



Universitat Autònoma de Barcelona

PROYECTO DE FINAL DE CARRERA

TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN DE  
INCENDIOS.  
INCENDIOS DE ORIGEN  
ELÉCTRICO

Especialidad: Ingeniería de Materiales

Autor del proyecto: MARIO ANERO CÁRCAMO

Directora del proyecto: Dra. MARÍA TERESA MORA

Fecha: Septiembre de 2.007

## **SUMARIO**

INTRODUCCIÓN	- 3 -
1. HISTORIA DEL FUEGO	- 6 -
1.1. Desde la antigüedad a la era moderna	- 6 -
1.2. De la teoría del flogisto al descubrimiento del oxígeno	- 9 -
2. NATURALEZA DEL FUEGO. MEDIOS DE EXTINCIÓN	- 10 -
2.1. Definición de incendio	- 10 -
2.2. Mecanismos de extinción	- 11 -
2.3. Clasificación de los fuegos	- 14 -
2.4. Agentes extintores	- 18 -
3. DINÁMICA DEL FUEGO	- 29 -
3.1. El fenómeno del <i>Flashover</i>	- 29 -
4. DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE UN INCENDIO	- 32 -
4.1. Introducción	- 32 -
4.2. La “V” invertida	- 33 -
4.3. El cono de ataque	- 35 -
5. EL FUEGO FRENTE A ESTRUCTURAS Y ELEMENTOS DE HORMIGÓN	- 37 -
5.1. Introducción	- 37 -
5.2. Carbonatación	- 38 -
5.3. Problemática del hormigón armado	- 38 -
5.4. Ensayos de compresión y ultrasonidos realizados	- 39 -
6. INCENDIOS ORIGINADOS POR UNA FUENTE DE CALOR DE TIPO ELÉCTRICO	- 43 -
6.1. Introducción	- 43 -

6.2.	Estudio de la variación del estado superficial de los conductores en función del tiempo de exposición al fuego	- 43 -
6.3.	Calor interno o externo respecto al conductor	- 46 -
6.4.	Experimentación realizada en laboratorio	- 48 -
6.4.1.	Fallos de presión en las uniones entre conductores	- 48 -
6.4.2.	Cortocircuitos	- 50 -
6.4.3.	Arco eléctrico	- 54 -
6.4.4.	Arco serie	- 56 -
	CONCLUSIONES	- 60 -
	BIBLIOGRAFÍA	- 61 -
	RESUMEN	- 62 -

## INTRODUCCIÓN

Sabemos que los incendios causan anualmente elevadas pérdidas tanto en lo referente a vidas humanas como a intereses económicos.

A pesar de todo ello, los estudios sobre los incendios no son muy extensos y la dedicación científica al proceso del fuego es más bien escasa.

Prueba de ello es que existen muy pocas universidades que tengan dentro de sus planes de estudio incorporada esta disciplina.

Solamente una parte de la misma, las técnicas de protección contra incendios, ha progresado ligeramente en los últimos años.

Hasta el momento presente, sólo se investigan con cierta profundidad aquellos incendios que presentan un impacto socio-económico ante la población: incendios con víctimas, forestales, impactantes por su magnitud frente a la opinión pública, etc.



*Fotografías 1.1 y 1.2 - La fotografía de la izquierda corresponde al incendio ocurrido en el edificio Windsor de Madrid el 12/2/2005 y la de la derecha a uno de los múltiples incendios forestales que asolaron Grecia durante el mes de Agosto de 2.007*

En muchos países, la investigación de incendios es realizada por miembros de las fuerzas de seguridad, generalmente poco vinculadas con los estamentos universitarios, por lo que no se crean modelos de estudio que puedan ser contrastados mediante un registro y posterior interpretación de los hechos.

También es frecuente que los Servicios de Extinción de Incendios pertenecientes a Organismos Oficiales, no estén dotados de secciones de investigación a pesar de que sus bomberos convivan casi a diario con el incendio.

Resulta por tanto obvio que si se desconocen las causas y circunstancias que desencadenan los incendios, no se podrán tomar las adecuadas medidas para prevenirlos, ni las más apropiadas técnicas de protección y extinción.

Determinar por qué ocurre un incendio, aún en los casos en que las pérdidas sean mínimas, es fundamental para poder realizar estudios preventivos que mitiguen sus efectos.

A menudo tras finalizar la investigación de un incendio, es fácil darse cuenta de lo fácil que hubiese sido evitarlo, haberlo confinado limitando su propagación y sobre todo cómo haber reducido los daños ocasionados.

El hecho de que algunas industrias queden completamente destruidas tras sufrir un incendio, a pesar de las grandes inversiones realizadas en materias de protección, demuestra el fracaso de la aplicación de estas técnicas y no porque sean erróneas, sino porque es frecuente que el proyectista desconozca el peligro real, es decir, la gran variedad de fenómenos susceptibles de poder desencadenar un incendio y las circunstancias que lo pudiesen agravar, limitándose al cumplimiento estricto (más bien mínimo) de la legislación vigente.

La técnica de investigar un incendio implica un conocimiento multidisciplinar, debido a que son muchos los fenómenos y las causas que pueden desencadenarlo.

El desconocimiento de la naturaleza del fuego y la dinámica de los incendios ha hecho que muchos incendios provocados hayan sido considerados como fortuitos y a la inversa.

Mientras tanto los incendios intencionados han experimentado un gran crecimiento en los países desarrollados.

Siempre se ha considerado que la diferencia entre un fuego y un incendio reside en lo deseado o no del hecho. De esta forma por *fuego* se entiende el hecho deseado y controlado, mientras que cuando este se descontrola o no se desea se dice que ocurre un *incendio*. Esta distinción es innata en el argot popular: todo el mundo habla de hacer fuego para cocinar (no se hace un incendio para asar carne...).

Por fuego se entiende toda reacción irreversible de combustión, que desprende calor y luz; incendio es todo fuego no deseado con independencia de la magnitud del mismo.

Así se dice que el fuego, al ser querido, implica siempre una intencionalidad, por lo que las Entidades Aseguradoras emiten pólizas de seguros contra incendios, dando por hecho que el incendio provocado intencionadamente, como es deseado por el asegurado, no tiene cobertura por tratarse de un fuego.

Los **objetivos de este proyecto** de fin de carrera, son comprender la naturaleza y dinámica del fuego, así como desarrollar una serie de herramientas y técnicas que aporten información de cara a determinar el origen donde este se inicia.

Dado que aproximadamente el 70% de los incendios investigados por técnicos especialistas tienen como causa el origen eléctrico, se profundizará en este campo, reproduciendo en laboratorio los fallos eléctricos más comunes y determinando mediante el análisis microscópico de varios conductores si la fuente de calor que los afectó era interna debida a un fallo eléctrico o bien se trata de una fuente de calor externa al conductor, al encontrarse éste en el escenario del incendio.

## **1. HISTORIA DEL FUEGO**

### **1.1. Desde la antigüedad a la era moderna**

Desde la más remota antigüedad, el fuego era conocido por el ser humano. Se presentaba como un fenómeno de la naturaleza que se manifestaba de forma espontánea en determinadas circunstancias: tras tormentas (rayos), en erupción de volcanes, etc.

La utilidad de este fenómeno natural fue rápidamente apreciada por aquellos seres los cuales se preocupaban de mantener el fuego una vez que se presentaba de forma espontánea, a base de ir añadiendo materiales parecidos a los que estaban ardiendo.

Pudieron comprobar cómo en los días lluviosos el fuego se apagaba, lo que les llevó a utilizar el agua como medio de lucha contra el fuego que se les descontrolaba. Desde entonces el agua es el agente extintor más empleado.

No se sabe exactamente cuando el ser humano fue capaz de reproducir este fenómeno a base de frotar dos materiales secos y rugosos entre sí, cerca de las hojas secas de los árboles y hierbas.

Siglos después, los egipcios dominaban a la perfección la técnica de hacer fuego, y este formaba parte fundamental de sus métodos de fabricación y falsificación de metales, bálsamos y perfumes.

Todas las religiones primitivas emplearon el fuego como elemento fundamental en la ofrenda de sus sacrificios. La forma en que se propagaba hacia arriba era el símbolo de comunicación con los dioses. Era una señal de pureza e iluminación. Al mismo tiempo todas religiones se referían al fuego como un suplicio insoportable: el tormento de los infiernos.

Según los griegos, toda materia ardía porque en su interior se encontraba uno de los elementos presentes en la naturaleza: el fuego.

Platón (año 428 a.C.) estableció los cuatro elementos de la naturaleza: tierra, agua, aire y fuego.

Desde la antigüedad el fuego fue empleado de diferentes formas en las guerras. Así en la lucha de los griegos contra los egipcios en el puerto de Alejandría, éstos emplearon una brea inflamable y menos densa que el agua del mar. La misma fue arrojada en el puerto flotando sobre el agua y rodeando las embarcaciones. Posteriormente se prendió el fuego mediante flechas encendidas, quedando todas las embarcaciones egipcias envueltas en llamas.

Este hecho fue conocido como el *fuego griego*.

El efecto destructor del fuego era ya sobradamente conocido y por ello se crearon organizaciones de hombres (los primeros bomberos), para intentar paliar los efectos de los fuegos no deseados: los incendios.

El emperador Augusto César organizó en Roma un cuerpo de bomberos formado por seiscientos esclavos a los que denominó *vigiles*. El propio emperador reorganizó el cuerpo, dotándolo de medios y soldados profesionales, a los que llamaba *Triumviri Notturni*.

Cuando la ciudad de Pompeya fue redescubierta entre las cenizas y lava del volcán Vesubio, se comprobó la existencia de conducciones de agua que ya eran utilizadas para la extinción de incendios.

*Arquímedes* (287-212 a.C.) fue de los primeros en realizar estudios acerca de las aplicaciones del fuego. Fue decisiva su participación en la defensa de Siracusa, donde diseñó unos grandes espejos que hicieron arder parte de la flota romana cuando se acercaba a la ciudad.

Los canteros y picapedreros del Oriente Lejano habían comprobado que en ciertas circunstancias, cuando tallaban las rocas donde había grietas con restos polvorientos de vegetales, ocurrían pequeñas explosiones. Con el tiempo fueron dominando este polvo y lo emplearon para el corte de la propia cantera, descubriéndose de esta forma la *pólvora* (palabra derivada del latín *pulvera*, plural del neutro de *pulvis*, *pulveris*, “polvo”).

La pólvora se empezó por tanto a utilizar en canteras para posteriormente ser aplicada a las armas de fuego y en los fuegos artificiales.

Fue *Galileo Galilei* (1564-1642) quien primero estudió rigurosamente la dilatación de las sustancias. En 1603 puso un tubo de aire caliente sobre una vasija de agua, viendo como el agua subía por el tubo y consiguiendo de esta forma su termómetro (aunque bastante impreciso).

*Santorio* fue uno de los primeros que utilizó una escala termométrica para estimar la temperatura humana con fines médicos, derogando la creencia de que el cuerpo humano estaba más frío durante la noche que por el día.

Finalmente *Robert Boyle*, físico inglés, perfeccionó un termómetro independiente de la presión atmosférica (consistente en un líquido en una ampolla conectada a un tubo recto), siendo el primero en medir con bastante fiabilidad la temperatura del cuerpo humano.

En 1655, en Nuremberg, se construye la primera máquina (una bomba de mano) para la lucha contra incendios y en Amsterdam, se fabrica la primera manguera a base de fibras vegetales entrelazadas.

Hacia el año 1830 aparecen en Europa los primeros cuerpos de bomberos zapadores, dependientes en su mayoría de las Compañías de Seguros.

## 1.2. De la teoría del flogisto al descubrimiento del oxígeno

En 1669, el médico alemán *Johann Joachim Becher* intentó racionalizar los conocimientos básicos sobre el fuego, afirmando que éste se encontraba en el interior de los cuerpos y que si por cualquier circunstancia salía al exterior, originaba la combustión: “*toda materia que arde expulsa algo*”.

Su discípulo, el también médico *Georg Ernst Stahl*, desarrolló y amplió en 1702 las enseñanzas de su maestro, denominando al principio inflamable de cualquier sustancia, el *flogisto*.

La teoría del flogisto intentaba explicar toda combustión, afirmando que este era una sustancia misteriosa que formaba parte de los cuerpos combustibles. Cuanto más flogisto tuviese un cuerpo, mejor combustible era. Los procesos de combustión suponían una pérdida del mismo en el aire. Lo que quedaba tras la combustión no contenía flogisto y por lo tanto no podía seguir ardiendo.

Según sus ideas los metales estaban formados por flogisto y cal (en aquellos tiempos a toda impureza de los metales o sus óxidos se les denominaba genéricamente cal).

Las reacciones se explicaban afirmando que el metal al calentarse perdía flogisto y se transformaba en su cal. Del mismo modo, para obtener el metal a partir de la cal había que añadirle flogisto, el cual se podía obtener de una sustancia más rica como el carbón.

Estas operaciones dieron lugar a que para referirse a una sustancia o materia quemada se use también la expresión, todavía en vigor, que está *calcínada*.

En el siglo XVIII, *Antoine-Laurent de Lavoisier* (1743-1794) demostró la inexistencia del flogisto y desarrolló la ley de conservación de la masa. Formuló su teoría de la combustión en 1783: “*cuando un cuerpo arde o se inflama, se combina con el aire para formar un óxido*”.

## 2. NATURALEZA DEL FUEGO. AGENTES EXTINTORES

### 2.1. Definición de incendio

Se considera **incendio** la combustión y abrasamiento con llama, capaz de propagarse, de un objeto u objetos que no estaban destinados a ser quemados en el lugar y momento en que se produce (artº 45 de la Ley 50/1.980 de 8 de Octubre).

Definimos **combustión** como el desarrollo de una reacción química de oxidación-reducción. Para que pueda darse es preciso que coexistan tres elementos, el combustible que pueda arder, el comburente que permita la reacción (normalmente el oxígeno del aire), y el calor o energía de activación que inicie la reacción. A estos tres factores se les llama el **Triángulo del Fuego**.

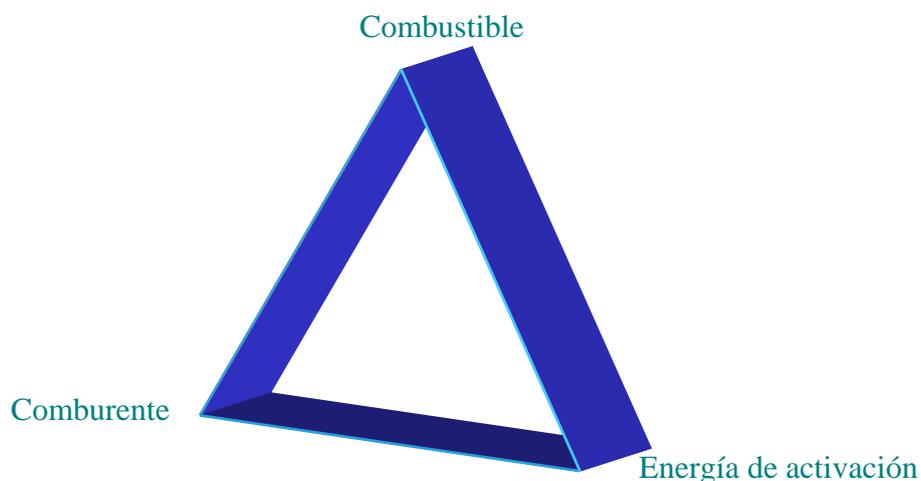


Figura 2.1 - Triángulo del fuego

La combustión es una reacción exotérmica, y parte del calor generado permite que se desarrolle la reacción en el momento siguiente con nueva generación de calor, y así sucesivamente, es decir, se produce una reacción en cadena que se agrega a los tres factores del triángulo del fuego. A ellos junto con este cuarto se les denomina el **Tetraedro del Fuego**.

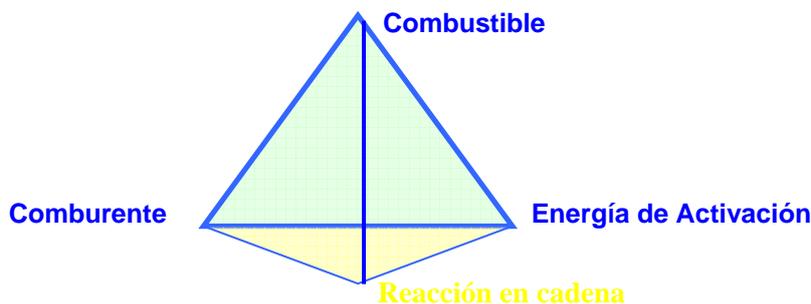


Figura 2.2 - Tetraedro del fuego

Podemos definir los distintos componentes como:

Combustible: Cualquier sustancia capaz de reaccionar de forma rápida con el oxígeno. Ello solo ocurre en la fase de gas o vapor.

Comburente: Cualquier mezcla de gases que contenga suficiente oxígeno para que se produzca la reacción rápida (generalmente el aire que contiene un 21 % de oxígeno).

Energía de activación: Calor suficiente para elevar una zona de la masa de combustible por encima de su temperatura de autoinflamación.

Reacción en cadena: La combustión de la mezcla de combustible y comburente se mantiene al actuar parte del calor generado como energía de activación para el instante siguiente.

## 2.2. Mecanismos de extinción

La falta o eliminación de uno de los elementos que intervienen en la combustión daría lugar a la extinción del fuego.

Según el elemento que eliminemos aparecerán los diferentes mecanismos de extinción:

Sofocación: Eliminar el comburente (oxígeno) de la combustión. Esto se obtiene impidiendo que los vapores combustibles se pongan en contacto con el oxígeno del aire.

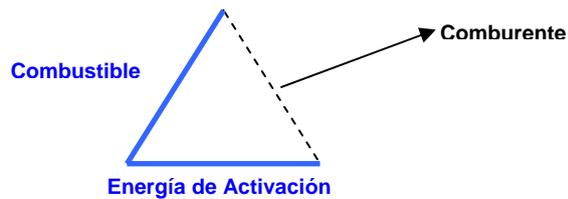


Figura 2.3 - Sofocación

**Enfriamiento:** Consiste en eliminar el calor (energía de activación) para reducir la temperatura del combustible, a un punto en el que no deje escapar suficientes vapores para obtener una mezcla de combustión en la zona de fuego.

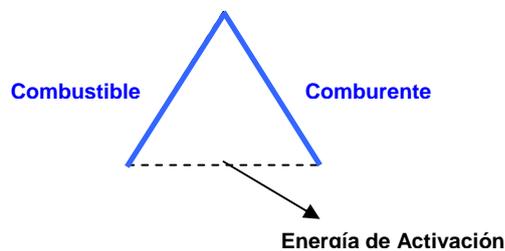


Figura 2.4 - Enfriamiento

**Rotura de reacción en cadena o inhibición:** Consiste en interponer elementos catalizadores que impiden la transmisión del calor de unas partículas a otras del combustible.

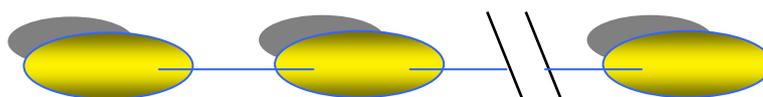


Figura 2.5 - Rotura de la reacción en cadena

**Desalimentación:** Eliminación del elemento combustible.

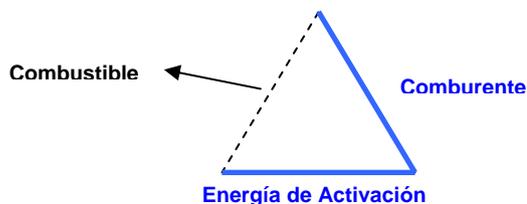


Figura 2.6 - Desalimentación

Como se ha indicado al definir el combustible, para que se produzca una combustión éste debe estar en forma gaseosa o generar vapores en cantidad suficiente. Para que estos vapores puedan inflamarse su concentración debe encontrarse entre dos límites de concentración:

***Límite inferior de inflamabilidad y Límite superior de inflamabilidad.***

Por debajo del primero la cantidad de vapor es insuficiente para que se produzca una inflamación, y por encima del segundo la excesiva saturación de vapor la impide. Al tramo comprendido entre ambos límites se le llama Rango de inflamabilidad.

Definamos seguidamente las temperaturas características de los combustibles:

Temperatura de vaporización: Es la temperatura a la que hay que calentar un combustible para que comience a destilar vapores, aunque éstos son todavía incapaces de arder aún acercándoles un punto de ignición.

Temperatura de ignición: Es la temperatura a la que el combustible empieza a emitir vapores capaces de inflamarse en contacto con una llama pero incapaces, por escasos, de mantenerse ardiendo.

Temperatura de inflamación: Es la mínima temperatura a la que un combustible emite una cantidad suficiente de vapores capaces de inflamarse en contacto con una llama y mantenerse ardiendo hasta que se consume el combustible.

### 2.3. Clasificación de los fuegos

Por el estado físico de los combustibles podemos establecer la siguiente clasificación de los fuegos:

Fuegos de tipo A: Son aquellos en que los gases que arden son aportados por combustibles sólidos tales como madera, papel, tejidos, etc.

Fuegos de tipo B: Cuando los vapores que arden son aportados por combustibles líquidos como la gasolina o el alcohol, o sólidos licuables a baja temperatura tales como parafinas, ceras, etc.

Fuegos de tipo C: Son los producidos directamente por sustancias gaseosas tales como propano, butano, metano, etc.

Fuegos de tipo D: Los generados en metales combustibles tales como magnesio, sodio, aluminio en polvo, etc.

Cualquiera de los tipos de fuego citados puede producirse en presencia de corriente eléctrica. Cuando ello ocurría se denominaban Fuegos de tipo E, calificación actualmente eliminada en la mayoría de las normativas.

Las energías de activación pueden tener su origen en fenómenos diferentes tales como los siguientes:

#### *Térmicos:*

- Utensilios de ignición tales como encendedores, cerillas, etc.
- Instalaciones que generan calor como hornos y calderas.
- Actividades como la soldadura.
- Motores.

*Eléctricos:*

- Descargas atmosféricas.
- Sobrecargas en instalaciones.
- Cortocircuitos.
- Electricidad estática.
- Arco eléctrico.
- Arco-serie.

*Mecánicos:*

- Calor o chispas producidos por fricción.

*Químicos:*

- Reacciones exotérmicas.
- Sustancias autooxidantes.

Dependiendo de la **velocidad** a la que se produce la combustión, podemos distinguir entre:

Deflagración: Combustión cuya velocidad es inferior a la velocidad del sonido, por lo que el frente de llamas va por detrás de la onda sonora.

Detonación: Combustión de velocidad superior a la velocidad del sonido, por lo que el frente de llamas va por delante de la onda sonora.

La **propagación de los incendios** se debe a tres mecanismos diferentes aunque se suelen presentar simultáneamente durante los mismos:

Conducción: La transmisión del calor que propaga el incendio se realiza por contacto directo de un objeto combustible con el incendio o con otro objeto capaz de propagar el calor (metal) que está en contacto con aquel.

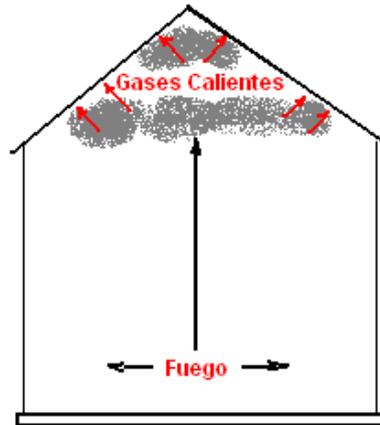
Convección: Proceso de transmisión del incendio por los gases calientes resultantes de la combustión y el aire calentado por el incendio que se esparcen, y al ponerse en contacto con materiales combustibles los calientan, se generan vapores y se alcanza la temperatura de autoinflamación de los mismos.

Radiación: Transmisión del calor en todas direcciones por ondas calóricas. El calor que recibimos del Sol es el ejemplo más significativo de radiación térmica.

En el **desarrollo de un incendio**, el calor liberado en el proceso de combustión en fase incipiente se transmite en un primer instante por convección, pasando conforme se va propagando y durante su máximo apogeo a transmitirse por radiación y convección de igual manera, siendo la conducción, como proceso transmisor, despreciable respecto al resto.

Cuando transcurre un incendio en un recinto cerrado o espacio confinado, los gases y los humos generados durante la combustión se acumulan en el mismo, transmitiéndose el calor generado a los elementos delimitadores en mayor o menor medida.

Los gases calientes (ver figura 2.7) procedentes de la combustión tienden a ascender por tener una menor densidad que el aire existente y se acumulan preferentemente bajo la techumbre del espacio confinado donde transcurre el incendio, como se observa en el esquema adjunto, lugar donde se encuentran ubicadas las estructuras de soporte constructivo.



*Figura 2.7 – Ascensión y acumulación de gases calientes*

En un principio, estos gases están más calientes que los elementos constructivos que forman la cubierta o el techo del recinto. Es por esto, y de acuerdo con el principio de la termodinámica, que estos gases calientes transmiten el calor a la cubierta con la cual están en contacto, de forma que el techo absorbe la energía que transmiten los gases.

Progresivamente el techo se va calentando y, conforme va aumentando la temperatura, la transmisión de calor entre los gases y el techo se reduce hasta alcanzar el equilibrio térmico entre ambos.

A partir de este momento no existirá más cesión de energía entre la capa de gases existente y los elementos del techo del recinto, encontrándose ambos a la misma temperatura, de manera que si el incendio progresa, aumentará al mismo tiempo la temperatura de los elementos portantes y de los gases de combustión.

Conforme evoluciona el incendio, se siguen generando gases, de forma que la capa de éstos bajo el techo va aumentando. El grueso de esa capa de gases bajo el techo del espacio confinado depende de la altura libre entre el pavimento y el techo, de la distribución de huecos de ventilación y del tipo de combustión que se está produciendo, ya que ésta es la responsable de la mayor o menor formación de gases según los elementos que se estén quemando.

A medida que evoluciona el incendio, la aportación de calor a la capa de gases y al techo va aumentando y con ello la temperatura de ambos, de forma que en un determinado momento el conjunto se convierte en un centro emisor de energía por radiación a todo el recinto y en todas direcciones. En esta fase, la radiación sobre el recinto procedente del techo es mucho mayor que la que emite la llama del incendio.

#### **2.4. Agentes extintores**

La extinción de un incendio se consigue arrojando sobre los combustibles cierto tipo de sustancias denominadas agentes extintores.

Los agentes extintores más comunes son:

- Agua
- Espumas
- Polvos
- Anhídrido Carbónico
- Hidrocarburos halogenados

Existen otros agentes extintores de aplicaciones muy específicas y de los que no se entrará en detalle, como pueden ser sales, grafitos, etc.

#### **Agua**

El agua es el elemento primordial y principal en la lucha contra el fuego por tener un gran poder de extinción a la vez que un coste reducido.

Su eficacia de extinción es muy amplia, siendo el agente extintor por excelencia.

#### **Características y propiedades**

El agua, a temperatura normal, es un líquido químicamente estable, incoloro, inodoro e insípido.

### Mecanismos de extinción

Los mecanismos de extinción que intervienen en el empleo del agua como agente extintor son fundamentalmente tres, el efecto de enfriamiento, el de sofocación y el de impacto.

El efecto de **enfriamiento** es el considerado más importante en los procesos de extinción. El mecanismo se fundamenta en el alto calor específico del agua: cada gramo requiere una caloría para aumentar un grado centígrado su temperatura. Ello ocurre hasta que se alcanzan los 100 °C permaneciendo el agua en estado líquido. En este punto, si seguimos suministrando calor, se produce el cambio de estado líquido a gaseoso, para lo cual debemos aportar 540 calorías/gramo. A este calor adicional se le denomina *calor de vaporización*. Este mecanismo se produce automáticamente durante la extinción puesto que las partículas de agua absorben el calor del incendio al evaporarse, enfriando el ambiente que lo rodea. Ello se consigue especialmente si la pulverizamos y se ha comprobado que el tamaño ideal de gota para conseguir este efecto es de 0,7 mm. de diámetro.

El efecto de **sofocación** se produce simultáneamente a la evaporación, al crearse una atmósfera inerte rodeando al fuego e impidiendo el aporte constante de oxígeno al proceso de combustión.

La atmósfera inerte está constituida por el vapor de agua, suministrado por el contacto del agua de extinción en el calor que rodea al fuego. El volumen de atmósfera inerte se caracteriza por la gran expansión del agua al pasar de líquido a gas (el volumen se incrementa 1.700 veces).

El efecto de **impacto** se caracteriza por una separación física entre el elemento combustible y las llamas de combustión, debida al impacto que produce el volumen de agua proyectado sobre el fuego, en los primeros momentos fundamentalmente.

### Métodos de aplicación

Se clasifican según la forma de lanzar el agua sobre el incendio:

- **A CHORRO:** Se consigue haciendo pasar agua a presión a través de boquillas con un orificio central de descarga, de esta forma se puede arrojar el agua sobre el incendio desde una distancia considerable.

Si se aplica desde muy cerca sobre el incendio se corre el riesgo de que el impacto del chorro disperse los combustibles sólidos que están ardiendo, provocando un efecto contrario al pretendido.

El agua a chorro es muy apropiada para poder lanzarla a distancias importantes cuando por alguna razón no podemos acercarnos suficientemente al incendio.

- **PULVERIZADA:** Se consigue haciendo pasar agua a presión a través de boquillas difusoras, que la subdividen en pequeñas gotas. De esta forma se consigue mejor rendimiento, economizando ésta aunque los alcances son menores que en la aplicación a chorro.

El agua pulverizada es muy apropiada para apagar fuegos de tipo A y actúa aceptablemente sobre fuegos de tipo B, siempre que éstos no sean líquidos solubles en agua (p.e. el alcohol).

No actúa sobre fuegos de tipo C y D.

- **CON ADITIVOS**, que pueden añadirse al agua de extinción:

**Emulsionantes:** Tienen la finalidad, mezclados convenientemente con el agua, de dar lugar al líquido espumante, que combinado con el aire o cualquier otro gas (N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, etc.) produce la espuma (se trata en el siguiente apartado).

Los agentes emulsionantes se caracterizan por aumentar la tensión superficial, esta tensión es la que permite, una vez formadas las burbujas, igualar las presiones interiores del gas insuflante con la presión del aire de la atmósfera del fuego.

**Aditivos para espesar el agua o aumentar la viscosidad:** La finalidad de los agentes que aumentan la viscosidad es la de aumentar la adherencia del agua sobre el combustible de forma que se disminuye la velocidad de escurrimiento.

Con el aumento de viscosidad se aumenta el tiempo de permanencia del agua sobre el combustible pero, además, aumenta el espesor de la película de agua de forma que aumentan y se aprovechan mejor las cualidades refrigerantes. Lógicamente la penetración del agua se dificulta siendo la extinción más superficial.

Los productos comúnmente empleados son derivados del alginato (francés) y de la bentonita.

Este aditivo se emplea normalmente en la extinción de incendios forestales.

### *Peligros y contraindicaciones*

El agua no debe ser utilizada sobre instalaciones eléctricas, debido a su carácter conductor.

El impacto del chorro de agua puede provocar la dispersión del combustible, extendiendo el incendio. Esta circunstancia se soslaya con el empleo de agua pulverizada.

Jamás se utilizará agua contra metales combustibles tales como aluminio, magnesio, cinc, sodio, etc., que estén ardiendo. Si se utilizase se produciría

una explosión, debido a la descomposición del agua como consecuencia de las elevadas temperaturas de los fuegos metálicos.

Su elevado poder de corrosión incrementa los daños que produce ya de por sí el propio incendio.

Deben protegerse de forma adecuada las instalaciones contra las heladas, o emplear anticongelantes en zonas de clima frío, con objeto de evitar la inutilización de las mismas por congelación del agua.

## **Espumas**

### **Generalidades**

Las espumas son agentes extintores que tienen por base el agua con un aditivo emulsionante. Consisten en una masa de burbujas de aire o gas con base acuosa que, por su baja densidad, flotan sobre los líquidos combustibles formando una manta de un cierto espesor.

La espuma se puede aplicar sobre grandes extensiones y no es tóxica.

### **Clasificación según el grado de expansión**

La expansión de una espuma viene definida por el coeficiente de expansión, es decir, la relación entre el volumen final de espuma y el volumen original de espumante.

Según el valor del coeficiente de expansión tendremos diversos tipos de espuma física:

- espuma de baja expansión
- espuma de media expansión
- espuma de alta expansión

La espuma de **baja expansión** es una espuma muy sólida y consistente, con gran contenido de agua, que puede lanzarse en forma de chorro a gran distancia. Muy adecuada para fuegos del tipo B y actúa aceptablemente sobre fuegos de tipo A.

La espuma de **media expansión** es más ligera que la anterior, por lo que su alcance es más reducido. Se utiliza para sellar grandes superficies. Muy adecuada para fuegos de tipo B.

La espuma de **alta expansión** es extremadamente ligera, por lo que no se utiliza en exteriores, su aplicación más adecuada es para la inundación rápida de recintos cerrados con el fin de eliminar las llamas.

### Mecanismos de extinción

El empleo general de las espumas es para la extinción de líquidos combustibles aunque no se descarta su empleo en extinción de fuegos de sólidos con brasas.

De forma general podemos decir que la extinción con espumas es por **sofocación** al producirse una separación real entre el combustible y el oxígeno del aire necesario para el mantenimiento de la combustión.

Además, por estar presente el agua, también se origina en estos casos **enfriamiento**.

### Peligros y contraindicaciones

En general los peligros de utilización de espumas son análogos a los del empleo del agua en lo que hace referencia a la presencia de electricidad o en fuegos de metales de alto poder reactivo como el sodio y el potasio.

## **Polvos**

### **Características**

Se trata de un agente extintor formado por sustancias químicas sólidas, finamente divididas y que tienen las siguientes características:

- resistencia a vibraciones
- resistencia a la humedad
- resistencia al apelmazamiento
- rapidez de acción
- ausencia de toxicidad
- no abrasivo
- no degradable
- no conductores de electricidad

### **Clasificación**

\* **Polvos normales o secos BC:** Son adecuados para la extinción de fuegos de clases B y C, como hidrocarburos líquidos o gaseosos. Están compuestos fundamentalmente por bicarbonato sódico y potásico.

\* **Polvos polivalentes o ABC:** Son aquellos adecuados para la extinción de fuegos de clase A, B y C. Su composición es básicamente fosfato cálcico más fosfatos y sulfatos amónicos.

\* **Polvos especiales:** Son aquellos que están destinados a la extinción de fuegos de clase D, es decir, fuegos de metales tales como aleaciones de aluminio, magnesio o metales alcalinos como el sodio, etc. El campo de aplicación de dichos polvos es muy específico debido a la especialización de los mismos en la extinción.

### Mecanismos de extinción

Los mecanismos que intervienen según el orden de importancia, son los siguientes:

\* **Inhibición:** Este es el efecto de mayor importancia. La combustión es ni más ni menos que una reacción en cadena, que es alimentada y acelerada por radicales libres que se encuentran en la atmósfera que rodea al fuego. Los polvos extintores actúan bloqueando dichos radicales y por lo tanto inhibiendo la reacción.

Colaborando con el proceso de inhibición, aunque con menor importancia, están los siguientes mecanismos de extinción: **Sofocación y enfriamiento**

### Aplicaciones

Básicamente se utilizan para extintores de incendios, estando prácticamente en desuso su aplicación en instalaciones fijas de inundación total o parcial.

Su característica principal es que al no ser conductor de la electricidad es aplicable sobre fuegos en presencia de tensión eléctrica (hasta límites del orden de los 1.000 V).

### Inconvenientes, peligros y contraindicaciones

No es conveniente la utilización de los polvos en la extinción de riesgos eléctricos y electrónicos por la ligera corrosividad de los mismos. En caso de utilización es aconsejable la limpieza de las superficies con la máxima rapidez. La disminución de la visibilidad, al aplicar este agente extintor, es un factor a tener en cuenta en locales cerrados puesto que supone un riesgo para las personas.

Los polvos químicos no son tóxicos en general, aunque sí hay que disponer de las oportunas precauciones para impedir la entrada de polvo en las vías respiratorias, por los trastornos físicos (irritación) que puede ocasionar.

Por su constitución física tienden a compactarse, y por su naturaleza a absorber humedad y apelmazarse (son higroscópicos). De producirse alguna de estas circunstancias puede verse dificultado su uso no aprovechando total o parcialmente el agente extintor, por lo que se pierde eficacia.

### **Anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>)**

#### **Características**

El CO<sub>2</sub> es un producto gaseoso que no deja residuos (limpio), no corrosivo, de eficacia aceptable en ciertas condiciones de uso (en lugares confinados y/o poco ventilados), no conductor de la electricidad, de fácil disponibilidad y bajo coste.

A temperatura ambiente puede licuarse fácilmente permitiendo ello un almacenamiento económico.

El anhídrido carbónico no da lugar a mezclas homogéneas con el aire al ser más pesado que éste, por lo que tiene tendencia a ocupar los volúmenes en capas estratificadas.

#### **Mecanismos de extinción**

\* **Sofocación:** Consiste en desplazar el oxígeno del aire y sustituirlo por CO<sub>2</sub>. Las concentraciones en volumen para conseguir la extinción oscilan entre el 35% y el 65%.

\* **Enfriamiento:** El anhídrido carbónico está almacenado en forma de gas licuado a una presión de unas 60 atmósferas, por ello al expulsarlo al exterior se descomprime rápidamente absorbiendo calor del ambiente y, por tanto, lo enfría (produce choque térmico).

#### **Aplicaciones**

El anhídrido carbónico se aplica con extintores o en instalaciones fijas manuales o automáticas de inundación total.

### Peligros y contraindicaciones

Es un gas poco tóxico pero sí asfixiante por la disminución de concentración de oxígeno a que da lugar.

La máxima concentración sin pérdida de conocimiento es del 9% pero cuando dicha concentración aumenta hasta el 20% la inconsciencia es instantánea.

Al ser un gas hace que su efecto extintor sea superficial, por lo que en los fuegos con brasas es ineficaz.

Su uso produce un importante descenso de la temperatura (choque térmico), por lo que puede afectar negativamente a equipos sensibles a estos cambios.

### **Hidrocarburos halogenados (Halcones)**

#### Constitución y características

Son los resultantes de sustituir los hidrógenos que lleva la molécula de metano ( $\text{CH}_4$ ) por átomos de halogenados (flúor -F-, cloro -Cl-, bromo -Br).

Los halones se identifican por cuatro números:

- el primero indica el número de átomos de carbono (C)
- el segundo el número de átomos de flúor (F)
- el tercero el número de átomos de cloro (Cl) y
- el cuarto el número de átomos de bromo (Br)

siendo los más comunes:

- el halón 1301 (trifluorbromometano -  $\text{CF}_3\text{Br}$ ) y
- el halón 1211 (difluorclorobromometano -  $\text{CF}_2\text{ClBr}$ )

### Mecanismos de extinción

\* **Inhibición:** Los halones actúan rompiendo la cadena del incendio. Al descomponerse la molécula actúa sobre los radicales libres de la combustión cortando la reacción en cadena y eliminando las llamas muy rápidamente.

\* **Sofocación:** En condiciones normales los halones son más pesados que el aire, ello produce el desplazamiento del mismo reduciendo la concentración de oxígeno en las zonas bajas (muy poco significativo).

### Aplicaciones

- Se aplica el Halón 1211 para la carga de extintores y el Halón 1301 para instalaciones de inundación total.

Debido a la casi nula conductividad, son válidos para fuegos bajo tensión eléctrica, es decir, salas de ordenadores, centrales telefónicas, etc.

Además es un gas no corrosivo, no deja residuos y no produce choque térmico significativo.

### Problemática de los halones

Los hidrocarburos halogenados son uno de los **causantes del agujero de la capa de ozono**, por ello, y a partir de la Convención de Montreal, se decidió proceder a su eliminación paulatina y desde el 1 de enero de 1994 ni se pueden fabricar ni realizar instalaciones nuevas con este agente extintor aunque si mantener las ya existentes con anterioridad a esa fecha, siendo la excepción a esta normativa el uso en aplicaciones muy específicas de alto riesgo y donde no existan alternativas como puede ser en la industria aeronáutica y espacial.

### **3. DINÁMICA DEL FUEGO**

#### **3.1. El *flashover***

Se define el *flashover* como el momento en que el fuego que está centrado en los alrededores del origen del incendio, se generaliza súbitamente en todos los elementos combustibles presentes.

En un incendio que se desarrolla en un espacio libre o muy ventilado, el calor y los gases y humos de la combustión se difunden en la atmósfera.

Pero si el incendio transcurre en un espacio cerrado, los gases y humos generados se acumulan en dicho espacio y el calor se transmite a los paramentos que lo delimitan.

Cuando se origina el incendio en este espacio cerrado, en la primera fase, la combustión cuenta con suficiente comburente (oxígeno generalmente) y se desarrolla con normalidad.

A medida que se desarrolla el incendio, el fuego se propagará en dos direcciones: siguiendo la distribución espacial del combustible (por convección o conducción) y en sentido ascendente debido al calor de los gases calientes dada su menor densidad con respecto al aire (transmisión por radiación).

En una segunda fase, según va evolucionado el incendio, el fuego afecta a una mayor superficie, con lo que el calor que se transmite por convección aumenta en el recinto, disminuyendo la cantidad de calor que se transmite por radiación. El balance entre el comburente que se consume por el fuego y el que entra en el recinto es negativo por ser un espacio cerrado o confinado (el único aporte de comburente se hace a través de pequeñas aberturas, rendijas, etc...).

Ello se traduce en que la combustión, al enrarecerse el ambiente, se hace más incompleta, por lo que se generan más llamas y humo, formándose una mayor cantidad de gases procedentes de la mala combustión.

Estos gases se van acumulando y distribuyendo bajo el techo del recinto, no pudiendo escaparse o difundirse en la atmósfera por estar confinados.

Inicialmente estos gases están más calientes que los elementos constructivos que conforman la cubierta o techo del recinto, por lo que estos últimos absorberán la energía que transmiten los gases. Progresivamente el techo se va calentando hasta que alcanza el equilibrio térmico con los gases. A partir de este momento, si el incendio progresa, tanto los gases generados como el techo aumentan al unísono su temperatura.

Mientras continúe el incendio, el espesor de los gases bajo el techo irá aumentando y el conjunto “gases-techo” se convertirá en un centro emisor de energía por radiación hacia todo el recinto y en todas las direcciones.

La temperatura del conjunto va aumentando y con ello la energía que transmiten por radiación, con lo que los objetos y enseres que se encuentran en el recinto y que no han sido afectados hasta ese momento, van incrementando su temperatura hasta que empiezan a pirolizar y emitir gases inflamables.

Este hecho tendrá lugar en todo el espacio del recinto bajo cuyo techo se hayan acumulado gases suficientemente calientes a pesar de encontrarse a una distancia considerable del origen del fuego.

Llega un momento en que en el espacio confinado se alcanza la temperatura de ignición de todos los combustibles presentes, con lo que el incendio súbitamente se generaliza en todo el recinto, dando lugar a lo que se conoce como *flashover* (ver fotografía 3.1).

Cuando ocurre el flashover, la ignición súbita de todo el recinto genera una gran sobrepresión, que se traduce en una expansión de los gases generados que arrastra consigo la nube de humo formada. Este humo todavía contiene gases inflamables, que si antes no han ardido por falta de comburente, ahora van ardiendo a medida que avanza el frente de onda. La elevada temperatura

de los gases y el nuevo frente de combustión producen la “bola de fuego” que se propagará hasta llegar a un espacio exterior formando lenguas de fuego.



*Fotografía 3.1 – Flashover. Obsérvense las lenguas de fuego formadas en el exterior del recinto.*

La ocurrencia o no del flashover así como la magnitud del mismo, dependerá de varios factores: características constructivas del recinto, propiedades de los materiales que se encuentren en el interior de los mismos, existencia de huecos de ventilación y resistencia a la presión de elementos compartimentadores (vidrios, lucernarios, etc...).

## **4. DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE UN INCENDIO**

### **4.1. Introducción**

Determinar correctamente el lugar o lugares concretos donde se inicia el fuego es el primer paso en la investigación del incendio, pues es en este sitio y su entorno inmediato donde se deberán realizar las acciones pertinentes para encontrar la causa que lo genera.

El lugar en el que se inicia el fuego se denomina **foco primario** del incendio. Suele ocurrir que durante su propagación el incendio genere otros focos de fuego, que aparentemente no tienen relación entre sí pues emergen aislados, desde los cuales el fuego toma otras trayectorias: son los denominados **focos secundarios** del incendio.

Por ejemplo, en una nave industrial con falso techo de material combustible, puede ocurrir que el fuego desde el punto de inicio alcance dicho falso techo, por el cual puede propagarse. En función de la geometría de la nave y de los materiales de revestimiento empleados en su construcción, el falso techo incandescente podría gotear en algún punto y al afectar las existencias situadas por debajo, generarse un foco secundario.

La transmisión por radiación en un incendio suele producir focos secundarios.

Una de las labores del técnico investigador es diferenciar entre los focos primarios y los secundarios. Para que dos o más focos presentes en el escenario de un incendio se consideren focos primarios, los mismos han de ser independientes entre sí, es decir, no debe haber una continuidad en la propagación del calor entre ellos, por ninguna de las formas de transmisión de calor posibles, han de estar aislados.

Está muy extendida la creencia de que cuando en un incendio se presentan varios focos de fuego, el mismo ha sido provocado, lo cual no es cierto. Si bien

es verdad que en los incendios intencionados con ánimo de conseguir cualquier tipo de lucro, suelen observarse diferentes focos primarios, no siempre que esto ocurre tiene por qué considerarse el incendio como intencionado.

También es frecuente la tendencia a situar el foco de inicio del fuego donde el efecto destructor es mayor o bien donde se detecta la primera columna de humo o las primeras llamas del incendio, lo que evidentemente no es correcto. Un incendio puede iniciarse por ejemplo, al lado de una carretera al lanzarse una colilla desde un automóvil, propagarse rápidamente a través de la hierba seca y alcanzar un almacén de grano situado a una cierta distancia, donde al arder los daños ocasionados son mayores. Es muy probable que los observadores vean las primeras llamas y humo en el almacén de grano, así como el mayor efecto destructor del fuego, en cambio no es el lugar donde el mismo se ha iniciado.

El origen u orígenes del incendio se ha de hallar sobre la base de determinar la trayectoria seguida por el fuego en su propagación, por las marcas y huellas que se observan y por los horizontes de humo y calor formados.

#### **4.2. La “V” invertida**

Como ya se ha dicho, todo fuego se manifiesta con llama y humo. **Donde existe llama persistente, no habrá humo.** Ello es debido a que el calor de la llama consume el humo que instantes antes se ha generado en la combustión.

El humo no es más que una manifestación de una mala combustión: cuanto mejor es la combustión, menor es la cantidad de humo formada. Por consiguiente, donde se origina la llama no puede haber humo, ya que las partículas que no han combustionado inicialmente, se consumen por el calor de la llama presente.

En un recinto donde no existen corrientes de aire, las llamas se propagan verticalmente, debido a que los gases calientes ascienden como consecuencia

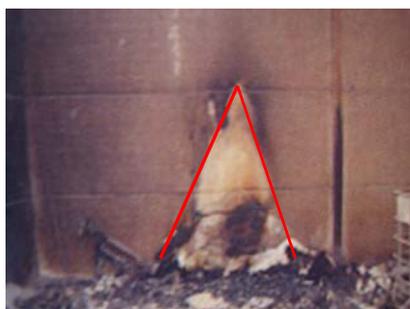
de su menor densidad (la densidad de un gas es inversamente proporcional a la temperatura a la que se encuentra).

Esta ascensión vertical de la llama se traduce en que el vértice superior de la misma es más estrecho (como consecuencia de la ascensión de los gases calientes) que la base de la llama que está en contacto con el combustible la cual es más ancha.



Figura 4.1 – Ascensión vertical de la llama en forma de “V” invertida

Todo ello se traduce en que en el escenario del incendio, los puntos donde las llamas se forman en primer lugar dibujen una “V” invertida sobre el fondo del humo como se muestra a continuación.



Figuras 4.2 y 4.3 – Escenarios de incendios que muestran la ubicación de llama. Nótese la forma de “V” invertida.

Generalmente las “V” invertidas que se observan en el escenario del incendio suelen corresponder a focos primarios o secundarios, debido a que el humo que continúa generándose durante el incendio se deposita preferentemente sobre las superficies más frías. Donde hay llama persistente no hay humo.

Así se puede ver frecuentemente como los cuartos de baño y las cocinas se presentan bastante afectadas por el humo, aunque se encuentren alejados del

lugar donde se inicia el fuego, debido a que las paredes están alicatadas con azulejos, zonas más frías, siendo raro que el humo se deposite sobre algún lugar que se encuentre a una temperatura superior a estas zonas.

**Una correcta interpretación de las “V” invertidas en el escenario del incendio, aporta información sobre la velocidad de propagación del mismo, así como de la combustibilidad de los productos presentes. No será igual la “V” invertida que nos dejará la combustión de líquidos inflamables (amplia base y gran altura) que la combustión de madera (menor base y altura) o combustión de otros materiales.**

La formación de la “V” invertida no tiene por qué originarse únicamente sobre paramentos del edificio, puede formarse sobre elementos metálicos de una máquina, depósitos, etc.

### **4.3. El cono de ataque**

Desde que la llama asciende verticalmente como consecuencia de la menor densidad de los gases incandescentes, el calor se propaga en dos sentidos, verticalmente siguiendo la trayectoria de los gases y horizontalmente por el efecto de la radiación.

El resultado final es que **el calor se propaga verticalmente hacia arriba, formando un cono invertido** que incide sobre los elementos constructivos y enseres presentes.



Figura 4.4 – Formación del cono de ataque

Por ejemplo, en un incendio que se origine a ras del suelo, los elementos más cercanos están dañados en sus partes más bajas, mientras que a medida que nos alejamos del punto de origen se verá cómo la afectación sobre los objetos se va elevando sobre los mismos. En resumen, apenas un objeto se aleja del fuego, el ataque de este último sobre las partes bajas del primero disminuye.

Este hecho explica también el motivo por el que ante un incendio, las personas deben abandonar el local lo más agachadas posible, ya que el calor y humo se propagan hacia arriba.

Al progresar el incendio, el vértice del cono se va haciendo más grande, los elementos que restan dentro quedan afectados en su totalidad y el perímetro del cono se hace mayor. Es en el lugar donde comienzan a observarse elementos no dañados en su totalidad, cuando el investigador de incendios tomará las notas oportunas para identificar el cono de ataque.

Durante la inspección del escenario del incendio, puede ocurrir que siguiendo la trayectoria del mismo, se llegue a un punto a partir del cual vuelva a descender el área afectada a puntos más bajos, evidenciando otro lugar de inicio de combustión. Ello puede implicar dos focos diferentes, que podrán ser o no primarios, lo cual deberá esclarecerse.

## **5. EL FUEGO FRENTE A LAS ESTRUCTURAS Y ELEMENTOS DE HORMIGÓN**

### **5.1. Introducción**

El aspecto del hormigón utilizado en la construcción, sufre una serie de cambios al ser sometido a altas temperaturas como consecuencia de un incendio.

Visualmente se pueden apreciar en ocasiones daños como: fisuración superficial, presencia de cal, disgregación del hormigón, etc...

Cada una de estas tipologías de daños se pueden asociar a una temperatura alcanzada en el hormigón y generalmente daño y temperatura alcanzada llevan asociados unas secuelas y cierta coloración:

**200 °C < T<sup>a</sup> < 300 °C:** pérdida del agua capilar, no parecen modificaciones estructurales ni disminuye la resistencia.

**300 °C < T<sup>a</sup> < 400 °C:** pérdida del agua del cemento. Aparecen fisuras superficiales y el hormigón armado tiende a una coloración rosácea debido a los cambios que sufren los compuestos de hierro.

**400 °C < T<sup>a</sup> < 600 °C:** desprendimiento de cal viva a partir del hidróxido cálcico de hidratación de silicatos. Cuando se enfría el hormigón sus propiedades mecánicas pueden disminuir en función del método de extinción del incendio y de las tensiones estructurales a las que esté sometido. Color rojizo.

**600 °C < T<sup>a</sup> < 950 °C:** los áridos se expanden y debido a sus diferentes coeficientes de dilatación, aparece la disgregación. El hormigón adquiere tonalidades grisáceas, pierde agua intersticial y se vuelve poroso. En estas situaciones se produce una pérdida de resistencia que puede oscilar entre el 60% y el 90%, siendo necesaria su total sustitución para garantizar la estabilidad estructural del edificio.

**950 °C < T<sup>a</sup> < 1200 °C:** destrucción del conglomerado, adquiriendo un tono amarillento. El hormigón carece de resistencia residual alguna.

Generalmente el hormigón suele quedar cubierto por humo generado en el incendio por lo que se debe limpiar cuidadosamente para observar las tonalidades descritas.

## **5.2. Carbonatación**

Sobre la carbonatación, hay que decir que es un fenómeno debido a la acción del calor generado por el incendio sobre el hormigón.

Consiste en una reacción en la cual el **hidróxido cálcico** que forma parte de la estructura del hormigón (y a su vez actúa como elemento pasivante, protector del acero contra la corrosión), **pierde agua** para convertirse en **óxido cálcico**:



Si durante la extinción del incendio, el agua utilizada para tal fin reacciona con el óxido cálcico formado, debido a esta rehidratación se puede volver a formar el hidróxido cálcico inicial, no obstante si el cambio de temperatura inicial es muy brusco (por ejemplo en presencia de combustibles que favorezcan la rápida propagación del incendio), el óxido cálcico formado adquiere formas muy estables y la rehidratación no tiene lugar. **Ante esta situación el acero que arma el hormigón será más susceptible de sufrir corrosión.**

## **5.3. Problemática del hormigón armado**

En los hormigones armados, se debe tener en cuenta que los trabajos de extinción del incendio producen un rápido enfriamiento de las armaduras que hayan podido quedar al descubierto, con la posibilidad de quedar estas fragilizadas por el aumento del tamaño de grano que las constituyen

Así mismo en las estructuras de hormigón armado se debe tener en cuenta que si el calor generado por el incendio se prolonga durante un tiempo considerable, puede ocurrir que en el lugar donde se produjo el ataque directo del fuego, el hormigón armado no haya quedado aparentemente dañado, pero a una cierta distancia de ese lugar, el mismo presente lesiones debido a pérdida de adherencia entre ambos materiales.

Se conoce que el coeficiente de dilatación térmica del hormigón y del acero es similar, no obstante el coeficiente de conductibilidad térmica del primero es muy inferior al del segundo, o lo que es lo mismo, el acero es unas 4.000 veces mejor conductor del calor que el hormigón.

En la zona de ataque directo del fuego ambos materiales dilatarán de forma más o menos uniforme, ocurriendo lo mismo al ser enfriados por el agua de extinción del incendio.

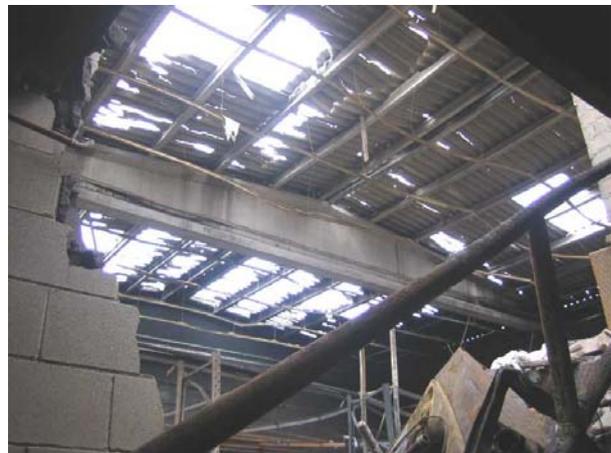
En cambio, en un punto separado (por ejemplo en el otro extremo de una jácena) el calor se propagará rápidamente por el acero de la armadura interior del hormigón, dilatándose esta más que el hormigón de esa zona alejada.

Consecuencia de este hecho es que se acaban produciendo lesiones por fisuración del hormigón, oxidación, carbonatación, variaciones del pH, etc., en función del medio.

#### **5.4. Ensayos de compresión y ultrasonidos realizados**

Durante el desarrollo de este proyecto de fin de carrera realicé un informe de valoración de los daños materiales sufridos como consecuencia de un importante incendio ocurrido en una empresa de la localidad de Sant Hilari Sacalm (Girona).

Los elementos estructurales de los edificios afectados (obsérvense los pilares y jácenas en las fotografías 5.1 y 5.2) estaban constituidos por hormigón armado y el grado de afectación (visual) de estos elementos variaba en función de su ubicación..



*Fotografías 5.1 y 5.2 – Daños ocasionados por el incendio ocurrido en una empresa de S. Hilari Sacalm*

Las partes intervinientes (los representantes de los propietarios de los edificios y mi persona en representación de la Compañía Aseguradora del edificio) decidimos realizar en el *Centre d'Estudis de la Construcció i Anàlisi de Materials* CECAM, S.L.U., diversos ensayos de compresión y estudios por ultrasonidos de los elementos aparentemente más dañados.

#### **Objetivos:**

- Determinar el estado en que quedó la estructura de hormigón armado de dicho edificio, de cara a establecer el proceso de reconstrucción más adecuado.
- Analizar si la información obtenida en estos ensayos coincidía o complementaba la facilitada por las huellas y vestigios dejados por las llamas y humo en el escenario del incendio.  
Si los resultados obtenidos en estos ensayos guardaban relación con la información facilitada por las huellas y vestigios dejados por las llamas y humo, los mismos se podrían validar como herramientas útiles para la investigación de incendios.

Procedimiento:

- Estudio visual de los elementos constructivos (principalmente pilares y jácenas).
- Elección de las muestras que hiciesen la función de testigos de referencia en los ensayos: se optó por tomar una muestra del pilar y de la jácena aparentemente en mejor estado de conservación (E1 y P1 del croquis adjunto).



Fotografía 5.3 – Detalle del lugar de extracción de una de las probetas para su ensayo (en azul)

- Medición de la profundidad de la carbonatación de las dos muestras tomadas como testigos de referencia (E1 y P1) y de dos muestras de los elementos constructivos aparentemente más afectados por el fuego (E11 y P11): se utilizó para ello fenolftaleína, que es un ácido débil que al aplicarse sobre el hormigón actúa como medidor del pH y muestra un color fucsia en la zona no carbonatada.
- Se realizaron ensayos de rotura a compresión sobre tres de cuatro muestras mencionadas anteriormente, utilizando para ello una prensa SERVOSIS modelo M-250. Las dimensiones de las probetas fueron las siguientes:

Muestra	Altura de probeta (cm)	Diámetro de probeta (cm)
E1	72.10	7.50
E11	70.60	7.50
P11 (*)	-	-
P1	11.40	7.50

*Nota: (\*) La probeta P11 no se pudo ensayar por presentar una fisura vertical en toda su longitud.*

- Finalmente se llevaron a cabo treinta y tres ensayos de ultrasonidos (tanto de transmisión directa como indirecta) sobre la práctica totalidad de pilares y jácenas. La velocidad de propagación de los ultrasonidos depende entre otros parámetros, del módulo de elasticidad del elemento ensayado y sabemos que concretamente en el caso del hormigón, éste módulo disminuye con la temperatura a la que el mismo ha estado sometido.

Resultados obtenidos:

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los diferentes ensayos.

*Medición de carbonatación*

Muestra	Profundidad de carbonatación (cm)
E1	1.00
E11	1.50
P1	1.00
P11	2.00

*Ensayos de ultrasonidos, rotura a compresión y estimación de pérdida de resistencia*

Muestra	Velocidad de transmisión media (km/h)	Resistencia obtenida (Mpa)	Resistencia estimada (**) (Mpa)	Pérdida de resistencia (%)
E11 dcha	3.38		20.64	36.68
E11 izda	3.10	17.50		46.31
E8 dcha	3.87		26.04	20.12
E8 izda	4.03		27.87	14.50
E10 dcha	3.33		20.17	38.12
E10 izda	3.64		23.46	28.03
E7 dcha	3.69		24.06	26.19
E7 izda	3.90		26.43	18.92
E5 dcha	4.46		32.60	0
E5 izda	4.34		31.27	4.08
E1 izda	4.47	32.60		0 (*)
P11	2.68		17.76	35.65
P8	3.83		25.41	7.93
P5	4.00		26.50	3.98
P1	4.16	27.60		0 (*)

*Nota: (\*) Muestras tomadas como referencias por no encontrarse prácticamente afectadas por el incendio*

*Nota: (\*\*) Las resistencias estimadas se obtuvieron mediante regresión lineal a partir de los valores de resistencia y velocidad de transmisión media obtenidos*

Como resultado de los diferentes parámetros obtenidos en los ensayos mencionados, establecí la necesidad de proceder a la sustitución de las jácenas E7, E8, E10 y E11, así como del pilar P11, por haber perdido todos estos elementos una resistencia superior al 15% (considerado umbral de seguridad).

De estos elementos, el pilar P11 y las jácenas E10 y E11 fueron los elementos que mayor porcentaje de resistencia habían perdido como consecuencia del incendio (más concretamente en la zona de apoyo de ambas jácenas sobre dicho pilar).

La jácena E13 fue derruida tras las labores de extinción del incendio en base a criterios de seguridad para los viandantes.

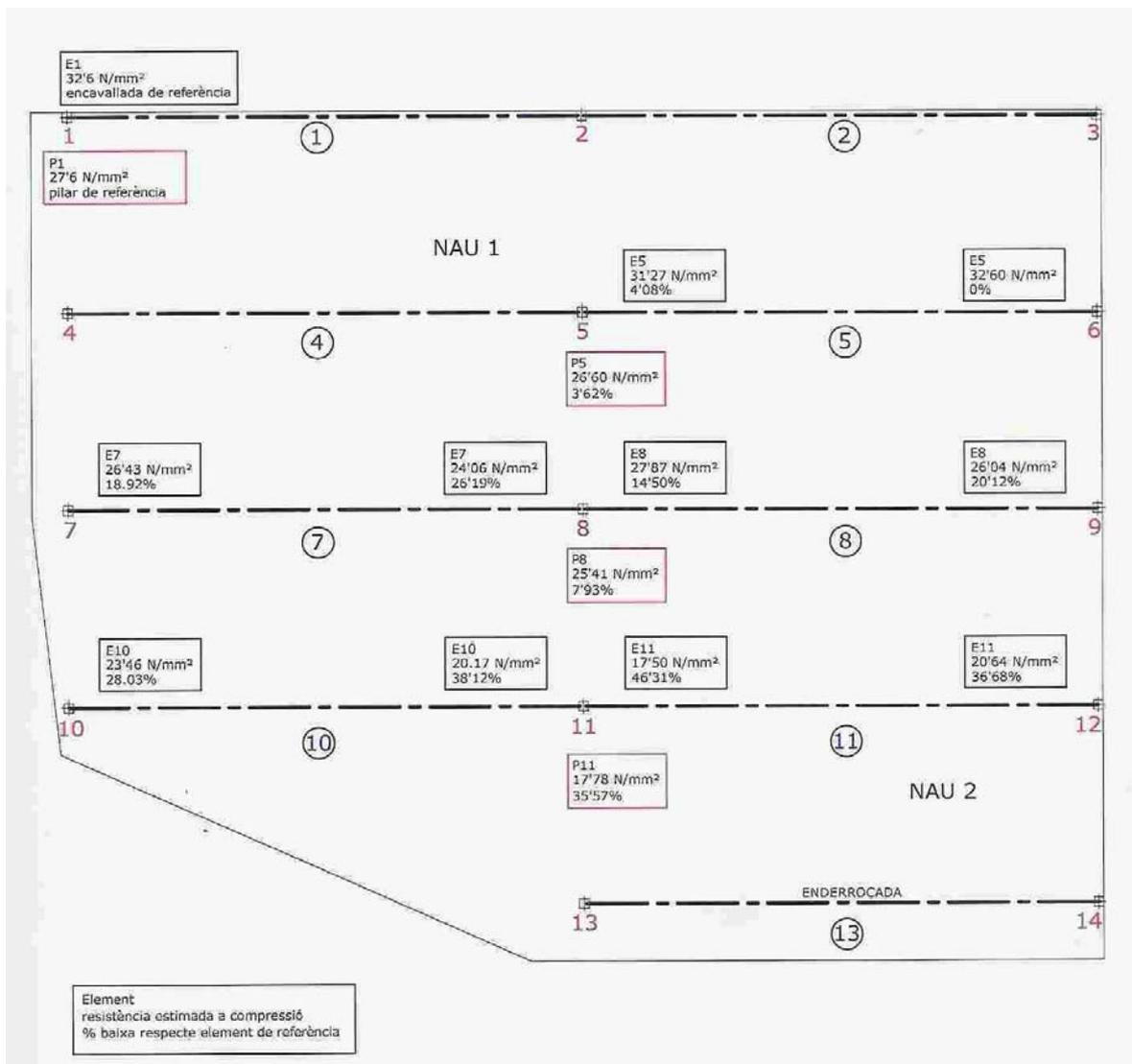
Los resultados obtenidos en estos ensayos complementaron el dictamen del Departamento de la Policía Científica de los Mossos d'Esquadra que

basándose en declaraciones de testigos presenciales, empleados de la empresa y en las huellas y vestigios dejados por las llamas y humo en el escenario del incendio, estableció como origen del mismo una estufa de leña situada junto al pilar número 11.

**Por lo tanto y a modo de conclusión final de este apartado, se ha verificado que este tipo de ensayos realizados sobre el hormigón armado, pueden ser de utilidad para aportar información complementaria en la investigación de incendios.**

La leyenda utilizada en el croquis es la siguiente:

Identificación del elemento constructivo  
 Resistencia estimada a partir de los ensayos a compresión  
 % de pérdida de resistencia respecto al testimonio de referencia



## **6. INCENDIOS ORIGINADOS POR UNA FUENTE DE CALOR DE TIPO ELÉCTRICO**

### **6.1. Introducción**

En la práctica totalidad de los escenarios donde se ha producido un incendio se encuentran presentes conductos eléctricos que pueden o no estar alimentados, dependiendo del lugar y el momento.

Las estadísticas indican que del orden de un 70 a un 75% de los incendios se deben a una fuente de calor causada por un fallo eléctrico.

En una instalación o aparato eléctrico, ante un fallo del mismo se puede producir un calor que se traduce en una elevación de la temperatura, que puede prender sobre la carga de fuego que se encuentra en las proximidades. En ocasiones la carga de fuego la constituye el propio aislante plástico de los conductores.

También es frecuente la ocurrencia de un arco eléctrico, el cual genera una alta temperatura (de hasta 3.000°C ) en el medio donde se desarrolla, al mismo tiempo que se produce una ionización en el aire, convirtiéndose por tanto este en mejor conductor.

En ocasiones como consecuencia de un fallo eléctrico, se desprenden chispas que no son más que proyecciones de partículas metálicas incandescentes del conductor.

Estas partículas están a una temperatura cercana al punto de fusión del metal y más concretamente en el caso de los conductores de cobre y sus aleaciones estas temperaturas pueden llegar a los 1.100 °C.

### **6.2. Estudio de la variación del estado superficial de los conductores en función del tiempo de exposición al fuego**

#### Objetivo:

- Observar la variación del estado superficial de diversos conductores eléctricos que han estado expuestos al fuego durante diferentes intervalos de tiempo.

#### Procedimiento:

- Mediante la utilización de un fuego de clase A (utilizando como combustible pequeños listones de madera), expuse al mismo varias muestras de cable eléctrico convencional (de 1,5 mm de sección).

### Resultados obtenidos:

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los diferentes conductores.

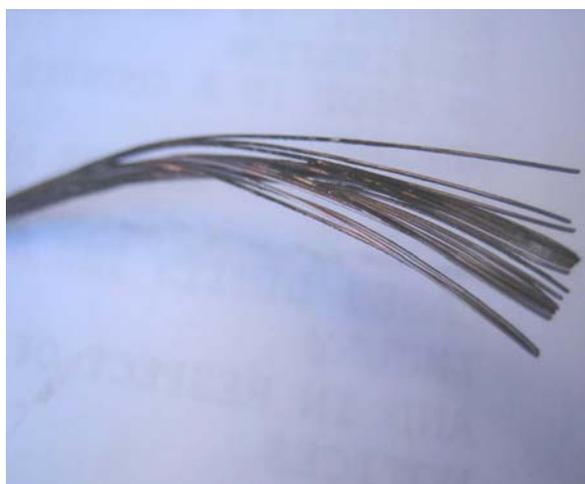
En función del tiempo de exposición al fuego (y consecuentemente de las temperaturas alcanzadas), comprobé que el **cobre** presentaba diferentes estados:

- **Tras 5 minutos de exposición al fuego:**
  - El cobre mantiene la ductilidad al ser doblado.
  - Presenta un aspecto superficial brillante.
  - Destrucción parcial del aislamiento (ver fotografía 6.1).



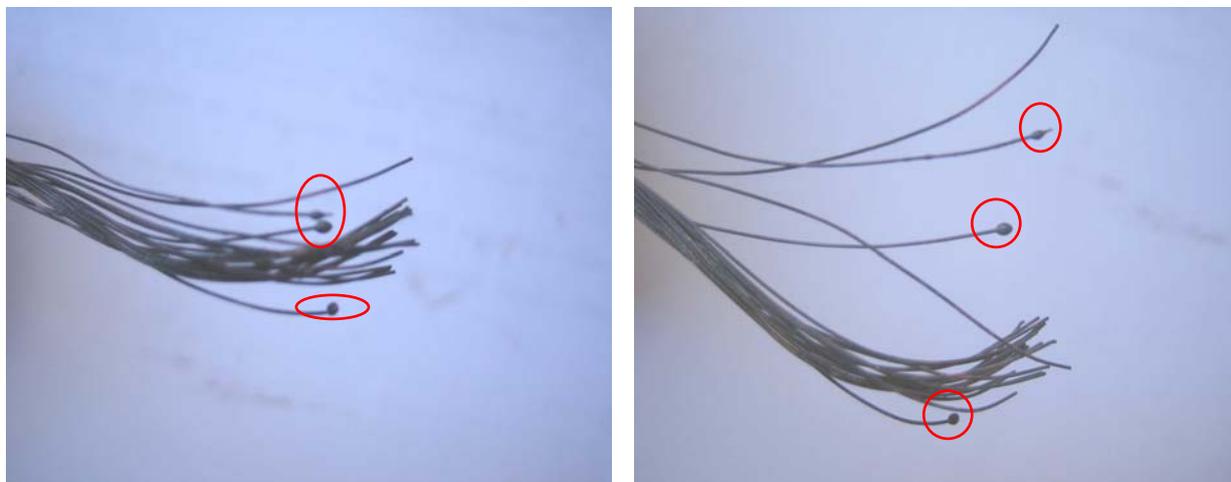
Fotografía 6.1 - Detalle de la destrucción parcial sufrida por el aislamiento tras 5 minutos de exposición al fuego

- **Tras 10 minutos de exposición al fuego:**
  - El cobre mantiene la ductilidad al ser doblado.
  - Destrucción total del aislamiento expuesto a las llamas.
  - Oxidación superficial: el conductor adquiere un color superficial oscuro, negro-pardo (ver fotografías 6.2 y 6.3).
  - No hay síntomas de fusión en el conductor.



Fotografías 6.2 y 6.3 - Detalle de la oxidación superficial sufrida por el conductor tras 10 minutos de exposición al fuego (obsérvese que no hay síntomas de fusión del cobre)

- **Tras 20 minutos de exposición al fuego:**
  - El cobre presenta síntomas de fragilización.
  - Oxidación superficial (color superficial oscuro, negro-pardo).
  - Aparecen pequeñas gotas de cobre por fusión local (ver fotografías 6.4 y 6.5)



Fotografías 6.4 y 6.5 - Detalle de las pequeñas bolas de cobre (resaltadas en rojo) formadas por fusiones locales que aparecieron tras 20 minutos de exposición al fuego.

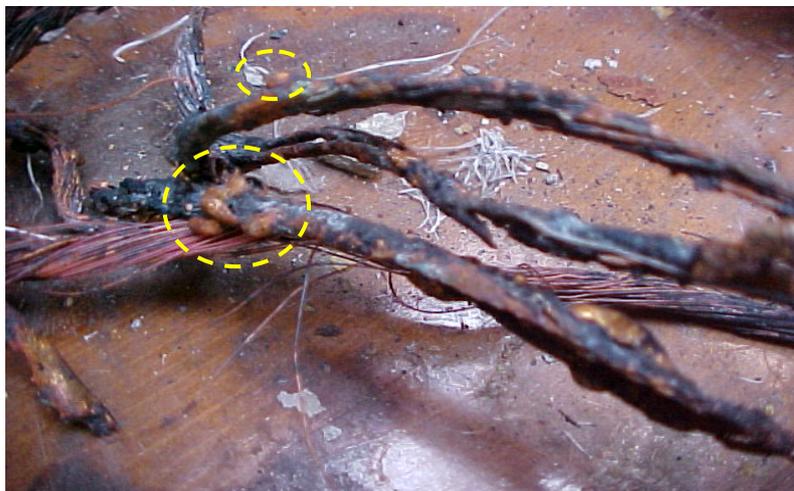
- **Periodos superiores a 20 minutos de exposición al fuego:**

Dada la limitada carga térmica disponible para el experimento (pequeños listones de madera), no llegué a conseguir temperaturas suficientes como para causar efectos más destructivos a los conductores empleados.

No obstante a continuación se adjunta la fotografía 6.6, que obtuve en un incendio ocurrido en una empresa textil ubicada en Terrassa, donde la carga térmica era bastante elevada, hasta el punto de llegar a fundir notablemente diferentes partes de la instalación eléctrica existente.

El cobre presentaba los siguientes defectos:

- Oxidación superficial.
- Goterones de metal fundido.



Fotografía 6.6 – La elevada carga térmica presente en el escenario del incendio provocó la fusión parcial del cobre. Obsérvense los goterones de cobre (resaltados en amarillo) generados por su fusión parcial.

### **6.3. Calor interno o externo respecto al conductor**

En caso de que el fuego ataque exteriormente al conductor, debido a la presencia del oxígeno del aire, existe una atmósfera oxidante que impide que se produzcan soldaduras entre los hilos conductores de cobre, con independencia de la temperatura.

Además hay que tener en cuenta que no es frecuente sobrepasar la temperatura de fusión del cobre en aquellos incendios producidos como consecuencia del calor generado por la combustión de los materiales del entorno, ya que estas temperaturas no suelen alcanzar los 1.083°C (punto de fusión del cobre).

Aunque se retomará más adelante, en caso de que se trate de un cortocircuito, el calor se produce en el interior del conductor por el efecto Joule ( $Q=I^2 R t$ ).

El calor aumenta cuadráticamente con la intensidad de la corriente, por lo que se pueden alcanzar valores considerables, suficientes para llegar a la temperatura de fusión del cobre.

Por otro lado, la corriente se reparte entre los hilos que conforman el conductor (corrientes paralelas), que por efecto magnético hacen que estos hilos se atraigan con una fuerza, también cuadrática respecto a la intensidad, que favorece que se produzcan soldaduras entre los hilos (ver la fotografía 6.7, que obtuve en un incendio que afectó a la práctica totalidad de una vivienda ubicada en la localidad de Blanes).



*Fotografía 6.7 – Resaltada en azul se observa la soldadura producida entre dos hilos conductores de cobre por cortocircuito entre ambos.*

**Por lo tanto en caso de calor exterior, el cobre podría llegar a fundir pero rara vez se soldará, mientras que en el caso de calor interno (por cortocircuito) podrá haber fusión y soldadura entre los hilos que forman el conductor.**

Otro aspecto importante a tener en cuenta es el revestimiento del conductor: si el calor es **interno**, este se propaga por el interior del cable en el cual se ha producido el cortocircuito, quedando por tanto el revestimiento sometido en todos los puntos a la misma intensidad de calor, ya que este se propaga por el conductor, transmitiéndose por convección y radiación en todas las direcciones sobre **la protección plástica**, la cual sufrirá un **grado de deformación similar en todos sus puntos**.

Inicialmente, el aislante dilata en todas las direcciones, **separándose del conductor** metálico.

Posteriormente si la fuente de calor interno continúa, el revestimiento plástico acabará ardiendo, desprendiéndose del conductor y por lo tanto este presentará grandes tramos desnudos.

Si el calor es **externo**, también es frecuente encontrar grandes tramos de conductor total o parcialmente desnudos, no obstante se presentan zonas en las cuales el revestimiento queda **adherido al conductor tras su enfriamiento** y consecuente solidificación (no se da el fenómeno de separación entre ambos que aparece cuando el calor es interno). Sirvan de muestra las fotografías 6.8 y 6.9 que obtuve en diferentes escenarios de incendio.



*Fotografías 6.8 y 6.9 - Detalles de dos instalaciones eléctricas atacadas por el fuego desde el exterior (obsérvense los restos calcinados de los revestimientos de los conductores, los cuales quedaron adheridos tras su enfriamiento y que descartan la posibilidad de que el origen del fuego fuese interno).*

Además pude comprobar cómo en un proceso que origina una transmisión de calor desde el interior del conductor hacia el exterior, la intensidad de calor que se propaga por el conductor metálico hace que este pierda consistencia, fragilizándose y rompiéndose con cierta facilidad cuando somete a una ligera flexión o torsión, cosa que no ocurre habitualmente en caso de un ataque desde el exterior del conductor.

## **6.4. Experimentación realizada en laboratorio**

Como ya se ha indicado anteriormente la probabilidad de que un incendio tenga origen eléctrico es bastante elevada (estadísticamente en torno al 70 – 75%), por lo que mi interés en este apartado se centró en reproducir para su observación los fallos eléctricos más habituales y que son susceptibles de originar un incendio.

Si se reproducen en un laboratorio será más fácil poder identificarlos posteriormente sobre los escenarios de los incendios

Para ello realicé diferentes ensayos (montajes de circuitos defectuosos, termografía, microscopía), y de esta forma observar el desarrollo y las consecuencias de los fallos eléctricos más habituales, entre ellos los siguientes:

- Fallos de presión en las uniones entre conductores
- Envejecimiento por fatiga, desgaste mecánico, etc... de los revestimientos
- Cortocircuitos
- Arco eléctrico
- Arco serie

### **6.4.1. Fallos de presión en las uniones entre conductores**

#### **Objetivo:**

- Reproducir las consecuencias que pueden derivarse de fallos y errores de montaje en la unión entre conductores.

#### **Procedimiento:**

- Se montó un pequeño circuito en el cual constaba de cuatro conductores unidos en sus bornes mediante accesorios roscados. En una de las uniones entre dos conductores (marcada con un círculo rojo en la fotografía 6.10), los bornes fueron puesto en contacto casi sin presión, de forma que bailaban entre sí de forma sencilla (no había una unión a presión constante como en el resto de conexiones).



*Fotografía 6.10 – Montaje experimental realizado para analizar las consecuencias de un defecto de presión entre los bornes de unión entre conductores (en rojo se marca la unión defectuosa por falta de presión)*

- Mediante fuente de alimentación, se permitió el paso de corriente a través del circuito para posteriormente, mediante un termógrafo de infrarrojos, medir la temperatura alcanzada en los diferentes puntos de conexión.

#### Resultados obtenidos:

- El termógrafo indicó una temperatura en torno a los 40°C en los puntos de conexión correctamente ajustados, mientras que en la unión donde ambos bornes se encontraban incorrectamente unidos (sin presión y con menor superficie de contacto entre ellos) dicha temperatura alcanzó los 130°C.
- Tal y como se muestra en la fotografía 6.11, el pequeño listón de madera sobre el cual se apoyaba dicha unión defectuosa, quedó parcialmente carbonizado por efecto del calor generado.



*Fotografía 6.11 – Carbonización resultante del calor generado por una deficiente presión en la unión de dos conductores*

- Como consecuencia de esta incorrecta unión entre los conductores se acabó formando óxido en los puntos de contacto, aumentando la resistencia al paso de corriente y por lo tanto el calor generado en dichos puntos (efecto Joule  $Q = I^2 R t$ ).
- **Nos encontramos por tanto ante un foco de calor que puede perfectamente ser el origen de un incendio.**
- De forma análoga, también se pudo observar la deformación causada sobre una regleta (de bastidor plástico), por el calor generado por el paso de la corriente ante una deficiente presión de dos conductores de diferente sección.



*Fotografía 6.12 – Deformación causada en una regleta de plástico como consecuencia de un defecto de presión en la fijación de los conductores*

- Se constató de esta forma que se debe evitar esta práctica y en caso de tener que recurrir a ella por absoluta necesidad, hay que asegurarse de que ambos conductores queden debidamente presionados (con la dificultad añadida de tener ambos diferentes secciones).

#### 6.4.2. Cortocircuitos

##### Introducción:

La circulación de corriente a través de un conductor, genera alrededor de esta un campo magnético.

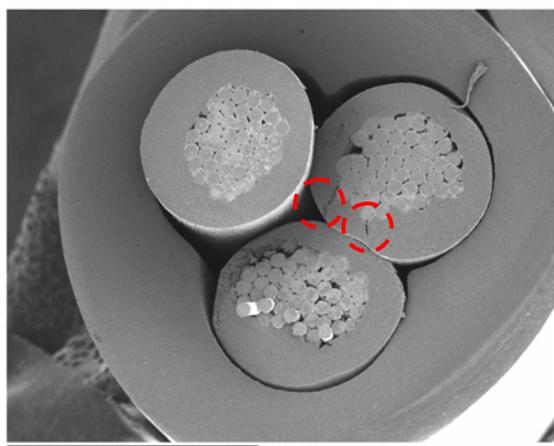
Si en las proximidades del campo magnético existe hierro o alguna de sus aleaciones la magnitud del campo se multiplica.

Dos corrientes que circulan paralelas entre sí, generan fuerzas mecánicas de atracción o repulsión en función del sentido de las mismas.

Esta fuerza es directamente proporcional al cuadrado de la intensidad e inversamente proporcional a la distancia entre ambas.

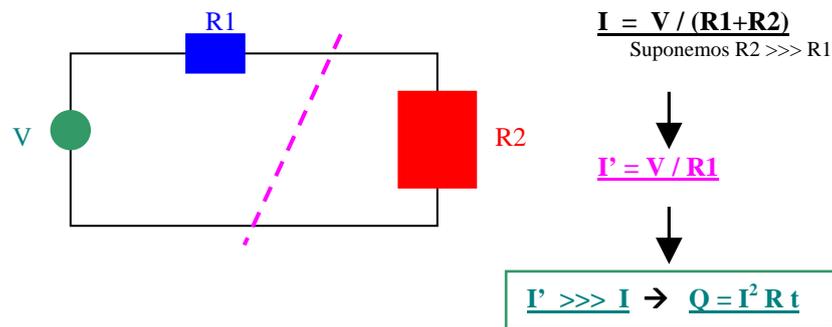
Dichas fuerzas de atracción y repulsión causan fatiga a los conductores que junto con el propio envejecimiento del material aislante y posibles variaciones en la temperatura para la cual han sido diseñados, pueden degradarlos de tal forma que aparezcan pequeñas fisuras y favorezcan el origen de un futuro cortocircuito o arco serie.

La fotografía 6.13 muestra este tipo de fisuras ocasionadas en una manguera eléctrica constituida por tres conductores. Si el tamaño de estas grietas aumenta se podría dar el caso que los aislantes pierdan su efectividad y acaben entrando en contacto dos o más hilos conductores, produciéndose un cortocircuito entre estos.



*Fotografía 6.13 – Resaltadas en rojo, se aprecian dos fisuras en el aislante de uno de los conductores eléctricos que constituyen la manguera. Las probabilidades de que se acabe ocasionando un cortocircuito en esta zona aumentan.*

Un cortocircuito se puede definir como el cierre de un circuito en un punto entre dos conductores o un conductor y tierra.



En el punto de contacto se pueden alcanzar temperaturas superiores a los 3.000°C, las cuales superan con creces las temperaturas de fusión de los conductores metálicos más frecuentes: cobre ( $T^a$  fusión = 1.083°C) y aluminio ( $T^a$  fusión = 656°C).

El cortocircuito funde los conductores en el punto donde sucede el cierre del circuito, y es frecuente encontrar en el conductor pequeñas protuberancias solidificadas en forma de gotas o perlitas.

Estas perlitas se distinguen claramente respecto al resto del conductor que no ha fundido, tal y como se mostraban en la fotografía 6.6.

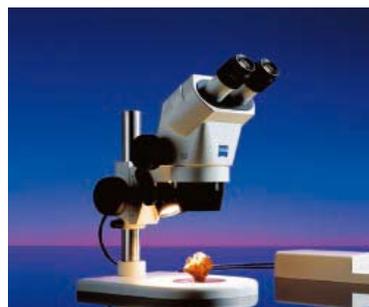
También es frecuente que durante el cortocircuito se produzcan proyecciones del metal fundido sobre los enseres próximos al punto donde se origina.

Objetivo:

- Detectar la ocurrencia de un cortocircuito en base a los defectos superficiales causados sobre los conductores en los que se originó.

Procedimiento:

- Reproducir los efectos de un cortocircuito sobre un conductor.
- Observación de los defectos producidos sobre el conductor mediante microscopía óptica, utilizando para ello una lupa estereoscópica marca STEMI 2.000.

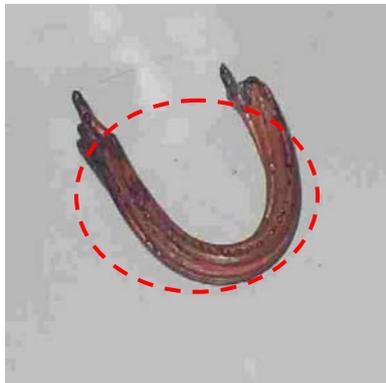


Fotografía 6.14 - Lupa estereoscópica STEMI 2000

- Observación de los defectos producidos sobre el conductor mediante microscopía electrónica, utilizando para ello un microscopio electrónico de barrido marca JEOL, modelo JSM-6400

### Resultados obtenidos:

- Tal y como se observa en las fotografías 6.15 y 6.16, la temperatura alcanzada como consecuencia del efecto Joule (recordemos;  $Q=I^2 R t$ ) fue lo suficientemente elevada como para provocar la fusión y posterior soldadura entre los hilos conductores.
- Esta soldadura, así como la presencia de gotas (también denominadas comúnmente *perlitas*) de cobre fundido, son detectables por el ojo humano.



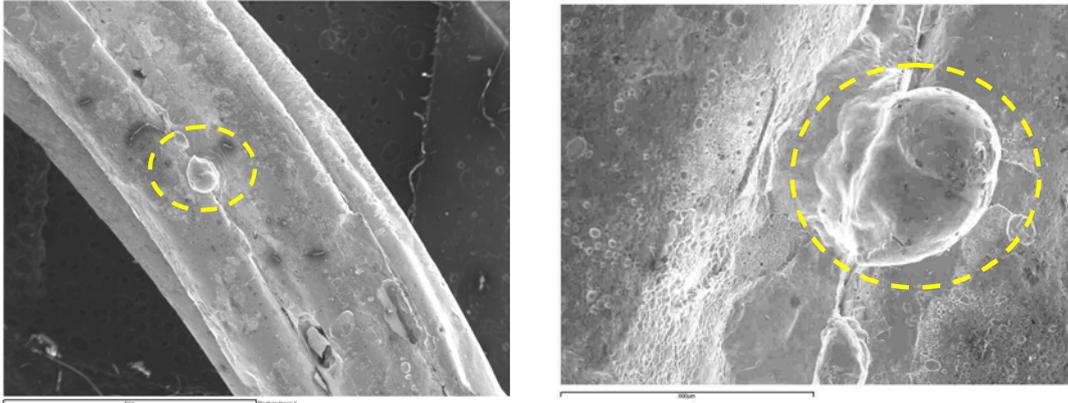
Fotografías 6.15 y 6.16 – Soldadura entre los hilos conductores como consecuencia de su fusión debido a la temperatura generada por el cortocircuito. Fotografías obtenidas con una cámara fotográfica digital.

- Las imágenes obtenidas con la lupa estereoscópica STEMI 2000 (fotografías 6.17 y 6.18), muestran claramente la soldadura de los cinco conductores, así como las *perlitas* de cobre generadas:



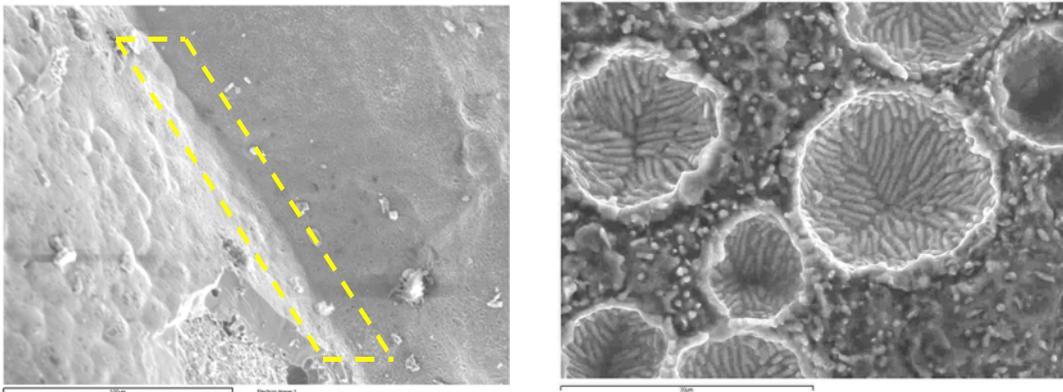
Fotografías 6.17 y 6.18 – Obtenidas mediante una lupa estereoscópica, muestran tanto la soldadura producida entre los hilos conductores, así como las *perlitas* (en forma de gotas oscuras) creadas por la fusión del cobre

- En las imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6400 (fotografías 6.19 y 6.20), se distinguen las *perlitas* de cobre generadas entre los hilos conductores como consecuencia de la fusión de estos.



Fotografías 6.19 y 6.20 – Obtenidas mediante el microscopio electrónico de barrido, muestran las *perlitas* de cobre (resaltadas en amarillo) generadas por la fusión de este material como consecuencia del cortocircuito

- Con la ayuda del microscopio electrónico de barrido, también se pudo apreciar con claridad las uniones por soldadura entre los hilos conductores (fotografía 6.21), así como detectar la presencia de varias lesiones microscópicas que aparecieron sobre la superficie de los mismos tras su solidificación (fotografía 6.22).



Fotografías 6.21 y 6.22 – Obtenidas mediante el microscopio electrónico de barrido, la fotografía de la izquierda muestra la región de soldadura entre dos hilos conductores (resaltada en amarillo). La fotografía de la derecha muestra varias lesiones superficiales del cobre generadas por la fusión y posterior solidificación del mismo.

- El análisis de composición química mediante EDX (*Energy Dispersive X-Ray Analysis*) realizado con el microscopio electrónico de barrido, confirmó la presencia de óxido en las muestras analizadas (figura 6.23).

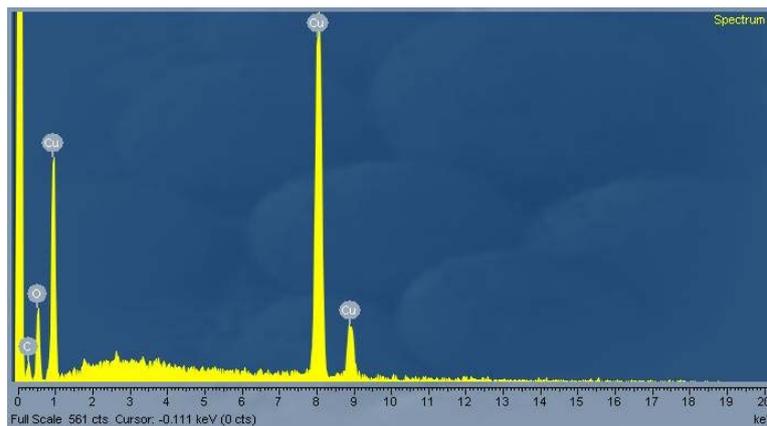
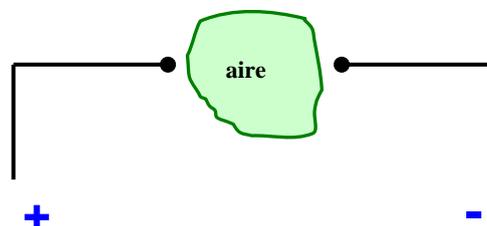


Figura 6.23 – El análisis de composición química mediante EDX realizado con el microscopio electrónico de barrido detectó la presencia de cobre y oxígeno. Este último confirmó la oxidación de los conductores analizados.

### 6.4.3. Arco eléctrico

#### Introducción:

Podemos definir de forma sencilla un arco eléctrico como el paso de una corriente a través de un gas (por ejemplo el aire), el cual en condiciones normales es aislante.



Si las moléculas de aire se disocian, el mismo queda ionizado (habrá electrones libres) y se volverá conductor.

A mayor temperatura ambiente, mayor ionización (más choques entre iones) y por tanto más conductor se volverá el aire.

La corriente que circula por el arco eléctrico es equivalente a la de un cortocircuito y la temperatura que se suele alcanzar ronda los 3.000°C (superior a las temperaturas de fusión del cobre –1.083°C- y del aluminio –650°C-).

El arco eléctrico es explosivo (sonoro) ya que ocurre de forma súbita. El 40% de su energía se convierte en irradiación de calor, por lo que suele producir quemaduras importantes en las personas que se encuentren próximas.

El arco eléctrico tiene tendencia a desplazarse: el gas ionizado al calentarse se expande y si llega un momento en que no puede expandirse más (por estar confinado) se acabará creando una sobrepresión que en ocasiones será suficiente como para deformar elementos próximos (por ejemplo puertas metálicas en cuartos donde se ubican los transformadores).

El método más adecuado para detener un arco eléctrico es enfriando ya que de esta forma se des-ioniza el aire.

Tras el enfriamiento es frecuente encontrar restos de los conductores (en forma de pegotes) por las proximidades.

#### Objetivos:

- Reproducir un arco eléctrico en laboratorio para una mejor comprensión del fenómeno.
- Detectar la ocurrencia de un arco eléctrico en base a los efectos destructivos causados sobre los conductores en los que se originó.

#### Procedimiento:

- Mediante una estación transformadora (E.T.) de media tensión, reproducir el fenómeno del arco eléctrico.

#### Resultados obtenidos:

- A medida que se iba ionizando el aire existente entre los dos bornes, se escuchaba un zumbido cada vez más fuerte.
- Finalmente el aire se volvía suficientemente conductor como para producirse de forma súbita el arco eléctrico entre los bornes de la E.T. (ver fotografías 6.24 y 6.25)



Fotografías 6.24 y 6.25 – Reproducción del arco eléctrico generado en laboratorio con la ayuda de una E.T. Tras la ionización del aire, este actúa como conductor entre los bornes. Obsérvese la espectacularidad visual del fenómeno

- He podido comprobar la gran capacidad de destrucción del arco eléctrico sobre los bornes de una estación transformadora (E.T.) entre los cuales se dio dicho fenómeno (ver fotografía 6.25).



*Fotografía 6.25 – El borne de la derecha muestra la geometría inicial de los bornes mientras que en los tres bornes de la izquierda se marcan (en rojo) los efectos destructivos del arco eléctrico.*

- Por otro lado, pude comprobar sobre el terreno la magnitud de los daños causados por un arco eléctrico ocurrido durante la sustitución de la instalación eléctrica de un hotel de la localidad de Escaldes (ver fotografías 6.26 y 6.27). El operario que manipulaba los conductores sufrió quemaduras en la totalidad de su cuerpo.



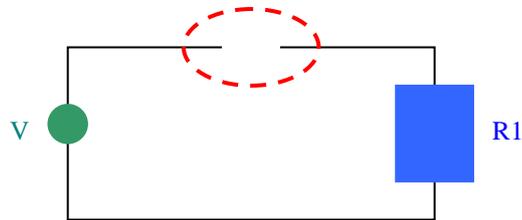
*Fotografías 6.26 y 6.27 – Destrucción total del cuadro eléctrico, mangueras de cobre y revestimientos de los paramentos del compartimento donde se produjo un arco eléctrico*

#### 6.4.4. Arco serie

##### Introducción:

El fenómeno conocido como arco serie es uno de los fallos eléctricos más peligrosos ya que su detección es muy complicada, por ser susceptible de producirse en cualquier punto de la instalación y al no generar sobreintensidad alguna, sino un punto de calor muy localizado, los magnetotérmicos de protección ubicados en los cuadros eléctricos no son capaces de detectarlo y actuar en consecuencia.

Se denomina arco serie al fallo de unión en un circuito eléctrico de forma que los puntos de unión queden lo suficientemente próximos (sin llegar a estar en contacto) como para que se produzca entre ellos un pequeño arco que permita el paso de corriente.

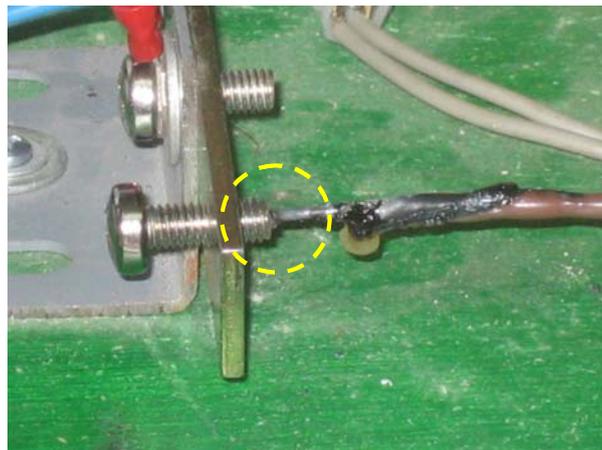


### Objetivos:

- Reproducir un arco serie en laboratorio para una mejor comprensión del fenómeno.
- Detectar la ocurrencia de un arco serie en base a los efectos destructivos causados sobre los conductores en los que se originó.

### Procedimiento:

- Montaje en laboratorio de un pequeño circuito eléctrico, el cual se cerraba mediante un tornillo que fijado sobre un bastidor permitía jugar con la distancia que lo acercaba o separaba del hilo conductor (ver fotografía 6.28). Con un termógrafo de infrarrojos se midió la temperatura alcanzada en ese punto de contacto donde se reprodujo el fenómeno del arco-serie.

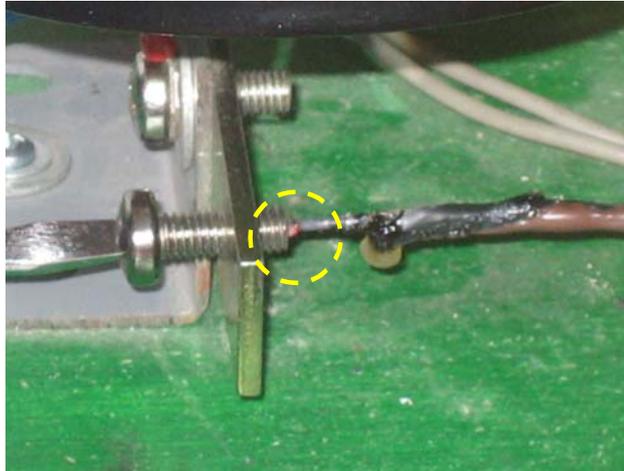


Fotografía 6.28 – Resaltado en amarillo, el punto de cierre de circuito donde se reprodujo el arco serie

- Observación de los defectos producidos sobre el conductor mediante microscopía electrónica, utilizando para ello un microscopio electrónico de barrido marca JEOL, modelo JSM-6400

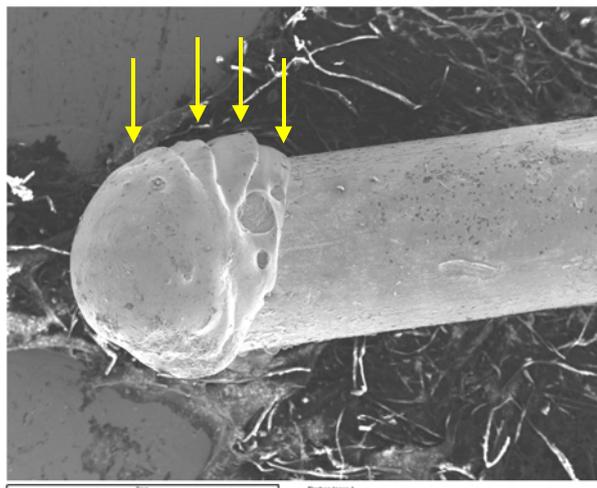
### Resultados obtenidos:

- Durante la reproducción del fenómeno del arco-serie, en el momento en que se producía la discontinuidad entre el tornillo y el hilo conductor (apertura del circuito), se producía una incandescencia entre ambos (ver fotografía 6.29) que con la ayuda de un termógrafo se traducía en una temperatura superior a los 140°C.



*Fotografía 6.29 – Resaltado en amarillo, el punto de incandescencia generado al separar el tornillo del conductor. La temperatura alcanzada en ese punto llegó a los 140 °C*

- **Nos encontramos por tanto ante un foco de calor que puede perfectamente ser el origen de un incendio.**
- En la imagen obtenida con el microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6400 (fotografía 6.30), se observaron los defectos superficiales con morfología esférica resultantes del arco-serie.



*Fotografía 6.30 – Imagen obtenida con microscopía electrónica donde se aprecian los defectos superficiales ocasionados en el punto donde se produjo el arco-serie*

## **CONCLUSIONES**

He podido comprobar la existencia de multitud de factores que pueden intervenir en el origen y propagación de un incendio.

De cara a la investigación de incendios, es por tanto fundamental el conocimiento de los fenómenos más habituales susceptibles de ser los focos de calor que los originan, ya que cada uno de estos deja una serie de vestigios que con paciencia y con la experiencia que da el tiempo invertido en sus análisis, junto con las huellas que dejará el humo y el frente de llama en su propagación, permitirán que se pueda establecer una secuencia lógica de lo ocurrido para de esta forma llegar a dictaminar el origen, causas y circunstancias en que se produjo el incendio.

A tal efecto, durante el desarrollo de este proyecto de fin de carrera se han desarrollado las siguientes etapas:

- ✓ Conocimiento de la **naturaleza del fuego** y los elementos imprescindibles que deben estar presentes para que se pueda producir (triángulo del fuego: combustible, comburente y energía de activación).
- ✓ Conocimiento de los **mecanismos de extinción y agentes** extintores más frecuentes (agua, polvos químicos, CO<sub>2</sub>, espumas, etc...).
- ✓ Conocimiento de la **dinámica del fuego**, desde que este se origina hasta el *flashover* (fenómeno por el cual se generaliza de forma súbita el fuego sobre todos los elementos combustibles presentes).
- ✓ Identificación de las **huellas y vestigios** dejadas por el fuego y el humo en el escenario del incendio (focos primarios y secundarios: "V" invertida dejada por la llama, cono de ataque del calor, etc...).
- ✓ Estudio de los efectos del fuego sobre las **estructuras de hormigón**, realizando para ello **ensayos de compresión y ultrasonidos** los cuales **demonstraron su utilidad como técnicas complementarias para la investigación de incendios**.
- ✓ Reproducción en laboratorio de los **fallos eléctricos** más comunes causantes de incendios (cortocircuitos, arcos eléctricos y arcos serie, fatiga de conductores, uniones defectuosas, etc...). Las **microscopías estereoscópica y electrónica** se han mostrado como **herramientas muy útiles en este campo de investigación**.

Hubiese sido interesante disponer de más recursos para profundizar un poco más en el trabajo realizado, no obstante considero que se han puesto los cimientos para en un futuro llegar a manejar con cierta solvencia las diferentes técnicas de investigación de incendios, así las diferentes posibilidades que ofrece la tecnología existente como complemento a las técnicas tradicionales.

Mario Anero Cárcamo

## **BIBLIOGRAFÍA**

Curso básico de incendios (Catalana Occidente)

Curso de protección contra incendios (TEPESA)

Origen y causa de los incendios. C. Phillips y D. McFadden (Ed. Mapfre)

Reglas técnicas de CEPREVEN

Normas UNE 23-110 y siguientes (EXT-s), UNE 23-402-89 y UNE 23-403-89 (BIE-s), UNE 23-406-90 y UNE 23-407-90 (CHE-s), UNE 23-007 y siguientes (DET-s), UNE 23-590 y siguientes (ROC-s).

Curso Superior de Prevención de Riesgos Laborales (CEREM)

Introducción a la Ciencia e Ingeniería de Materiales. W.D.Callister (Ed. REVERTÉ)

La estructura metálica hoy. R.Arguelles. (Ed. Librería Técnica Bellisco)

Guía básica de investigación de incendios (Colegio de ingenieros técnicos industriales de Barcelona)

Dinámica del fuego. V. Pons.

Documentación diversa relacionada con el sector de la prevención de incendios disponible en internet (de fácil acceso a través de [www.google.com](http://www.google.com))

## **RESÚMEN**

Existe un desconocimiento generalizado sobre los incendios y las causas y circunstancias en que se originan y desarrollan.

El motivo sin duda, se debe a la falta de medios humanos y materiales que se destinan a la investigación de este tipo de siniestros.

Los **objetivos de este proyecto** de fin de carrera, son los siguientes:

- Comprender la naturaleza y dinámica del fuego.
- Comprobar la utilidad de una serie de herramientas y técnicas (ensayos de ultrasonidos y compresión así como el empleo de la microscopía óptica y electrónica) de cara a obtener información complementaria que permita determinar el origen de un incendio.
- Dado que aproximadamente el 70% de los incendios investigados tienen como causa el origen eléctrico, se profundiza en este campo, reproduciendo en laboratorio los fallos eléctricos más comunes y determinando mediante el análisis microscópico de varios conductores si la fuente de calor que los afectó era interna debida a un fallo eléctrico o bien se trata de una fuente de calor externa al conductor, al encontrarse éste en el escenario del incendio.

En todo caso, este PFC debe ser un punto de partida de la disciplina de la investigación de incendios y debe complementarse con la práctica y la experiencia que esta aporte al técnico investigador.