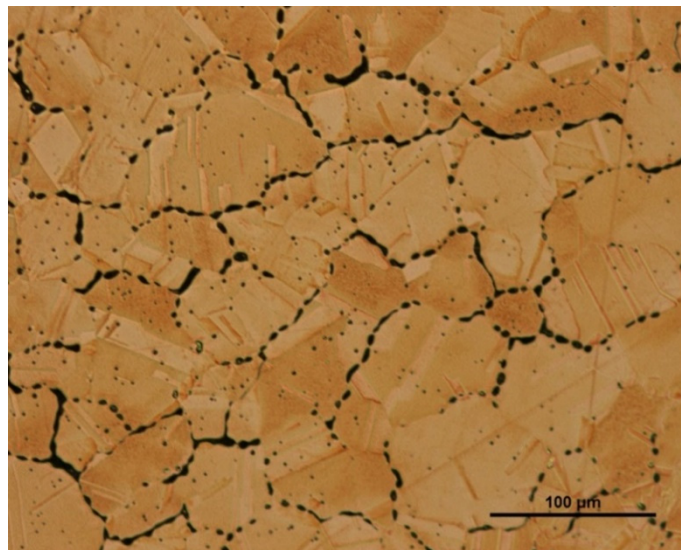


Figura 6.1 Detalle del fenómeno de fragilización por precipitación de Cu_2O y difusión en borde de grano de un cable unifilar tratado en vacío a 800°C durante 120 min (sección transversal a 200X)

Esta segregación en borde de grano produjo una sensible merma de las propiedades mecánicas de los conductores tratados a 800°C durante 120 minutos principalmente, figuras 6.2 y 6.3. En la figura 6.2a se representan las curvas esfuerzo-deformación en tracción para cables unifilares en estado de entrega tratados térmicamente en vacío. Se tiene que la reducción más significativa en las propiedades se presenta en el límite elástico del material, tal como se observa en el gráfico de barras de la figura 6.2b.

En lo referente a la resistencia mecánica, se observa una tendencia a la pérdida de resistencia con el aumento de temperatura y tiempo de exposición en la que existe una fluctuación llamativa, con pérdida de la resistencia hasta menos de la mitad ocurrida en la ya indicada condición de 800°C durante 120 minutos, en la que se da el fenómeno de fragilización observado cualitativamente en las preparaciones metalográficas, el cual produce dislocaciones intergranulares que disminuyen la resistencia.

La correlación entre los efectos microestructurales y la resistencia del material también se observa en los tratamientos a 1000°C en los que ha desaparecido el efecto de fragilización y la resistencia máxima se recupera, figura 6.2b.

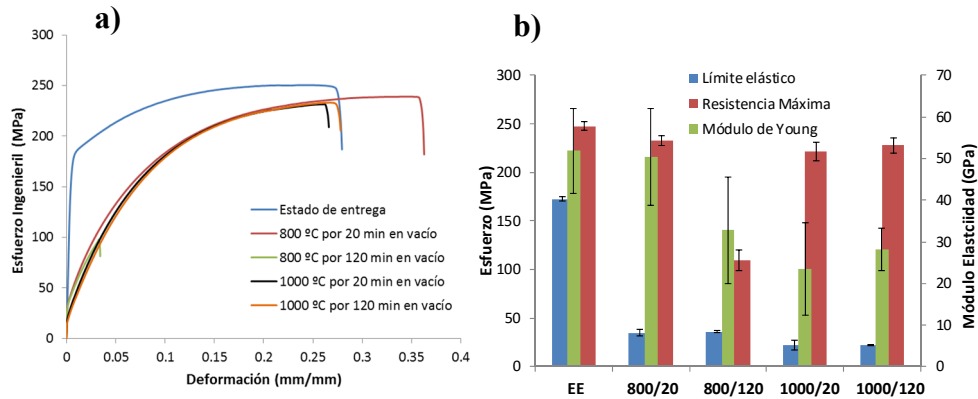


Figura 6.2 Comparativa de las propiedades mecánicas obtenidas en cables unifilares tratados en vacío
a) Curvas esfuerzo-deformación y **b)** Propiedades mecánicas

La microdureza del material de los cables unifilares tiene un comportamiento diferenciado entre la sección transversal y la longitudinal; esta última presenta menor dureza debido a la menor presencia de límites de granos y de maclas y a que el efecto de recocido es mayor en esta dirección. Esta circunstancia se observa claramente en la figura 6.3, en la que en la comparativa transversal versus longitudinal, en esta última se evidencia la caída de la dureza en las dos condiciones de tratamiento a 800°C, pero principalmente a 120 minutos. De esta forma, al igual que ocurriera con la resistencia máxima, la dureza se puede relacionar con los efectos de fragilización en borde de grano, al menos en lo referente a la sección longitudinal.

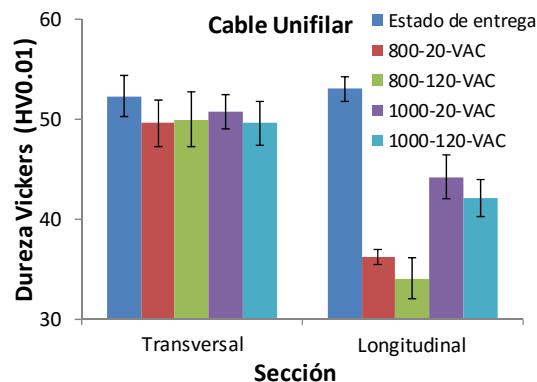


Figura 6.3 Comparativa de la dureza en cables unifilares tratados en vacío, tanto en la sección transversal del conductor como en la sección longitudinal

En el caso del cableado multifilar, la resistencia máxima se reduce con el tiempo y la temperatura; sin fluctuaciones o hechos significativos, más que el menor efecto sobre el límite elástico, figura 6.4.

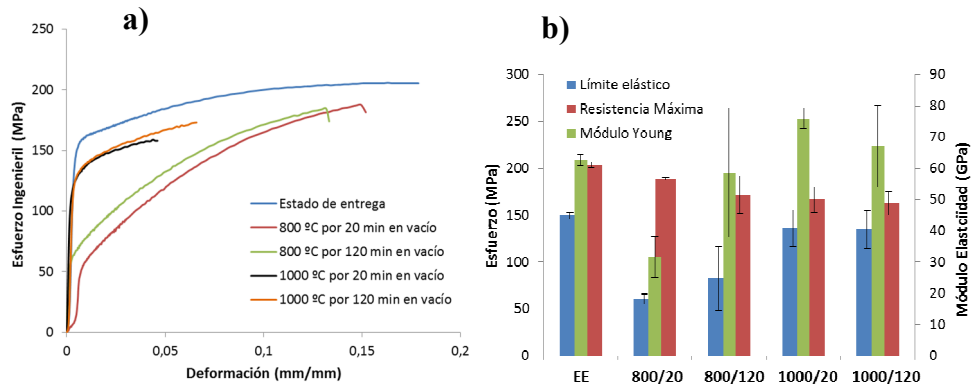


Figura 6.4 Comparativa de las propiedades mecánicas obtenidas en cables multifilares tratados en vacío a) Curvas esfuerzo-deformación y b) Propiedades mecánicas

Por su parte en los valores de dureza para el cableado multifilar tratado en vacío se vuelve a observar que a temperatura de 800°C existe una pérdida de dureza que se recupera a temperaturas de 1000°C, figura 6.5. Ello se corresponde bastante bien con lo ocurrido en el cableado unifilar en su sección longitudinal. Si bien no es coherente con la tendencia de la resistencia máxima, en la que en el cableado multifilar no se refleja la fragilización existente, tal y como se vio en las preparaciones metalográficas.

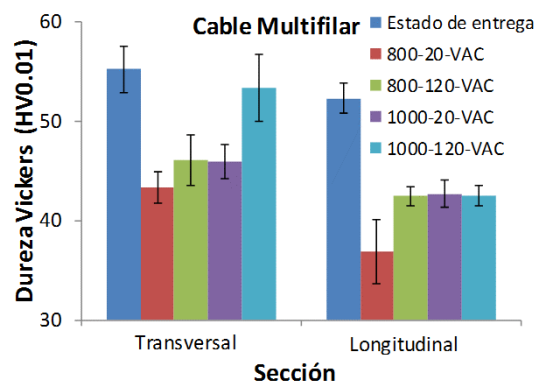


Figura 6.5 Comparativa de la dureza en cables multifilares tratados en vacío, tanto en la sección transversal del conductor como en la sección longitudinal

Así pues, en lo que respecta al cableado unifilar tratado sin atmósfera, a bajo vacío, es posible correlacionar la resistencia mecánica con la dureza medida en la sección longitudinal, en cierta forma el comportamiento mecánico del conductor tratado térmicamente sigue una misma tendencia, es decir, a medida que disminuye su resistencia mecánica tomando como referencia la resistencia máxima a tracción, disminuye la dureza. Claro está que fenómenos como la segregación en borde de grano afectan mucho más al comportamiento mecánico macroscópico que al obtenido a partir de ensayos de microdureza, ello explica por qué disminuye considerablemente la resistencia máxima del cable unifilar tratado en vacío a 800 °C durante 120 minutos, mientras que ésta disminución sólo es evidente en las mediciones de microdureza en la sección longitudinal del conductor.

Respecto a los valores obtenidos para el módulo elástico pueden servir a modo comparativo, y son un reflejo del estado de la estructura cristalina, pero no de la microestructura del conductor, de la cual sí dependen la dureza y la resistencia máxima, de interés para esta tesis. Las elevadas desviaciones observadas son un reflejo de las duras condiciones ambientales aplicadas y del comportamiento que el material puede tener.

6.1.2. Ensayos en aire estático

Se ensayaron los conductores a las mismas temperaturas y tiempos pero en aire estático; tras ello se observó el fenómeno de oxidación superficial, como era de esperar, dada la presencia oxígeno en el aire. En ningún caso se produjo la segregación en borde de grano y consecuente fragilización observada anteriormente, por lo que se plantea que efectivamente el efecto de succión de la atmósfera a bajo vacío tuvo cierta incidencia. Esta segregación no se produce ni si quiera con largos tiempos de procesado, 120 minutos, en una atmósfera con cierto contenido en oxígeno a 800 y 1000°C, figuras 5.10 y 5.11.

Como se evidencia en la figura 6.6, correspondiente a un cable unifilar tratado en aire a 800 °C durante 120 minutos, se produce una capa de óxido superficial de cierto espesor con una interfase o zona intermedia de abundante porosidad, que resta sección al conductor, del orden de 100 micras en este caso concreto, ello, de forma conjunta con el crecimiento de tamaño de grano asociado al tratamiento térmico, afecta a la resistencia del cable, tal y como se pudo comprobar en los ensayos de tracción, donde la resistencia y el límite elástico disminuyen de forma acusada y correlacionada con el crecimiento de la capa de óxido, figura 6.7.

Se incrementa la ductilidad en las muestras tratadas a 800 °C por el fenómeno de crecimiento de grano y la ausencia de fragilización por segregaciones en borde de grano, tal como se observa en las curvas de la figura 6.7a, mientras que a 1000 °C el deterioro por la oxidación superficial genera una reducción en la ductilidad y en las propiedades mecánicas de manera significativa, figura 6.7b. La oxidación superficial es mayor a más temperatura y tiempo de exposición, véanse microestructuras en las figuras 5.11 y 5.12, lo que produce reducción de sección efectiva del conductor que se refleja en la

pérdida de resistencia mecánica. Ello es visible al comparar la gráfica de tratamiento en vacío, figura 6.2b, frente a tratamiento al aire, figura 6.7b, donde se observa un descenso más acusado de la resistencia. Si bien en el caso de tratamiento al aire no existen efectos de fragilización por segregación en borde de grano.

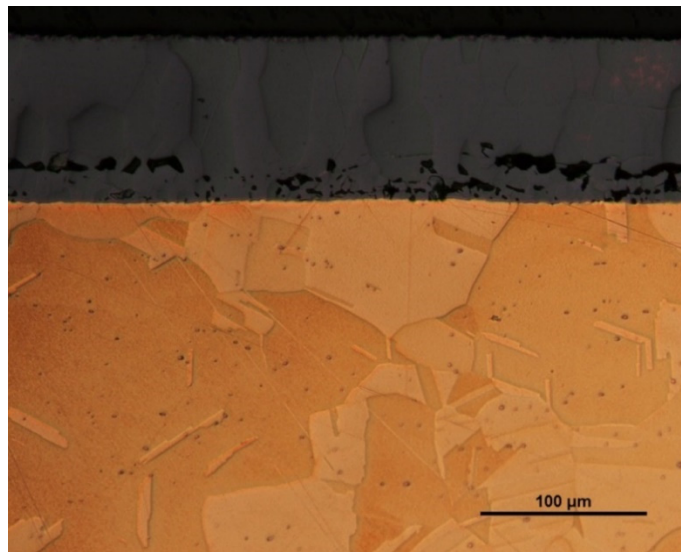


Figura 6.6 Detalle de la microestructura en la zona próxima a la superficie de un conductor unifilar tratado en aire estático a 800 °C durante 120 min (sección longitudinal a 200X)

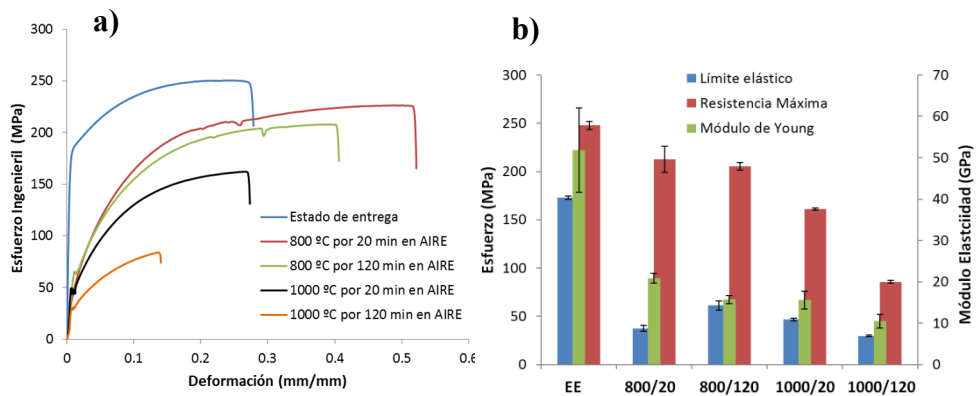


Figura 6.7 Comparativa de las propiedades mecánicas obtenidas en cables unifilares tratados en aire estático a) Curvas esfuerzo-deformación y b) Propiedades mecánicas

Cuando se correlaciona la dureza con la resistencia máxima en los conductores tratados al aire se tiene que aunque no se genera el fenómeno de fragilización por segregaciones en borde de grano, la degradación del conductor y la formación de óxido superficial hacen que disminuya considerablemente la resistencia pero con una menor disminución de la dureza, tal como se observa en la gráfica de la figura 6.8.

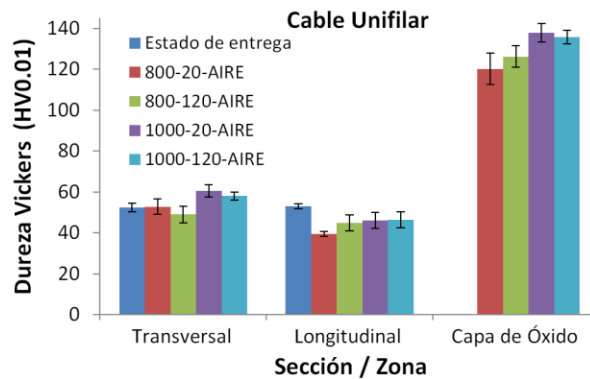


Figura 6.8 Comparativa de la dureza en cables unifilares tratados en aire estático, tanto en la sección transversal del conductor como en la sección longitudinal frente a la capa de óxido

En el caso de los conductores multifilares tratados al aire el grado de oxidación, y la consecuente disminución de sección efectiva del conductor, es mucho mayor, si bien en función de la temperatura y tiempo de exposición puede llegar a ser comparable con casos de incendio reales, como por ejemplo el expuesto en el CASO 2, donde se alcanzan espesores de capa de óxido de unas 100 micras, figura 6.9.

La figura 5.14 revela que el crecimiento de la capa de óxido está directamente relacionado con la temperatura, el tiempo de aplicación y la atmósfera en que se encuentra el material, en este caso aire estático, con cierta cantidad de oxígeno. La elevada oxidación impide la realización de ensayos de tracción a temperaturas de 1000°C, por lo que no se pueden obtener relaciones entre temperaturas, observándose similar tendencia a lo comprobado en el cableado unifilar, figura 6.10.

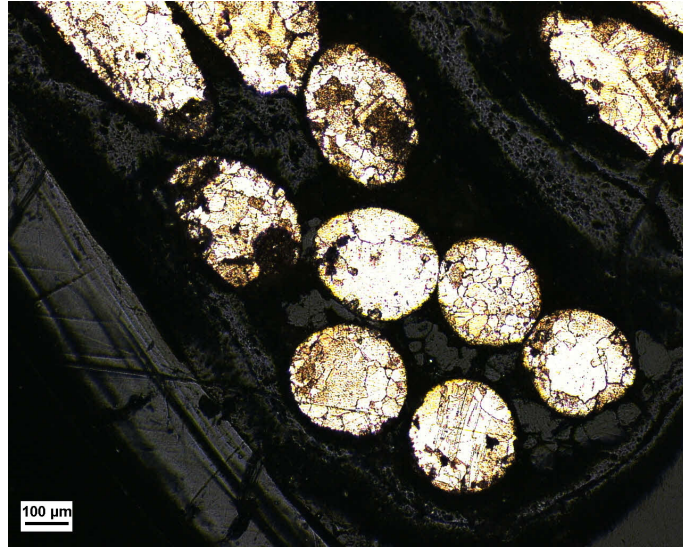


Figura 6.9 Microestructura metalográfica de los hilos procedentes del incendio real denominado CASO 2 (50X)

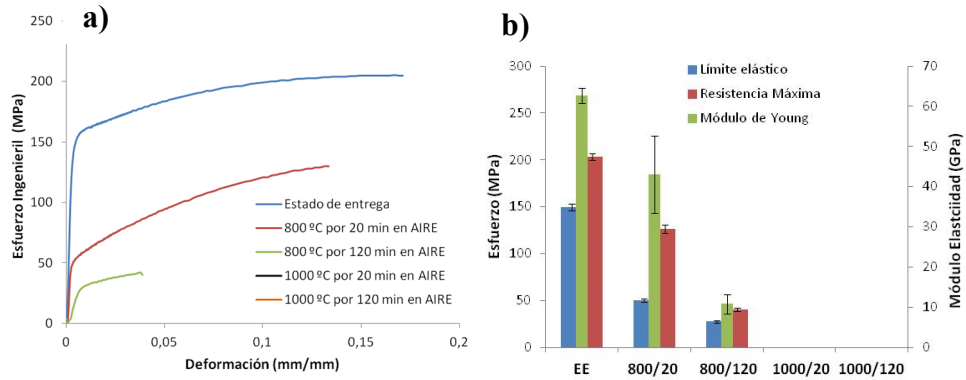


Figura 6.10 Comparativa de las propiedades mecánicas obtenidas en cables multifilares tratados en aire estático a) Curvas esfuerzo-deformación y b) Propiedades mecánicas

De igual forma los resultados obtenidos para la dureza son comparables a los obtenidos para cableado unifilar, comparar las figuras 6.11 y 6.8.

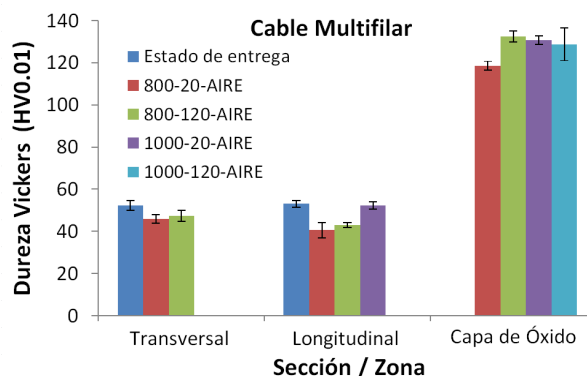


Figura 6.11 Comparativa de la dureza en cables multifilares tratados en aire estático, tanto en la sección transversal del conductor como en la sección longitudinal frente a la capa de óxido

6.1.3. Ensayos en secuencia de atmósferas de oxidación/reducción

Debido a la compleja dinámica del fuego en un incendio, se producen combinaciones de las atmósferas de gases presentes en el recinto o lugar donde se ha presentado el siniestro, por ello se ha realizado experimentación de combinaciones entre las atmósferas oxidantes y reductoras. Una secuencia de reducción y posterior oxidación simula la incidencia de llama en un primer momento y la aplicación de calor con atmósfera oxidante posteriormente, lo que se asemeja a las circunstancias que concurren en el punto de origen del incendio. Por otro lado una secuencia de oxidación y posterior reducción simula el acercamiento de las llamas con una primera incidencia de calor con atmósfera oxidante y posteriormente alcance de las llamas que definen la atmósfera reductora, lo que se asemeja a una afectación por alcance del fuego desde un punto alejado, no origen del incendio.

En los ensayos con la secuencia de oxidación/reducción, además del lógico crecimiento de tamaño de grano con la temperatura y el tiempo de aplicación, se ha observado en la microestructura la combinación de dos fenómenos muy concretos; uno es la fragilización por segregaciones en borde de grano en las muestras tratadas a 800 °C, y el otro es la reducción casi total del óxido superficial a cobre, en la cual quedan poros abundantes, tal como se observa en las figuras 5.24 y 5.25.

La segregación en el borde de grano en esta combinación de atmósferas se genera principalmente a temperaturas de 800°C y para los dos tiempos de aplicación, 20 y 120 minutos. Se considera que esta segregación es fruto de la secuencia de atmósferas planteadas, con una primera fase de atmósfera altamente oxidante en la que existe difusión de oxígeno al interior del conductor y formación de precipitado de Cu_2O , tal como se observara en las muestras tratadas a bajo vacío. La posterior atmósfera reductora del conductor tiene efectos principalmente superficiales, observándose la reducción de la capa de óxido formada y una escasa reducción hacia el interior, de unas 50 micras en el caso del 800-60O-60R. Esta fragilización desaparece en los tratamientos a 1000°C.

Por otra parte, la primera fase del procesado de los conductores produce una capa de óxido, que es reducida en la segunda, formando una interfase o zona intermedia con abundante porosidad. La capa reducida se asemeja en espesor a la capa previamente oxidada, observándose el crecimiento de la misma con la temperatura y el tiempo de exposición.

Ambos efectos, fragilización por segregación en borde de grano y oxidación superficial, de forma conjunta con el crecimiento de tamaño de grano, quedan reflejados en los ensayos de tracción y dureza, figuras 6.12 y 6.13 donde las propiedades mecánicas se ven empeoradas en comparación con sus propiedades en estado de entrega, o tratados en vacío. Como se puede observar la fragilización es particularmente relevante en los tratamientos a 800°C, y cuando ésta desaparece a los 1000°C, el efecto predominante es la oxidación y degradación superficial, que pese a que exista un proceso de oxidación secundario esta queda porosa con la consecuente merma en las propiedades mecánicas, figura 5.25d. El efecto no es tan acusado como en las muestras tratadas al aire ya que en este caso el proceso de oxidación se ve reducido a la mitad de tiempo.

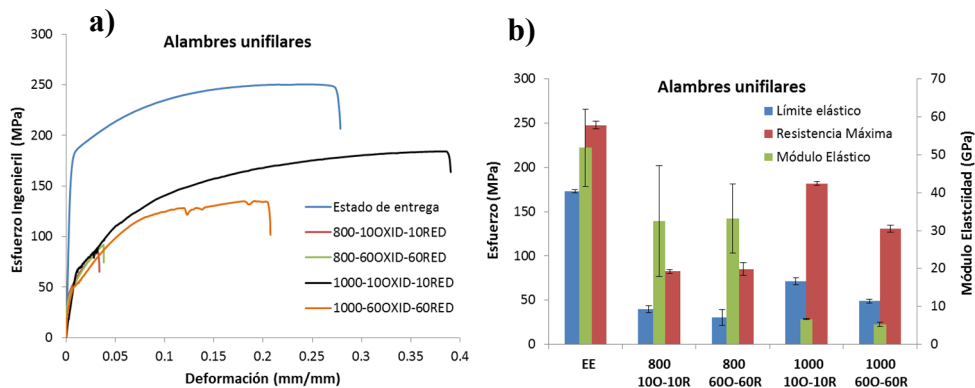


Figura 6.12 Comparativa de las propiedades mecánicas obtenidas en cables unifilares tratados en atmósferas combinadas de oxidación/reducción **a)** Curvas esfuerzo-deformación y **b)** Propiedades mecánicas

Respecto a la dureza de los alambres de cobre unifilares sometidos a secuencia de atmósferas de reducción/oxidación disminuyen muy ligeramente con la temperatura y el tiempo de tratamiento térmico, debido básicamente al efecto del aumento del tamaño de grano, siendo más evidente este comportamiento en la sección longitudinal, figura 6.13.

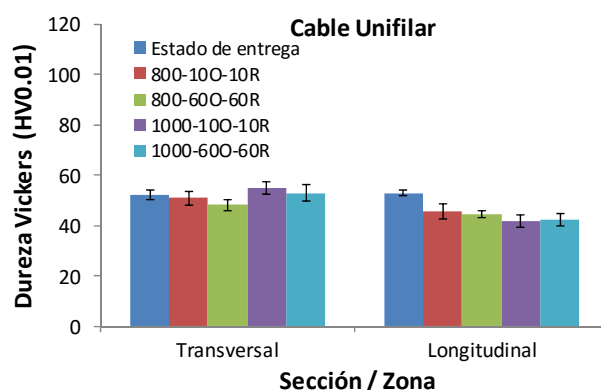


Figura 6.13 Comparativa de la dureza en cables unifilares tratados en atmósferas combinadas de oxidación/reducción, tanto en la sección transversal del conductor como en la sección longitudinal

Respecto a los conductores multifilares, la reducción de óxidos superficiales comprobada en las figuras 5.26 y 5.27, ha sido observada en algunos casos de incendios reales en los que los conductores se han visto afectados por el alcance de las llamas. Este efecto, además de la fragilización en borde de grano como la observada a 800°C, figura 5.27a, ha sido observado en algunos conductores del incendio expuesto en el CASO 5, figura 6.14.

Otro hecho observado para esta secuencia de oxidación/reducción, tanto experimentalmente como en casos reales, es que en los conductores multifilares en las fases iniciales del incendio se produce una capa de óxido que impide la formación de cuellos de sinterización o unión de los hilos en fases posteriores, tal y como se observa en la figura 5.26, donde este efecto se aprecia de forma exagerada por la reducción total del óxido periférico.

La figura 6.15 presenta conductores multifilares, propios del CASO 5, con evidentes deformaciones por elevadas temperaturas, estimadas del orden de los 1000°C que a pesar de ello no presentan cuellos de sinterización debido al efecto inicial de oxidación. Cabe destacar que en estos conductores multifilares del CASO 5 tampoco aparecen segregaciones en borde de grano, al igual que los tratados a 1000°C en secuencia de atmósferas oxidante/reductora, figuras 5.26 y 5.27.

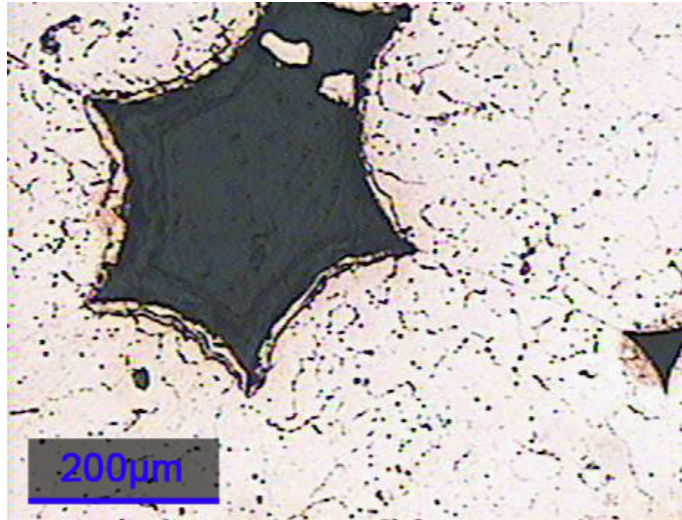


Figura 6.14 Microestructura de los hilos procedentes del incendio real denominado CASO 5 (200X), crecimiento de capa superficial de óxido reducido y fragilización en borde de grano



Figura 6.15 Microestructura de hilos procedentes del incendio real denominado CASO 5 (200X), ausencia de cuellos de sinterización

En lo referente a los conductores multifilares sometidos a secuencia de atmósferas de oxidación/reducción se comprueba una disminución muy acusada de las propiedades mecánicas en general, causada por las agresivas condiciones de oxidación y posterior reducción, figura 6.16. Para la condición de 800°C la reducción en la resistencia máxima es justificada por la fragilización observada en la microestructura de los conductores. A temperaturas superiores, de 1000°C, la oxidación del material y su posterior reducción produce porosidades que afectan notablemente a la resistencia mecánica, figuras 5.26 y 5.27.

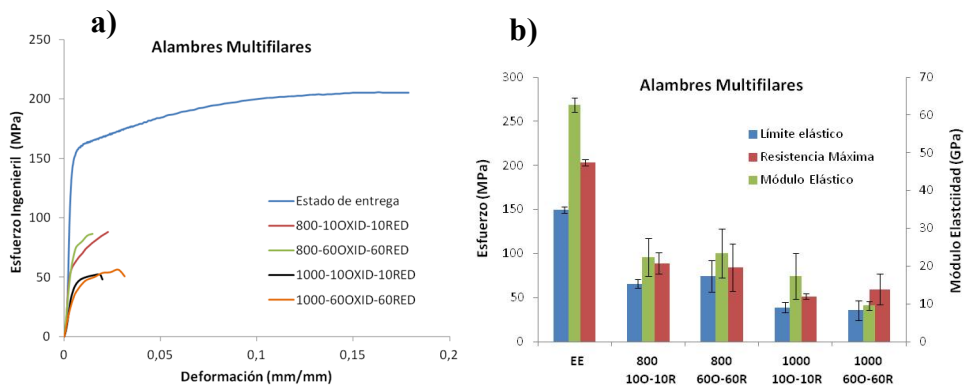


Figura 6.16 Comparativa de las propiedades mecánicas obtenidas en cables multifilares tratados en atmósferas combinadas de oxidación/reducción **a)** Curvas esfuerzo-deformación y **b)** Propiedades mecánicas

Respecto a la dureza en los conductores multifilares tratados en secuencia de atmósferas oxidación/reducción, el comportamiento es similar al observado para cableado unifilar, figura 6.17.

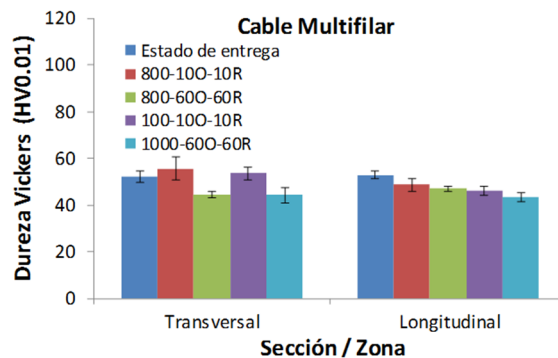


Figura 6.17 Comparativa de la dureza en cables multifilares tratados en atmósferas combinadas de oxidación/reducción, tanto en la sección transversal del conductor como en la sección longitudinal

6.1.4. Ensayos en secuencia de atmósferas de reducción/oxidación

En las muestras tratadas con la combinación de atmósferas de reducción/oxidación, se observó la presencia de las segregaciones en borde de grano principalmente en el tratamiento a 800-60R-60O, figura 5.17b. Para un menor tiempo de tratamiento, 800-10R-10O la fragilización solo alcanza la zona perimetral del conductor, en una profundidad de alrededor de 100 micras, por lo que se entiende que esta fragilización es debida a la difusión del hidrógeno de la atmósfera reductora en la primera fase del tratamiento y se vio limitada por el tiempo de exposición, figura 5.17a. A tiempos prolongados esta fragilización invade la totalidad del conductor unifilar, achacándose este efecto a una mayor difusión de hidrógeno en el material durante la primera fase de atmósfera reductora, si bien no se puede descartar la ocurrencia simultánea con el efecto de precipitación de Cu_2O en borde de grano observado en los ensayos a bajo vacío. Para la condición de 1000°C el efecto no es tan llamativo o intenso, pero perdura, si bien en ambos casos la condición final de atmósfera oxidante produce la inclusión de óxido en el interior del material como se observa en la figura 5.18b. Este efecto se puede comprobar en el caso real expuesto en el CASO 2, figuras 5.49 y 5.50.

Estos efectos de fragilización descritos se correlacionan completamente con los resultados de los ensayos de tracción, observándose pérdidas significativas en la resistencia para la condición de 800-60R-60O, que se mantienen para los tratamientos a 1000°C, en los que pese a no existir un efecto intenso de fragilización sí que existe una oxidación superficial que afecta a las propiedades mecánicas del conductor, figura 6.18.

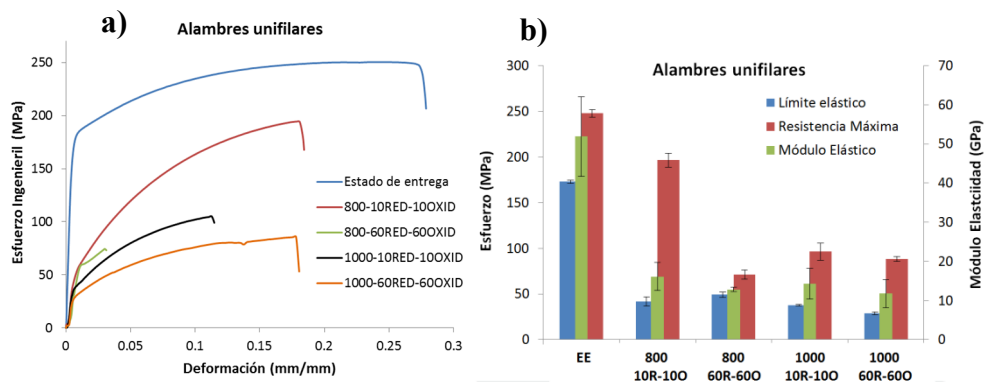


Figura 6.18 Comparativa de las propiedades mecánicas obtenidas en cables unifilares tratados en atmósferas combinadas de reducción/oxidación **a)** Curvas esfuerzo-deformación y **b)** Propiedades mecánicas

La mayor pérdida en las propiedades mecánicas se evidencia en el límite elástico, sobre todo en las muestras tratadas a 800 °C, debido al crecimiento del tamaño de grano y a

la fragilización derivada de la secuencia de atmósferas, tal y como se observó mediante microscopía.

La dureza de los alambres de cobre unifilares disminuye ligeramente con los tratamientos térmicos, debido básicamente al efecto del aumento del tamaño de grano y a la fragilidad por segregaciones en borde de grano, siendo más evidente este comportamiento en la sección longitudinal debido a la menor presencia de bordes de grano y a que el efecto de recocido es mayor en esta dirección, figura 6.19. Al comparar los resultados de dureza en la sección longitudinal con la resistencia mecánica a la tracción se observa una buena correlación, comparar figuras 6.19 y 6.18b.

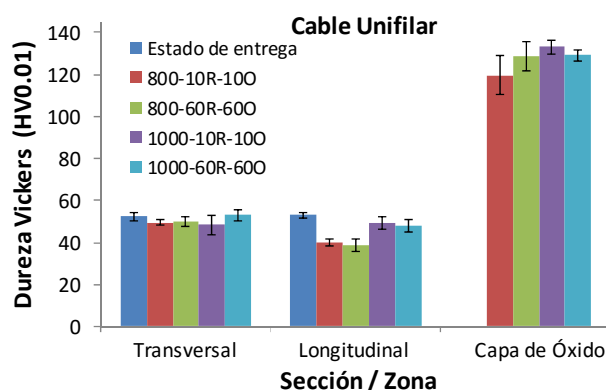


Figura 6.19 Comparativa de la dureza en cables unifilares tratados en atmósferas combinadas de reducción/oxidación, tanto en la sección transversal del conductor como en la sección longitudinal y la capa de óxido formada en la etapa final

La formación de la capa de óxido en la etapa final de la atmósfera oxidante tiene un crecimiento proporcional al tiempo de tratamiento térmico bajo ella, figura 5.21a. La dureza de la capa de óxido formada en las muestras longitudinales y transversales tiene valores similares, figura 6.19.

En el cableado multifilar al existir una reducción y posteriormente una oxidación puede darse la sinterización de los hilos si se alcanzan temperaturas suficientes en las primeras fases del incendio. En este caso los cuellos de sinterización formados, figura 5.19, no evidencian inclusiones intermedias de óxido, sino que éste se distribuye en el perímetro de la unión. Este hecho es revelador de la secuencia de condiciones ambientales soportada por el conductor, reducción/oxidación. Este efecto pudo observarse en alguna de las preparaciones realizadas del cableado del caso real de incendio CASO 5, figura 6.20. En esta micrografía se evidencia la formación de cuellos de sinterización y la capa de oxidación final que no ocupa la zona sinterizada, así como fragilización por hidrógeno como consecuencia de la previa atmósfera reductora y posterior oxidante.

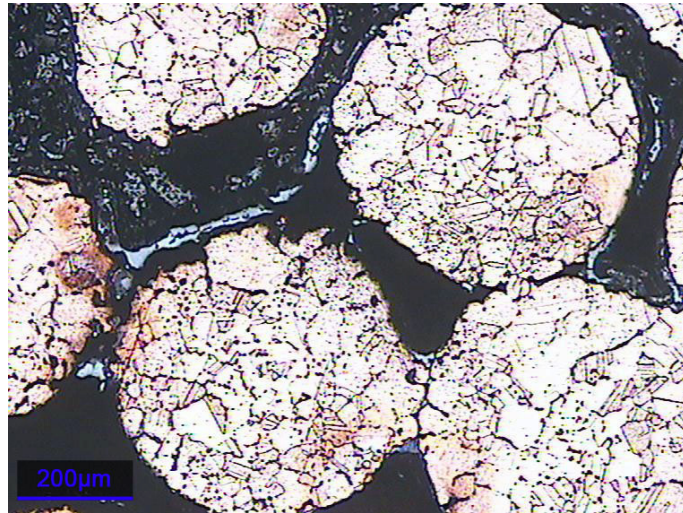


Figura 6.20 Microestructura de hilos procedentes del incendio real denominado CASO 5 (200X)

En el caso de los conductores multifilares, presentan una degradación total debido a la oxidación de casi todo el cobre que constituye el cable, por lo que no fue posible determinar las propiedades a tracción, figura 6.21. Respecto a las medidas de dureza no se observan variaciones muy significativas con respecto a lo indicado para el cableado unifilar.

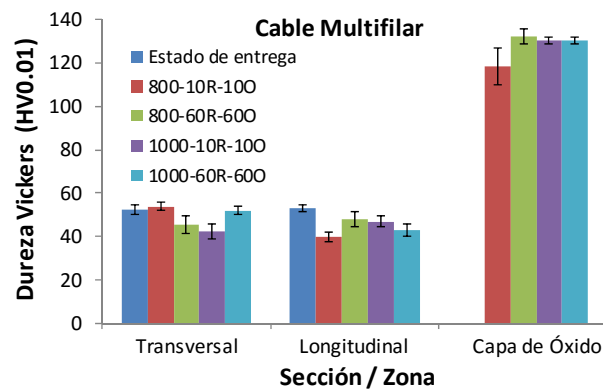


Figura 6.21 Comparativa de la dureza en cables multifilares tratados en atmósferas combinadas de reducción/oxidación, tanto en la sección transversal del conductor como en la sección longitudinal y la capa de óxido formada en la etapa final

6.1.5. Resumen

A modo de resumen de este apartado, se han comprobado los efectos de la temperatura, tiempo de aplicación y atmósferas sobre los conductores de cobre. Se ha observado que la temperatura y el tiempo de exposición afectan a las propiedades mecánicas del material produciendo una merma en ellas principalmente por medio del crecimiento de tamaño de grano.

Además de este crecimiento de tamaño de grano se han observado otros efectos que añaden efectos adicionales de deterioro visibles en las propiedades mecánicas y microestructurales. Como son; la segregación de precipitado de Cu_2O en borde grano (debida al contenido de oxígeno propio o adquirido por difusión desde la atmósfera circundante), la fragilización por hidrógeno (debida a la difusión de éste desde la atmósfera circundante) o la formación de óxidos o capas reducidas en la superficie del conductor (derivadas de la secuencia de atmósferas circundantes).

Se ha comprobado, por medio de los efectos que tiene sobre la microestructura y propiedades mecánicas, la existencia de difusión de gases propios de la atmósfera circundante sobre los conductores de cobre. Este efecto de difusión aumenta con la temperatura y el tiempo de exposición, así como con la presión del gas o atmósfera aplicada.

Sobre la superficie de los conductores se ha observado efectos de oxidación y reducción que son función de la temperatura, tiempo de aplicación y atmósfera, y que reducen las propiedades mecánicas del material, si bien la observación más importante es que el aspecto superficial puede revelar la secuencia de atmósferas que ha sufrido un conductor determinado. Particularmente, en el caso de cableado multifilar se observa la formación de cuellos de sinterización para secuencias de reducción/oxidación (propias de la localización del origen del incendio) y no para secuencias de oxidación/reducción (propias de la afectación de las llamas por alcance).

Los diferentes efectos microestructurales observados, consecuencia de las variables aplicadas (temperatura, tiempo y atmósfera), encuentran cierta correlación con las propiedades mecánicas ensayadas, particularmente con la resistencia mecánica. Esta resistencia mecánica puede correlacionarse además con la microdureza, siempre y cuando:

- La microdureza sea ensayada sobre corte longitudinal del conductor y no sobre el transversal, ya que existe un comportamiento diferente debido a la morfología alargada en la dirección del trefilado de los granos en el conductor.
- Se consideren los efectos que sobre la resistencia mecánica tiene la degradación superficial o exterior del material, como por ejemplo la oxidación y reducción de la superficie, lo cual resta sección efectiva.

En la gran mayoría de restos extraídos de incendios reales, no es posible realizar ensayos de tracción del material si bien sí pudieran realizarse medidas de microdureza en corte longitudinal del conductor, por lo que teniendo en cuenta el resto de efectos descritos pudiera tenerse una aproximación a las propiedades mecánicas del conductor, y

en cualquier caso, de forma conjunta con el crecimiento de tamaño de grano o aspecto microestructural, una aproximación a la temperatura, tiempos y atmósfera soportadas.

En el caso de incendios reales se observa la existencia de gran cantidad de estos efectos, si bien no existe control alguno sobre las temperaturas o secuencia de atmósferas aplicadas, lo que dificulta enormemente la obtención de conclusiones.

6.2. Influencia de arcos eléctricos, producto de cortocircuitos primarios y secundarios simulados en condiciones controladas, en la microestructura de los conductores de cobre

En el presente apartado se expone el análisis de resultados realizado sobre los efectos que causan los arcos eléctricos propios de cortocircuitos en la microestructura de los conductores eléctricos, con especial atención a los efectos producidos en la zona de afectación por altas temperaturas y fusión de cobre, y el efecto de la secuencia de las atmósferas previstas.

6.2.1. Cortocircuitos al aire

Para los ensayos experimentales de cortocircuitos, inicialmente se realizaron ensayos de cortocircuitos al aire, sin aplicación de condiciones térmicas específicas o secuencias atmosféricas concretas más que las condiciones ambientales de laboratorio, de 20°C y aire, generándose el cortocircuito para comprobar el comportamiento del material en comparación con los conductores en estado de entrega.

En este ensayo se observó en primer lugar la afectación térmica superficial del conductor en un punto concreto a consecuencia del arco eléctrico producido, el cual desarrolla temperaturas instantáneas muy elevadas y locales. Se produce la fusión superficial del material y penetración de ésta en el mismo. Esta fusión presenta gran cantidad de poros de tamaño irregular al verse atrapados los gases circundantes durante la solidificación y el rápido enfriamiento de la colada, figura 6.22.

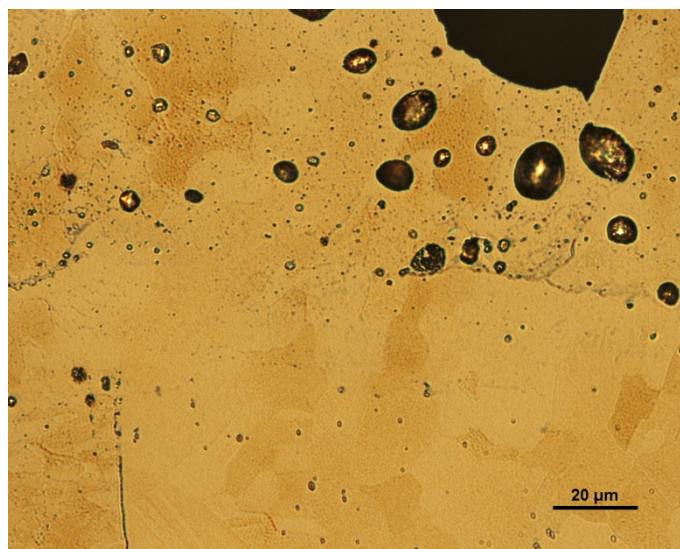


Figura 6.22 Micrografía de conductor multifilar cortocircuitado al aire, sección transversal (500X)

Las altas temperaturas producen en la zona de afectación cierto crecimiento de tamaño de grano, con crecimiento columnar en dirección al gradiente térmico de enfriamiento. Observándose también la formación del eutéctico Cu-O de forma muy leve y sutil, casi inapreciable, en algunos puntos de la fusión del cableado multifilar, identificando necesariamente la absorción de oxígeno ambiental hasta concentraciones superiores al 0.075% y el desarrollo de temperaturas superiores a los 1065°C, figura 6.22.

Es decir, se observa por medio de este ensayo que la existencia de un cortocircuito afecta al material sobre el que ocurre tanto por medio de los efectos térmicos locales como por medio de los efectos atmosféricos, con cierta incorporación de oxígeno ambiental al conductor, aunque muy leve.

6.2.2. Cortocircuitos primarios

En las preparaciones realizadas de cortocircuitos primarios simulados de forma experimental se ha observado en la zona de material fundido, zona de cortocircuito, la fusión parcial del cobre en la zona afectada, con la formación de gran cantidad de porosidades, tal como se observó principalmente sobre el cableado multifilar, figuras 5.32 y 5.33. Esta secuencia de cortocircuito primario afectada posteriormente por atmósferas de reducción y posterior oxidación es muy similar a la secuencia de reducción y oxidación ensayada tanto en cableado unifilar como en multifilar, si bien los efectos térmicos iniciales en la zona del cortocircuito tienen su particular incidencia, tanto en la formación de los poros mencionados como en una mayor difusión de los gases atmosféricos, con el consecuente efecto en la microestructura.

Es decir, para un cortocircuito primario, inmediatamente tras el mismo existe una atmósfera reductora, con lo que se produce un alto grado de fragilización por hidrógeno de forma local por que el aumento de la temperatura también es local a consecuencia del arco eléctrico. Es decir que la difusión de gases es potenciada por la ocurrencia del cortocircuito, este efecto es particularmente llamativo en los conductores unifilares ensayados, figuras 5.32a y 5.33a.

En referencia a gases existentes en el momento en que ocurre el cortocircuito primario, en los ensayos realizados no se ha detectado la formación de eutéctico o formaciones de óxido interiores en la masa fundida, dadas las condiciones atmosféricas reductoras existentes de forma inmediata tras la fusión del cobre.

La aplicación de un cortocircuito sostenido, provocando una situación de sobreintensidad produjo un incremento o exacerbación de los efectos observados sin denotar grandes cambios cualitativos.

En el conductor multifilar se observa la formación de cuellos de sinterización, hecho significativo de las altas temperaturas y secuencia de atmósferas aplicadas.

Así pues, en un cortocircuito primario obtenemos microestructuras limpias de oxígeno en el interior de la masa fundida que en cualquier caso se ven afectadas por éste en fases posteriores a la fusión y siempre de forma superficial, pudiendo afectar al interior por penetración desde la superficie. Este tipo de microestructura ha sido encontrada en diversos casos reales de incendio, como pueden ser el CASO 4 y el CASO 5.

En el CASO 4 se observó, en el corte transversal de la muestra A1, figura 5.68, diferentes zonas externas perimetrales con presencia de eutéctico Cu-O fruto de la incorporación de oxígeno a la fusión, y otras zonas internas, detalladas en la figura 6.23, que se corresponden con material fundido, con elevada porosidad irregular, pero sin ninguna formación de óxidos ni transformación eutéctica, lo cual es indicativo de una atmósfera limpia y principalmente reductora. Es decir, esta fusión del conductor se produjo en presencia de una atmósfera reductora, sin una oxidación previa, sufriendo el cableado oxidaciones posteriores en zonas periféricas, lo cual evidencia la existencia de una secuencia de reducción/oxidación típica de cortocircuitos primarios.

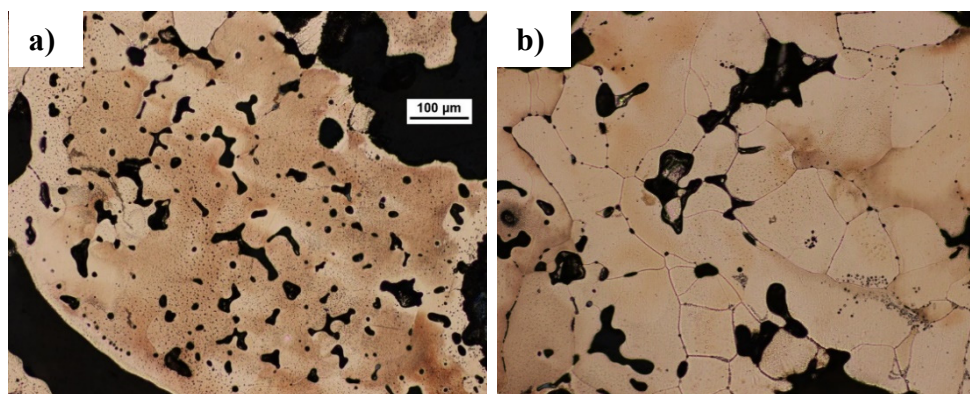


Figura 6.23 Corte transversal de la pegadura de la muestra A1 **a)** detalle de una zona interior del conductor fundido sin indicios de oxidación en borde de grano (100X) **b)** otra zona limpia en la zona fundida (100X)

En el mismo CASO 4, la muestra A2, figura 5.69, en su corte longitudinal muestra dos hilos unidos entre sí por fusión, presentando algunas zonas similares efectos térmicos con granos redondeados e importante porosidad y un borde de grano muy limpio indicativo de la fusión del material antes de verse sometido a una atmósfera oxidante, lo cual correspondería con un cortocircuito primario, figura 6.24.

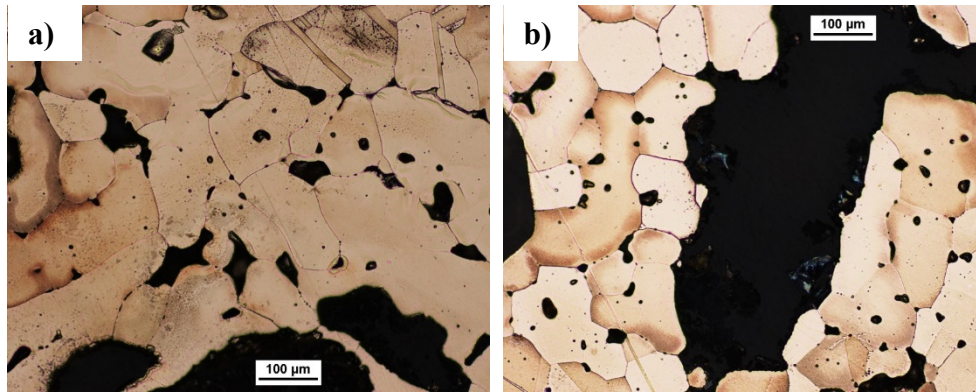


Figura 6.24 Corte longitudinal de la muestra A2 **a)** detalle de parte del conductor fundido con borde de grano limpio, exento de oxidación (100X) **b)** detalle de otra zona, con gran cantidad de poros de diferentes tamaños (100X)

En el CASO 5, el corte A de la Muestra 3, presenta de igual forma una microestructura de hilos muy limpia, con material fundido que afecta a la superficie del conductor, figura 5.79a, si bien con varios de los hilos implicados. El material de colada presenta una gran e irregular porosidad con formas claramente direccionadas en dirección de evacuación de los gases, figura 5.79b. También aparecen granos columnares en la misma dirección. El material fundido no muestra ningún tipo de oxidación interior o formación de estructura eutéctica por reacción con oxígeno, lo que corresponde perfectamente a la formación de una fusión primaria por cortocircuito eléctrico, figura 5.80.

6.2.3. Cortocircuitos secundarios

En el caso de las preparaciones realizadas de cortocircuitos secundarios simulados, los cuales son una consecuencia del incendio, se observa claramente la zona afectada por el arco eléctrico y altas temperaturas de forma puntual produciendo la fusión del material en el que aparece también una elevada porosidad, figura 5.37. En este caso de cortocircuito secundario, al invertir la secuencia de atmósfera de aplicación y no comenzar con una atmósfera reductora tras el cortocircuito, se observa menor efecto de fragilización en borde de grano por hidrógeno. En cambio, al existir una previa oxidación y posterior cortocircuito, que desarrolla temperaturas de varios miles de grados, se produce la fusión tanto del cobre como del óxido formado, viéndose incluido éste en la pegadura o zonas fundidas. En el cableado unifilar quedan en la zona fundida algunos restos de óxido, figura 5.38b; en los conductores multifilares la fusión ha sido mayor y se presentan dendritas primarias de eutéctico Cu-O. Esta inclusión del oxígeno en el interior del material, alcanzándose la formación eutéctica es indicativa de la secuencia de acontecimientos; es decir que en primer término ocurrió una oxidación y con poste-

rioridad la inclusión de la misma en la masa fundida, para acabar con una reducción superficial que reduce la capa de óxido superficial, pero no la masa interior; todo ello indica la existencia de un cortocircuito secundario provocado por alcance de las llamas.

Los efectos observados fueron confirmados al someter a cortocircuito secundario sostenido a una muestra de conductor unifilar, en la que se observó un gran crecimiento de estructuras dendríticas y eutéctico a consecuencia de la oxidación previa sufrida.

Esta microestructura en conductores de cobre cortocircuitado se ha comprobado en diferentes ocasiones, como por ejemplo en el caso de incendio real CASO 3.

En el CASO 3, las micrografías que se muestran de ambos cortes 1 y 2 presentan similares efectos a los observados en la secuencia de cortocircuitos secundarios, observándose en ambos cortes la formación de microestructuras dendríticas y gran profusión de eutéctico Cu-O, figura 6.25. Al tiempo se comprueba la ausencia de oxidaciones superficiales ya que estas aparecen incluidas en la perla de fusión. Es decir que el óxido superficial creado en la primera fase del incendio sobre el cableado fundió sobre el mismo en fases posteriores a consecuencia de elevadas temperaturas superiores a los 1065°C, como son las de un cortocircuito.

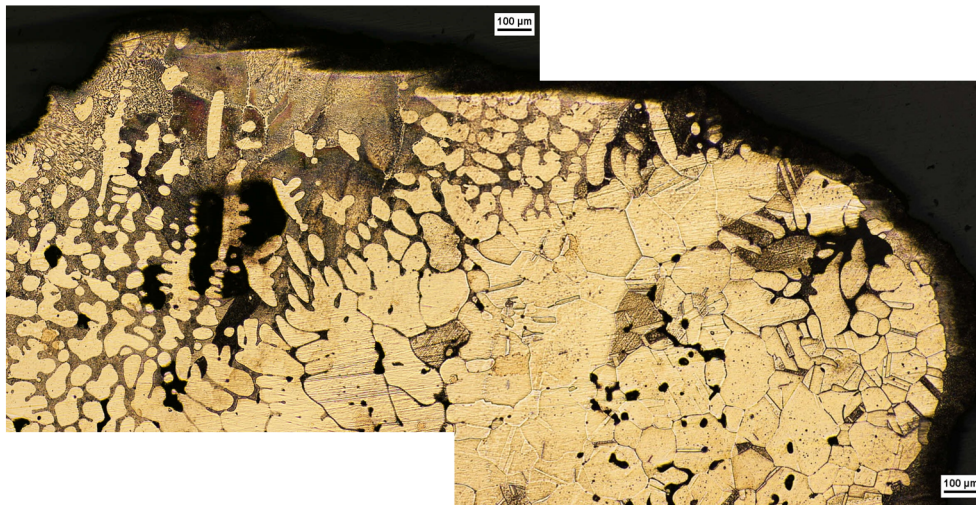


Figura 6.25 Microestructura de otra zona del corte transversal del Cobre 1 del CASO 3, formación del eutéctico Cu-O y estructura dendrítica de colada (50X)

6.2.4. Resumen

Así pues el estudio realizado ha demostrado que la ocurrencia de un cortocircuito produce temperaturas muy elevadas de forma local que generan fusiones del material afectado, formando porosidad de muy diverso tamaño, crecimiento de tamaño de grano en la zona afectada por calor y una masa fundida que incorpora los productos propios de la superficie del conductor y de la atmósfera en que ocurre.

La absorción de gases atmosféricos no es especialmente intensa a consecuencia del cortocircuito, ya que este, pese a desarrollar temperaturas muy elevadas y tener cierto efecto, ocurre en un corto lapso de tiempo. La absorción es mayor en fases posteriores en las que el conductor es afectado por el calor o las llamas.

La incorporación de gases en la masa fundida por un cortocircuito producirá, en el caso de una atmósfera oxidante la formación de microestructuras eutécticas de Cu-O, y en el caso de una atmósfera reductora una estructura más limpia y tendente a la fragilización en borde de grano.

De igual manera, el estudio realizado revela que la secuencia atmosférica aplicada al conductor revela diferencias microestructurales que pueden servir para discriminar entre cortocircuitos de origen primario y secundario.; son particularmente útiles los efectos secuenciales de oxidación y reducción, bien sobre la superficie de los conductores o mediante la comprobación de formación de cuellos de sinterización en conductores multifilares.

Así pues, los cortocircuitos primarios son asociados a formaciones de colada limpias y carentes de restos de oxígeno incorporado en el interior del material fundido. En el caso de cortocircuitos secundarios, en orden a la secuencia de atmósferas existente, se produce aporte de oxígeno atmosférico al conductor calentado por el alcance del incendio, lo cual produce notables efectos sobre la microestructura con formaciones eutécticas Cu-O.

La complejidad radica en que las variables que gobiernan un incendio si bien pueden asemejarse a las experimentadas, son prácticamente imprevisibles, no solo por la secuencia de los eventos, sino por las variaciones en la temperatura o composición química de las atmósferas existentes, es decir, que en ningún caso existirán condiciones tan controladas como las utilizadas en laboratorio. No en vano se considera que las pautas utilizadas aportan datos de interés a tener en cuenta de cara a futuros análisis de muestras extraídas de incendios reales.

6.3. Estudio del cableado extraído de incendios reales

En el presente apartado se expone el análisis de resultados del estudio realizado sobre los conductores obtenidos de incendios reales, entre los cuales existen tanto efectos propios del incendio y de sus condiciones ambientales como los propios ocurridos por cortocircuito.

6.3.1. Análisis del CASO 1

En este CASO 1, se comprueba que la microestructura de los conductores se corresponde con hilos que han sufrido un escaso efecto térmico, existiendo únicamente un ligero engrosamiento de grano desigual entre hilos que es achacable al efecto térmico generado durante el uso o actividad cotidiana del conductor.

El efecto del fuego sobre estos conductores fue muy poco relevante tal y como muestran los hilos no activos que presentan un tamaño de grano muy fino como corresponde al estado inicial de los cables de cobre para fines eléctricos, comparables al estado del cableado ensayado en estado de entrega.

La afectación superficial que se observa, con su aislante parcialmente calcinado indica un tiempo muy corto de permanencia a elevadas temperaturas, ya que no se aprecia ningún indicio de recristalización, figura 6.26.

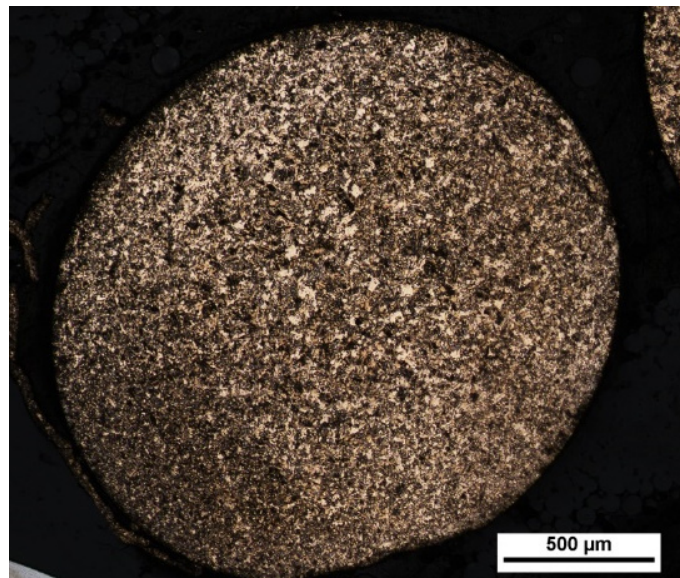


Figura 6.26 Microestructura del corte transversal de la Muestra 2 del CASO 2, hilo 3 no activo (50X)

6.3.2. Análisis del CASO 2

En el CASO 2 no se observan indicios de calentamiento del material desde el interior, ni fusiones desde el exterior, tan sólo cabe señalar la fuerte oxidación superficial de los hilos con difusión del oxígeno hacia el interior a través del borde de grano y la formación de segregaciones en borde de grano mediante fragilización por hidrógeno.

La microestructura presenta un fuerte engrosamiento de grano, sólo bloqueado por la oxidación del borde de grano. Este engrosamiento se produce al verse sometido el material a temperaturas entre los 850 y 900°C. No obstante, no se aprecia en ningún caso efectos de formación de cuellos por sinterización, ésta pudo estar bloqueada inicialmente por la oxidación superficial de los hilos, figura 6.27.



Figura 6.27 Microestructura del corte 1 de la muestra analizada en el CASO 2 (50X)

6.3.3. Análisis del CASO 3

En este CASO 3, se halló formación de una microestructura con un elevado contenido en eutéctico Cu-O que evidenciaba una secuencia con una primera fase de importante oxidación en la que se forma el óxido superficial del hilo y posterior fusión del material por efecto de cortocircuito, muy probablemente dentro de una atmósfera fuertemente oxidante como sucede en el frente de llama, figuras 6.28 y 6.29. Con posterioridad, y una vez solidificado el material, el conductor se vio sometido a una atmósfera reductora, como resulta del interior de llama, provocando la reducción del óxido formado en el borde de grano del conductor, y con ello su fragilización por hidrógeno, así como la

eliminación de la oxidación de la superficie. Esta es la razón por la que esta superficie se presenta limpia, dentro del deterioro apreciable en la misma. Los efectos observados en cualquier caso son claramente consecuencia de un cortocircuito secundario por alcance de las llamas, siendo el resultado microestructural muy semejante al observado en el apartado 5.3.3, figura 5.41.

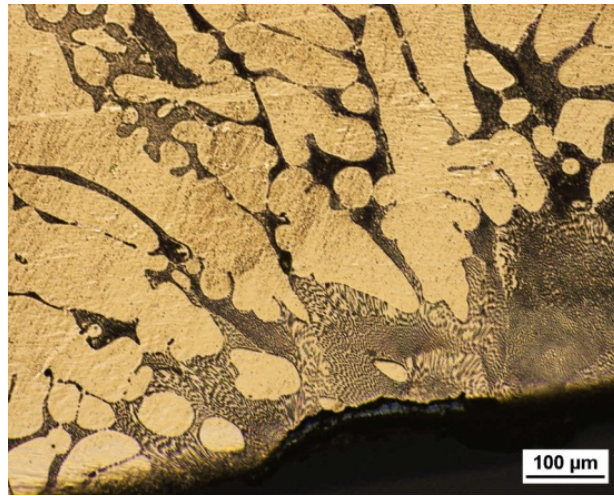


Figura 6.28 Microestructura del corte transversal del Cobre 1 del CASO 3, detalle del eutéctico Cu-O y difusión del oxígeno en las zonas interdendríticas (100X)

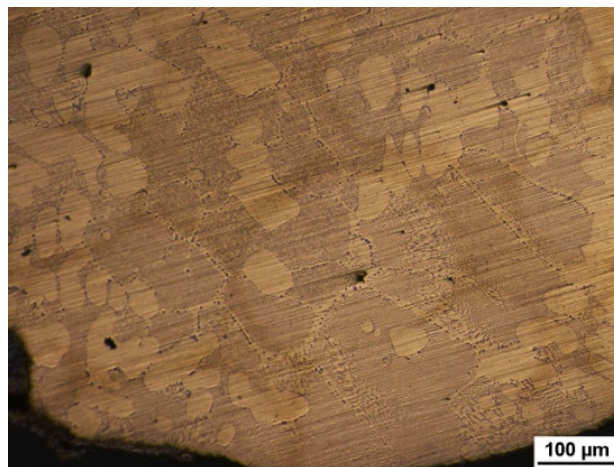


Figura 6.29 Microestructura en el corte transversal del Cobre 2 del CASO 3, detalle del eutéctico Cu-O (100X)

6.3.4. Análisis del CASO 4

En el caso real CASO 4, en las tres muestras se aprecia la formación de eutéctico en la superficie de las pegaduras con una baja extensión de esa formación tanto en su penetración en las zonas fundidas como en la extensión de la misma en los granos solidificados, figura 6.30.

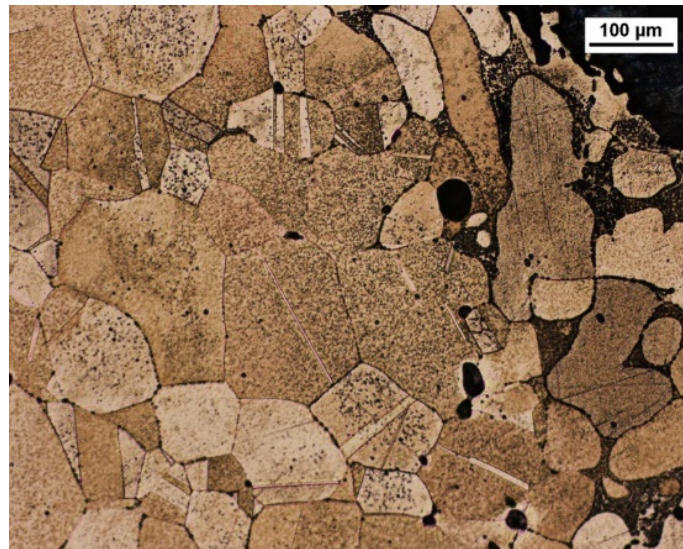


Figura 6.30 Corte longitudinal de la pegadura de la Muestra A1 del CASO 4, detalle de la microestructura en la unión del conductor con la zona fundida, se aprecia la formación de eutéctico en el borde de los granos fundidos que se detiene en la línea de poros que divide el sólido de la zona de fusión (100X)

En todas las muestras han aparecido zonas de solidificación con formación de porosidad irregular y acumulación de ésta en borde de grano lo que sucede en los casos de solidificación en ausencia de atmósferas especialmente oxidantes. Las fusiones se produjeron en atmósfera reductora de lo que se deduce la existencia de cortocircuitos primarios. De todos modos el material en general se ha visto sometido a atmósferas reductoras, como las correspondientes al interior de la llama, que ha reducido la posible oxidación superficial dejando en parte la penetración del oxígeno a través del borde de grano del material metálico restante.

Otras zonas de los conductores analizados presentaron inclusión de eutéctico Cu-O en borde de grano lo que indica fusiones en contacto con una atmósfera oxidante y por lo tanto la existencia de un posible cortocircuito secundario, figura 6.31.

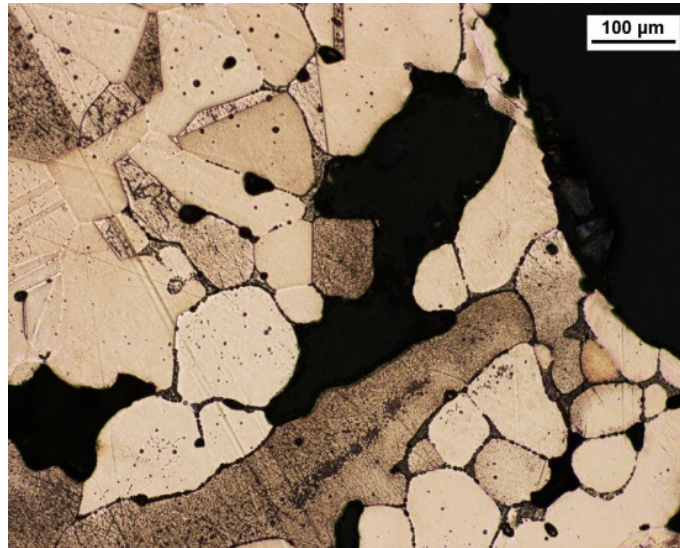


Figura 6.31 Detalle del corte transversal de la muestra A2 del CASO 4, aparecen pequeñas cantidades de transformación eutéctica Cu-O (100X)

Así pues, en el CASO 4, en los tres cables analizados, se hallaron indicios de cortocircuitos primarios y secundarios que bien pudieran corresponder al inicio del fuego y por tanto a la posible causa del mismo.

6.3.5. Análisis del CASO 5

En este CASO 5, se tienen varios conductores en los que de nuevo se observan efectos muy variados, como por ejemplo en el Corte A de la Muestra 1, donde se observa la formación de eutéctico en el borde de grano que refleja una previa oxidación con una posterior fusión del material a elevadas temperaturas, indicando la existencia de un cortocircuito de carácter secundario, figura 6.32. Las atmósferas reductoras finales provocaron además fragilización en borde de grano.

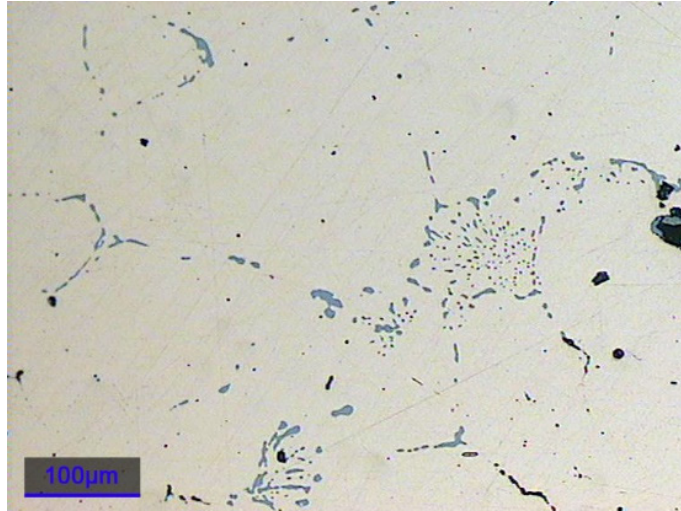


Figura 6.32 Microestructura del Corte A de la Muestra 1 del CASO 5, corte transversal de la fusión, detalle de la distribución de óxidos en bordes de grano (100X)

En la Muestra 2 existen fusiones con gran porosidad característica de arcos eléctricos y rápida solidificación, si bien con inclusiones de oxido que revelan la previa existencia de una atmósfera oxidante, secuencia que representa un cortocircuito secundario, figura 6.33.

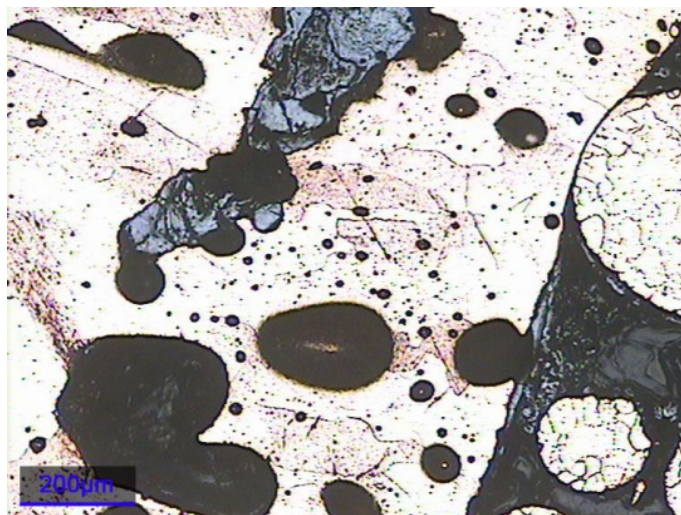


Figura 6.33 Microestructura de la zona fundida de la Muestra 2 del CASO 5 (50X)

Finalmente la Muestra 3 presenta una microestructura diferente, con gran porosidad en forma de sopladuras con dirección hacia el exterior del conductor y la formación de granos columnares que se forman en la misma dirección de evacuación de los gases y del gradiente térmico de enfriamiento. El material de colada está completamente exento de formación de estructuras oxidadas, lo que corresponde perfectamente a la formación de una fusión consecuencia de un cortocircuito primario, figuras 5.79 y 5.80.

6.3.6. Resumen

En el análisis de los casos prácticos mostrados, y en muchos otros que no han sido expuestos en esta tesis, se comprueba la complejidad que supone acometer la tarea analítica de los conductores extraídos de incendios reales.

Tal y como se ha mostrado, en todos ellos son observables efectos producto de la temperatura, tiempo de exposición o atmósferas y secuencia de ellas en la que se vieron afectados, si bien aparecen muchos otros efectos fruto del desarrollo del incendio en condiciones no controladas; como pueden ser temperaturas muy variables, atmósferas de diferente composición en momentos diferentes, procesos más o menos rápidos de enfriamiento en función del desarrollo del incendio y extinción del mismo, etc.

Así pues, los efectos observados aportan pistas e indicios de la historia térmica del conductor y de la secuencia de acontecimientos, pero en los casos reales son los menos en los que estos efectos son tan claros como los expuestos. Es por ello que la tarea analítica requiere del conocimiento de las condiciones en que se vieron afectados los conductores con el objeto único de realizar una adecuada interpretación de las lesiones observadas.

Capítulo 7

Conclusiones

Como conclusión general, y dando respuesta al objetivo general de esta tesis, que era el de estudiar los efectos metalúrgicos producto de la temperatura, tiempo y arcos eléctricos en atmósferas controladas sobre conductores de cobre comúnmente empleados en instalaciones eléctricas y comparar los resultados obtenidos con muestras de cableado extraídas de incendios reales, cabe indicar que el mismo se ha logrado.

Los ensayos realizados han demostrado que el aumento de temperatura y tiempo al que se ven sometidos los conductores conlleva una serie de cambios microestructurales por medio de diferentes efectos de crecimiento de tamaño de grano o segregaciones en borde de grano que afectan a sus propiedades mecánicas, produciendo una merma en las mismas en determinadas circunstancias.

De igual forma, se ha confirmado que la atmósfera a la que se ven sometidos los conductores tiene efectos en los mismos por medio de la difusión de gases al interior, lo cual produce tanto cambios microestructurales significativos en el interior del conductor como degradación en la superficie del mismo.

Los diferentes efectos microestructurales observados muestran correspondencia con los resultados de ensayos de tracción de los conductores, particularmente en las medidas de resistencia máxima, las cuales pueden correlacionarse con los ensayos de microdureza en la sección longitudinal de los conductores y en determinadas condiciones en las que el cableado no se ha visto degradado superficialmente o internamente por los diferentes efectos de la difusión de gases o presencia de oxígeno. Ello plantea que los estudios de microdureza pueden ser una buena técnica complementaria a los análisis microestructurales, dada la imposibilidad de realizar ensayos de tracción en la mayoría de

los casos de incendios reales, si bien deben tenerse en cuenta los efectos de segregación por hidrógeno y óxido de cobre.

Se ha comprobado por medio de simulación de cortocircuitos primarios y secundarios en ambiente controlado diferentes efectos locales debido a las elevadas temperaturas soportadas en la zona fundida, con formación de porosidad, crecimiento de grano e incorporación a la fusión de los productos existentes en la superficie del conductor, no siendo especialmente intensa la absorción de gases a consecuencia del arco eléctrico. Si es más importante la incorporación de gases al material por difusión desde la atmósfera, siendo esta mayor en la zona afectada por el cortocircuito debido a su mayor temperatura durante un cierto tiempo.

La incorporación de gases o material superficial del conductor en la masa fundida por un cortocircuito es particularmente relevante, ya que esta produce en el caso de una atmósfera oxidante inicial la formación de microestructuras eutécticas de Cu-O, y en el caso de una atmósfera reductora una estructura más limpia y tendente a la fragilización en borde de grano. Ello es indicativo de la secuencia de acontecimientos, siendo que una oxidación inicial puede asociarse a un fuego por alcance y por ello a un cortocircuito secundario, y una reducción inicial a un cortocircuito primario.

De esta forma se comprueba, por medio de los cortocircuitos simulados, que los cortocircuitos primarios son asociados a formaciones de colada limpias y carentes de restos de oxígeno incorporado en el interior del material fundido; y que en el caso de cortocircuitos secundarios, en orden a la secuencia de atmósferas existente, se produce aporte de oxígeno al conductor lo cual produce notables efectos sobre la microestructura con formaciones eutécticas Cu-O.

Todos los efectos y conclusiones obtenidas son de aplicación a los incendios reales, ya que estos han sido observados en muestras procedentes de los mismos. Sin embargo se ha observado que en el cableado rescatado de incendios reales se incorporan muchos otros efectos que escapan al control del investigador debido a las diferentes circunstancias ambientales que pueden afectar al conductor en un escenario tan descontrolado como es un incendio; principalmente debido a la caprichosa dinámica que el fuego desarrolle en ese momento y a efectos externos como pudieran ser las condiciones climatológicas, estructurales del propio escenario donde ocurre o la simple intervención de los Bomberos en su extinción.

Es por ello que la tarea analítica de cableado procedente de incendios reales requiere del conocimiento de las condiciones en que se vieron afectados los conductores con el objeto único de realizar una adecuada interpretación de las lesiones observadas.

Capítulo 8

Futuras líneas de investigación

Todo trabajo de investigación permite descubrir nichos para ampliar los conocimientos, en este trabajo se han descubierto varios y se plantean inquietudes que permiten plantear futuras líneas de investigación asociadas a la problemática abordada, las cuales se resumen brevemente en este capítulo.

Se plantean las siguientes futuras líneas de investigación:

- Durante el trabajo realizado se ha observado el escaso consenso existente en la comunidad científica, lo cual se refleja en ensayos muy dispares y de resultados muy variados. Es por ello que se considera imprescindible la formalización de una metodología y desarrollo experimental para la producción de cortocircuitos primarios y secundarios que posteriormente pudieran ser examinados por diferentes técnicas. Debiera proponerse y consensuarse unas condiciones estándar de temperatura, tiempos, atmósferas y enfriamiento, simuladas con el objeto de recrear las propias en que se desarrolla un incendio real.
- Respecto a los ensayos realizados, sería interesante comprobar otros tiempos de aplicación a los experimentados en esta tesis, así como otras temperaturas tales como 900°C y 1050°C, para observar la microestructura del cobre tanto con efectos intermedios, como con los más próximos a la temperatura de fusión del material. Pudiera además variarse el flujo de gas o la concentración de oxígeno e hidrógeno de las diferentes atmósferas, así como utilizar alguna con cierto contenido en monóxido o dióxido de carbono.

- Una de las variables de mayor interés se considera que es la cantidad de oxígeno existente en conductor; el cual puede ser aportado difusión desde la atmósfera, por absorción con el arco eléctrico o bien por su presencia en la superficie del conductor. Podría investigarse en qué medida afecta cada una de estas formas de incorporar oxígeno al conductor. De igual forma pudieran realizarse ensayos de cortocircuitos primarios y secundarios modificando variables atmosféricas y comprobando el grado de penetración de oxígeno, cuantificándolo mediante SEM.
- Respecto a las propiedades mecánicas sería de interés realizar una cuantificación precisa sobre el material de la resistencia mecánica y la microdureza, en diferentes condiciones ambientales de tiempo y temperatura de aplicación, descartando efectos macroscópicos como la fragilización o la formación de capa de oxido superficial y comprobando la correlación existente.
- Finalmente se considera muy importante someter a análisis microestructural más muestras extraídas de incendios reales, considerando la evolución del incendio y circunstancias en que se desarrolló. Ello ampliará el espectro de efectos, y combinación de éstos, soportados por los conductores.

Referencias bibliográficas

Adiga, K.C.: "Principles of Fire Investigation", Ed. IFE, 1990.

Amigó, V., Ferrer, C. y Salvador, M.D.: "Fundamentos de Ciencia de los Materiales", Servicio de Publicaciones UPV, 1999.

Armstrong, R.: "Thermally Induced Failure of Low-Voltage Electrical Nonmetallic-Sheathed Cable Insulation", Fire Technology, Vol. 35, No. 3, 1999.

Anderson, R.N.: "Surface Analysis of Electrical Arc Residues in Fire Investigation", Journal of Forensic Sciences, Vol. 34, Núm. 3, 633-637, 1989.

Anderson, R.N.: "What Came First? The Arc Bead or the Fire?", EC&M 100, 20-21, 2001.

Arthur, E. y Cote, P.E.: "Manual de Protección Contra Incendios", Ed. Mapfre, 1987.

ASM Metals Handbook: "Alloy Phase Diagrams", Vol. 3, 1992.

ASM Metals Handbook: "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials", Vol. 2, 1990.

ASM Metals Handbook: "Metallography and Microstructures", Vol. 9, 1985.

ASTM E384-08 "Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.

Babrauskas, V.: "Ignition Handbook", Fire Science Publishers, 2003.

Babrauskas, V.: "Fires due to Electric Arcing: Can 'Cause' Beads Be Distinguished from 'Victim' Beads by Physical or Chemical Testing?", Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 14, 125-147, 2004.

Bunge, M.: "La investigación científica", Ed. Ariel, 1973.

- Burgoyne, J.H.: "The Scientific Investigation of the Occurrences of Fires", Fire Safety Journal, Vol. 4, 159, 1982.
- Caruana, G. y Martorell, P.: "Daños por Incendio y filtraciones de agua: criterios judiciales", Ed. Tirant Lo Blanch, 2008.
- Catalá, J.: "Física", Editorial Cometa, 1988.
- Chen, C.Y., Ling Y.C., Wang, J.T., Chen, H.Y.: "SIMS depth profiling analysis of electrical arc residues in fire investigation", Applied Surface Science 203-204, 2003.
- Chris, W.: "Classification of Electrical Overheating Modes", Fire and Arson Investigator, Vol. 51, Núm. 4, 2001.
- Clarke, C.: "Evaluation of fire damaged copper wire", Advanced Materials and Processes, 2006.
- Código Técnico de la Edificación, 2006
- Cooke, R. and Rodger, H.: "Principles of Fire Investigation", Ed. IFE, 1985.
- Coulson, J.M. y Richardson, J.F.: "Ingeniería Química", Tomo I, Ed. Reverté, 1979.
- Dawes, Ch.L.: "Electricidad Industrial", Reverté, 1982.
- Dehaan, J.: "Kirk's Fire Investigation", Brady Publishing, 1991.
- Díaz de la Cruz, F. y Carrillo, D.: "Teoría de la Protección", Ed. Mapfre, 1991.
- Erlandsson, R. and Strand, G.: "An Investigation of Physical Characteristics Indicating Primary or Secondary Electrical Damage", Fire Safety Journal, Vol. 8, Is. 2, 97-103, 1985.
- Ettling, B. V.: "Electrical Wiring in Building Fires", Fire Technology, Vol. 14, Núm. 4, 317-325, 1978.
- Felice, E.: "Perturbaciones Armónicas", Ed. Paraninfo, 2000.
- Fire safety data arson dossier ARS: "The investigations of vehicles fires", Loss Prevention Council, 1991.
- Flinn, R. y Trojan, P.: "Materiales de Ingeniería y sus aplicaciones", Editorial McGraw-Hill, 1989.
- Fristrom, R.M. y Westenberg, A.A.: "Flame Structure", McGraw-Hill, New York, 1965.

- Gao, A., Zhao, C., Di, M., Gao, W., Zhang, M., Xia, D.: "Microscopic Investigation of a Copper Molten Mark by Optical Microscopy (OM) and Atomic Force Microscopy (AFM)", *Procedia Engineering* 11, 2011.
- García-Ochoa, F.: "Elementos de electromagnetismo clásico", Ed. UPCO, 1996.
- Gonzalez Piñatel, J.D.: "Forensia aplicada a la investigación de incendio y explosiones", editorial CEP, 2006.
- Herenguel, J.: "Metalurgia Especial, Volumen 2: El cobre y sus aleaciones", 1ª Edición, Ediciones Urmo S.A., 1976.
- Herrera, O.R.: "La investigación de incendios de origen eléctrico. Metodología, causalidad y estudio bibliográfico de las técnicas analíticas", Trabajo de Investigación DEA, UPV, Septiembre de 2010.
- Howitt, D.G.: "The surface analysis of copper arc beads, a critical review", *Journal of Forensic Sciences*, Vol. 42, Núm. 4, 608-509, 1997.
- Huang, G., Siheng, S., Haichao, B., Fei J.: "Determination of fire fused traces caused by automotive electrical wiring harness using metallographic method", *Procedia Engineering* 43, 2012.
- Hussain, N., McAllister, J., Roby, R.: "Analysis of Beads Formed on Energized and Non-Energized Copper Conductors Exposed to Various Thermal Insults", *Combustion Science & Engineering Inc.*, Coumbia, MD, 2012.
- Institution Of Fire Engineers: "Handbook for Fire Engineers", Ed. IFE, 1989.
- Irving, N. y Lewis, R.: "Diccionario de Química", Ed. Omega, 1992.
- Jalvo, J.: "Características de un fuego en una habitación tipo de hotel", Trabajo monográfico del curso de doctorado "Tecnología de Incendios", ETSAM, 1996.
- Kogut, L. and Komvopoulos, K.: "Electrical contact resistance theory for conductive rough surfaces", *Journal of Applied Physics*, Vol.94, Núm.5, 2003.
- Kosec, L., Gontarev, V., Kosec, B., FNT, Odsek za metalurgijo in materiale, Ljubljana, Mlakar, N., Kolektor, Idrija: "Embrittlement of Copper Wire Due to Oxygen", 1993.
- Lagadec, P.: "La civilización del riesgo (catástrofes tecnológicas y su responsabilidad social)", Editorial MAPFRE, 1983.
- Lasheras, J.M.: "Ciencia de materiales", Ed. Donostiarra, 1992.

Lee, E.P., Ohtani, H., Matsubara, Y., Seki, T. and Hasegawa, S.: “Study on Discrimination between Primary and Secondary Molten Marks Using Carbonized Residue”, *Fire Safety Journal*, Vol. 37, Is. 4, 353-368, 2002.

Lee, E. P.: “Discrimination between Primary and Secondary Molten Marks on Electric Wires by DAS”, *Journal of Applied Fire Science*, Vol. 9, Núm. 4, 361-379, 1999-2000.

Levinson, W.D: “Copper metallurgy as a diagnostic tool for analysis of the origin of building fire”, *Fire Technology*, Vol. 13, Núm. 3, 211-222, 1977.

Linaza Corral, J.C.: “Los Armónicos en los Incendios”, *I Congreso Internacional de Ingeniería Forense*, 2008.

Llorente, M.: “Comentarios al Nuevo reglamento electrotécnico de baja tensión”, Ed. Profepro, 2002.

Loma-Osorio, E.: “Metodología para el análisis del deterioro de conductores eléctricos sometidos a cortocircuitos y sobretensiones aplicada a la investigación de incendios”, *Proyecto fin de carrera, UPV*, 2005.

López, I.: “Estudio del efecto del fuego en los cambios microestructurales de las aleaciones de cobre”, *Tesis de Máster, UPV*, 2009.

MacCleary, R. C., Thaman, R. N.: “Method for Use in Fire Investigation”, *US Patent 4,182,959*, 1980.

Man, D., Zhang M., Qi, Z., Xia, D., Wu, Y.: “Study of Analyzing Characteristic of Composition on the Surface of Copper Conductor Melted Marks”, *Procedia Engineering* 11, 2011.

Martínez Sancho, V.: “Fonaments de Física”, *Biblioteca Universitaria Enciclopedia Catalana*, 1992.

Matweb, Material data for oxygen-free electronic copper (OFE) UNS C10100 OS050 temper wire. Consultada el 01/12/2014 en:
<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=900a908e71b6459a9ec27a07360ca800&ckck=1>

Mo, S., Zheng, F., Liang, D., Ling, S.: “Impact Analysis to Microstructure Primary Short Circuit Melted Marks Under Different Heat Dissipation Condition”, *Procedia Engineering* 52, 2013.

Montonliu, A.: “El fuego y la electricidad en instalaciones de baja y alta tensión”, *Editorial MAPFRE*, 2001.

- NFPA: “NFPA 921: Guía para la investigación de incendios y explosiones”, CEPREVEN, Ediciones de 1995, 2001, 2004 y 2008.
- Nieh T. and Nix. W.: “Embrittlement of copper due to segregation of oxygen to grain boundaries”, Metallurgical transactions A, 12A: 893-901, 1981.
- Nobuo Mitsuhashi: “Discrimination between primary Arc Marks on Electric Wires by microvoid distribution”, NRIPS Report of Forensic Science, Vol. 48, Núm. 1, 1995.
- Pérez, A., Bravo, N. y Lorente, M.: “La amenaza de los armónicos y sus soluciones”, Ed. Paraninfo, 1999.
- Pero-Sanz, J.A.: “Ciencia e ingeniería de los materiales”, Ed. CIE, 2006.
- Perry, R.H.: “Manual del Ingeniero Químico”, Ed. McGraw-Hill, 2001.
- Phillipps, C. y McFadden, D.: “Investigación del origen y Causas de los Incendios”, Ed. Mapfre, 1984.
- Pons, V.: “Dinámica del fuego: origen y causa de los incendios”, Edicions El bullent, 2003.
- Pons, M.P.: “Tecnología del fuego”, Volúmenes 1 y 2, Ed. M.P. Pons.
- R.A.E.: “Diccionario de la Lengua Española”, Editorial Espasa Calpe, 21ª Ed, 1992.
- Robert A. Yereance: “Electrical Fire Analysis”, Charles C. Thomas Publisher, 1995.
- Roby, R.J., McAllister, J.: “Forensic Investigation Techniques for Inspecting Electrical Conductors Involved in Fire”, Combustion Science & Engineering Inc., Columbia, MD, 2012.
- Roger, J., Riera, M. y Roldán, C.: “Tecnología Eléctrica”, Ed. Síntesis, 2002.
- Schramm L., Behr G., Löser W., and Wetzig K.: “Thermodynamic Reassessment of the Cu-O Phase Diagram”, Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 2005.
- Singh, R.P.: “Scanning electron microscopy of burnt electric wires”, Scanning Microscopy 1:4, 1539-1544, 1987.
- UNE EN 1363:2000: “Ensayos de resistencia al fuego. Parte 1: Requisitos generales”, AENOR, 2000.
- UNE EN 1991-1-2:2004: “Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-2: Acciones generales. Acciones en estructuras expuestas al fuego”, AENOR, 2004.

Wang, Y., Mo, S., Liang, D., Yang, W., Wang, L., Zheng, F.: "Limitation Analysis of Electrical Fire Metallographic Identification Technology", *Procedia Engineering* 52, 2013.

Wei, M.M., Mo, S., Liang, D., Li, J.: "The Experiment on Melted Mark Formed by Copper Wire in Electrical Fire and the Analytic Researcher on the Feature Parameters of Metallographic Structure", *Procedia Engineering* 11, 2011.

William, D.: "Ciencia e Ingeniería de los Materiales", Ed. Reverté, 1995.

Williamson, J.B.P.: "Deterioration processes in electrical connectors", *Proc. 4th Int. Conf. Electr. Contact phenom.*, Swansea, Wales, 1968.

Wu, Y., Han, D.: "Metallurgical and Composition Analysis of Melted Marks due to Electrical Failures", *Mechanika*, Vol 18, ISSN 1392-1207, 2012.

Yan, J., Zhao, Z., Liang, D., Wang, H.: "Extracting Geometric Parameters of Metallography of Beads Caused by Fire with MATLAB", *Procedia Engineering* 52, 2013.

Ying Wu, Changzheng Zhao, Man Di and Wei Gao: "The surface analysis of melted arc Copper beads", *Materials Science Forum*, Vols. 561-565, 2455-2458, 2007.

Zhang, J. Deng, L.: "Metallographic Microcosmic Analysis on Primary Short Circuited Melted Bead of Copper Wire Heated in Different Temperature", *Procedia Engineering* 52, 2013.

Zhang, M., Di, M., Xia, D., Zhang, Y., Qi, Z.: "Study of Characteristics of Cavity Form of Copper Conductor Melted Marks formed by short circuiting", *Procedia Engineering*, 2011.

**Publicaciones en
revistas y
participaciones en
congresos derivadas de
la tesis**

Contribuciones en congresos y conferencias:

J. J. Candel, V. Pons, P. Franconetti, F. Devesa, O. Herrera, V. Amigó

Análisis metalográfico de componentes eléctricos en la investigación de incendios

Workshop I Fire Engineering Confenrece. 1-2 Junio 2011, Universidad Politécnica de Valencia.
