

SISTEMAS ALTERNATIVOS PARA EXTINCIÓN Y PREVISIÓN DE INCENDIOS (POLVO QUÍMICO)

DEPARTAMENTO DE RESTAURACIÓN DEL MUSEO THYSSEN-BORNEMISZA

1.- Introducción y objetivos del estudio:

Los halones son agentes extintores muy conocidos en el campo de la prevención y extinción de incendios, están compuestos por hidrocarburos saturados en los que se han sustituido átomos de hidrógenos por átomos de halógenos como fluor (F), cloro (Cl), bromo (Br) o yodo (I). Entre los productos más empleados están el bromotrifluorometano (Halón 1301), bromoclorodifluorometano (Halón 1211) y dibromotetrafluoretano (Halón 2402). En 1997 fue suscrito un Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, conocido como Protocolo de Kyoto, el cual limita la emisión y vertido de gases contaminantes causantes de la destrucción progresiva de la capa de ozono y del llamado “efecto invernadero”. Entre estos gases están el CO₂, N₂O y halones.

Por otra parte, aún siendo uno de los sistemas para la protección contra incendios más utilizados, y a pesar de la gran capacidad extintora de algunos de estos productos, los halones presentan limitaciones como son: la formación de gases corrosivos en presencia de calor, algunos de estos compuestos son gases altamente tóxicos e irritantes como el ácido bromhídrico y fluorhídrico; no son aptos para la extinción de fuegos con brasas y, por último, sólo pueden ser utilizados en recintos que permanezcan totalmente estancos durante y después de la descarga del producto y que soporten la elevada presión que conlleva la retención de estos gases.

Las alternativas a la utilización de los halones se pueden plantear, de momento, a partir del uso de otros sistemas extintores como son: otros gases, el agua, o los polvos químicos secos. En el primer grupo se encuentran los agentes extintores halocarbonados y los gases inertes; sistemas que se conocen como “sistemas limpios de extinción” ya que no dejan residuos después de su uso. Estos agentes extintores requieren como condición imprescindible, igual que todos los extintores gaseosos, la estanqueidad del

recinto durante y después de la descarga del gas, una alta resistencia del espacio protegido a la presión que ejercen los gases y la detección precoz del fuego. No obstante, hay que señalar que en condiciones de incendio, los agentes halocarbonados que contienen átomos de fluor (F) pueden producir más ácido fluorhídrico que algunos de los halones. En contraposición a éstos, los gases inertes o sus mezclas, utilizados a bajas temperaturas, no parecen producir daños directos sobre los objetos, aunque habría que tener en cuenta que la bajada brusca de humedad relativa que provocan en el ambiente, pudiera ser una causa de deterioro a considerar cuando se trata de obras de arte. De hecho, los métodos de desinsectación de bienes culturales con gases inertes se realizan con un control de la humedad relativa que impide el deterioro de las obras tratadas.

El agua y los polvos químicos secos no se clasifican en el grupo de los agentes extintores limpios, ya que éstos dejan residuos de forma directa y muy significativa sobre los objetos y recintos donde se aplican. El agua, es posiblemente el agente extintor menos tóxico para las personas y, sin duda alguna, uno de los agentes extintores más eficaces en el campo de la protección contra incendios. Sin embargo, ha sido también uno de los factores más estudiados en el campo de la conservación de bienes culturales, siendo las atmósferas húmedas o el agua aplicada directamente sobre los objetos uno de los agentes que pueden propiciar más daños irreversibles a casi todo tipo de obras. Pudiera ser considerada el agua como agente protector de recintos que albergan bienes culturales en aquellos casos donde la extinción de un fuego no sea factible a través de otra vía, debido al alto potencial de incendio del entorno; por ejemplo, colecciones protegidas en casas o museos donde el suelo, el techo y las paredes sean todos de madera y probablemente ningún otro agente extintor sea capaz de evitar la propagación rápida de un fuego.

Actualmente son estimables los posibles efectos que pueden ejercer sobre los bienes culturales los gases inertes y el agua, permitiendo que se tengan en cuenta en la selección y el diseño de los sistemas de prevención y extinción de recintos donde se protejan obras de arte. Sin embargo, los efectos de los polvos químicos secos sobre los bienes del patrimonio artístico no han sido estudiados, debiendo ser esta otra posibilidad un tema de indudable interés en las investigaciones relacionadas con la selección de los sistemas de extinción para museos, archivos y bibliotecas.

La realización de este trabajo parte de la premisa de que los sistemas que se escojan para la prevención y extinción de incendios en museos, archivos, bibliotecas y almacenes de bienes culturales deben aspirar a cumplir las siguientes condiciones:

- 1.- Ser eficaces.
- 2.- Debe ser posible su utilización a partir de un diseño e instalación regulados y normalizados.
- 3.- No deben causar daños irreversibles a las obras
- 4.- No deben ser tóxicos antes, durante, ni después de su aplicación

Es evidente que para que estas condiciones se puedan lograr tiene que intervenir en la selección del sistema de extinción un equipo de profesionales capacitados para responder a cada una de las cuatro exigencias, consideradas todas, en igual magnitud, de trascendental importancia para la salvaguarda del patrimonio artístico expuesto a riesgos de incendios.

Sobre la base de lo expuesto previamente y ante la posibilidad de utilizar en el Museo Thyssen Bornemisza el polvo químico seco ZENITHSPAIN – CDAF, especialmente diseñado para su posible uso en museos, nos proponemos analizar los posibles daños que este compuesto pudiera tener sobre los objetos de esta colección, iniciando el estudio por la pintura ya que es el tipo de obra más abundante en la pinacoteca.

Los objetivos específicos propuestos en este estudio son los siguientes:

- 1.- Conocer la composición cualitativa del producto propuesto como agente extintor.
- 2.- Comprobar si existen cambios en la composición del polvo químico que pudieran inducir procesos de deterioro en las pinturas durante y después de su utilización.
- 3.- Comprobar la presencia de posibles residuos sobre superficies pintadas, habiendo empleado los sistemas de limpieza disponibles después de una aplicación intencionada de polvos químicos.
- 4.- Comparar los daños que pudieran producir los polvos químicos en las pinturas con los que teóricamente pueden provocar otros sistemas que utilizan agua o gases inertes.

2.- Desarrollo experimental

La investigación se proyectó en tres etapas, de forma que se pudiera obtener respuestas a los objetivos planteados:

1ª Etapa: Estudio cualitativo de la composición del producto. Evaluación de posibles cambios en la composición de éste.

Para conocer la composición de los compuestos mayoritarios presentes en el producto se realizaron análisis cualitativos mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y microscopía electrónica de barrido - microanálisis mediante espectrometría por dispersión de energías de rayos X (SEM-EDXS). Los resultados se compararon con la información obtenida del fabricante y de la literatura.

Se realizaron pruebas de descomposición del producto por efecto de la temperatura y la humedad, tanto del material sin utilizar, como del polvo sometido a un tratamiento térmico a la temperatura teórica de descomposición del compuesto mayoritario. La evaluación se realizó a partir de la medida del pH de los gases que pudiera desprender el polvo sometido al calor con temperatura controlada. También se midió el pH de las superficies pintadas (probetas) donde permaneció el polvo a la humedad del ambiente. Esta última prueba se realizó con los residuos del material al cabo de un mes de mantenerse sobre las probetas, sin resguardo, ya que inicialmente el polvo es prácticamente insoluble en agua.

2ª Etapa. Estudio de posibles residuos del polvo químico sobre la superficie de probetas de pintura -con y sin barniz- sometidas a diferentes regímenes de calor.

Para realizar esta etapa del estudio se asumió, de manera convencional, que el sistema de polvos químicos que se pudiera instalar en el museo se podía activar una vez que la temperatura del ambiente alcanzara 100 °C. Por esta razón, se realizaron pruebas a temperaturas inferiores y superiores a este valor, de modo que permitieran comparar los posibles restos de polvo en diferentes situaciones, los rangos de temperatura a los que se trabajó fueron los siguientes:

- 1.- Probetas que no fueron sometidas a ningún régimen de calor (temperatura del ambiente 23 °C medio). Estas probetas servirían de blanco o de referencia respecto a las que fueron tratadas con calor y, además, permitirían estimar el efecto del polvo químico sobre superficies pintadas después de ocurrir un disparo accidental.
- 2.- Probetas sometidas a 50 °C
- 3.- Probetas sometidas a 100 °C
- 4.- Probetas sometidas a 150 °C (temperatura de descomposición del fosfato de amonio monobásico)

En todas las pruebas se utilizaron 6 probetas de 3 x 3 cm (3 barnizadas y 3 sin barnizar) de una pintura al óleo sobre lienzo sin valor histórico, artístico ni cultural, realizada aproximadamente alrededor de 1958. La pintura originalmente no tiene barniz, por esta razón, con fines experimentales se aplicó una película de barniz dammar sobre la mitad del cuadro y se dejó secar durante 30 días.

Las probetas que se sometieron a regímenes de 50 °C - 150 °C se colocaron en una estufa de calentamiento por convección. Una vez alcanzado el valor de temperatura previsto se extendió abundante polvo químico sobre la superficie, se apagó la estufa, y se mantuvieron de esta manera durante un período de 24 horas. Es importante señalar que con esta visión sólo estamos contemplando los efectos del polvo sobre las pinturas ante el inicio de un conato de incendio y la activación inmediata o accidental del sistema de extinción, presumiendo que la temperatura del ambiente no alcanzaría valores superiores a 150 °C una vez activado el sistema de extinción.

Transcurridas 24 horas, las probetas se extrajeron de la estufa y se sometieron a un proceso de limpieza, semejante al que se podría realizar en caso real, consistente en quitar el polvo con una brocha de cerdas finas y posterior aspiración de la superficie.

Después de la limpieza mecánica, las superficies de 3 probetas barnizadas y 3 sin barnizar, seleccionadas aleatoriamente, fueron observadas a través del microscopio electrónico de barrido, realizando microanálisis de las partículas que pudieran corresponder a restos del polvo químico. Las otras 3 probetas de cada tratamiento se dejaron a la temperatura y humedad del ambiente durante 1 mes para medir el pH de la

superficie. Los mismos análisis se realizaron con igual proporción de probetas que no fueron sometidas a regímenes de calor ni al contacto con polvos químicos.

3ª Etapa.- Estudio de posibles residuos del polvo químico sobre la superficie de pinturas sometidas a un simulacro de conato de incendio y extinción con polvos químicos.

La nueva etapa del estudio consiste en realizar, a mayor escala, un fuego provocado y la activación del sistema de extinción con polvos químicos en un local cerrado donde estén expuestas pinturas en las siguientes condiciones:

- 1.- Pintura expuesta sin ninguna protección
- 2.- Pintura protegida en una cámara cerrada, semejante a lo que pudiera ocurrir en aquellas obras localizadas en los contenedores de los almacenes del museo (peines).
- 3.- Pintura expuesta, protegida parcialmente con papel resistente al calor (MYLAR / MELINEX)

En esta etapa del estudio se midió la temperatura del recinto donde se realizó el experimento y también dentro y fuera de la cámara que guardaba una de las pinturas. La medida de la temperatura de la habitación se tomó a partir de un termómetro digital fijado en la parte superior del recinto¹ y la temperatura dentro y fuera de la cámara que contenía la pintura se registró mediante un sistema DataLogger con dos sondas², a intervalos de 10 segundos cada registro.

La cámara empleada para proteger la pintura era metálica con tapa de metacrilato y cierre semi-estanco de neopreno, esta fue aportada por la empresa TEPESA. La caja fue colocada próxima a la fuente de calor, aproximadamente a 1 m de distancia. La metodología del simulacro de incendio fue asimismo propuesta por la empresa CDAF en las instalaciones de TEPESA y se realizó de la siguiente forma:

¹ Sistema colocado en la cámara de pruebas por la empresa CDAF en las instalaciones de TEPESA en Brunete, Madrid

² Mediciones realizadas por la empresa SIT Transportes Internacionales S.A.

1.- Se utilizaron maderas impregnadas en combustible que ardieron hasta que el termómetro del recinto registró 130°C. Este valor fue alcanzado rápidamente, lo que provocó que hubiera que activar el sistema de extinción, manualmente, casi de inmediato. Pensamos que la temperatura que indicaba el termómetro localizado en la parte superior de la habitación no era representativa de la que se había alcanzado en todos los estratos del recinto donde estaban colocados los testigos para las pruebas.

2.- Considerando insuficiente este primer ensayo, se procedió a realizar otro donde se consiguió un aumento más lento de la temperatura a partir de la combustión progresiva de las maderas con fuego de menor intensidad. Una vez que el termómetro localizado en la parte alta del recinto alcanzó la temperatura prefijada (100 °C) fue activado el sistema de extinción con polvos químicos.

También es importante destacar la localización de las pinturas que se utilizaron en los ensayos:

1.- La obra totalmente desprotegida estaba localizada en la parte inferior del local, inclinada sobre la pared, por lo que la masa esparcida del polvo químico podía contaminar tanto el frente como el reverso de la pintura.

2.- El contenedor metálico estaba situado en el suelo, aproximadamente a un metro del foco de incendio.

3.- La pintura parcialmente protegida con papel MYLAR / MELINEX estaba colgada en la pared, a 1,5 m aproximadamente del suelo, más próxima a la altura del termómetro de registro del local.

Después de realizado el simulacro, se eliminó mecánicamente el polvo de las obras, estas fueron trasladadas al taller de restauración del Museo Thyssen Bornemisza y allí se sometieron al sistema de limpieza descrito antes (limpieza mecánica con brocha y aspirador).

Posteriormente se tomaron 4 muestras de cada pintura para ser examinadas mediante SEM-EDXS con el objetivo de localizar posibles residuos y al cabo de tres semanas se midió el pH en la superficie de las obras con el fin de comprobar si había ocurrido algún proceso de formación de ácidos en la superficie.

3.- Equipos y materiales utilizados en el estudio

- 1.- Estufa de calentamiento por convección natural 40 °C – 250 °C. SELECTA
- 2.- Bloque de calentamiento con control de temperatura entre 40 °C y 200 °C.
“Tembloc” - SELECTA
- 3.- Espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR). Perkin Elmer 1600
- 4.- Microscopio electrónico de barrido - microanálisis por dispersión de energías de rayos X (SEM-EDXS). PHILIPS XL 30, ANALIZADOR DX4I.
- 5.- pH metro con electrodo para media en superficie. Crison 507, electrodo 52-07
- 6.- Papel indicador de pH (0 - 14) MERCK
- 7.- Papel MYLAR / MELINEX
- 8.- Sensor para el control de temperatura (SN 00801120) DataLogger con dos sondas de medición³

³ Aportado por la empresa SIT Transportes Internacionales S.A.

4.- Discusión de los resultados:

4.1.- Resultados por etapas

1ª Etapa: Estudio cualitativo de la composición del producto. Evaluación de posibles cambios en la composición de éste.

1.- Composición del producto (polvo químico)

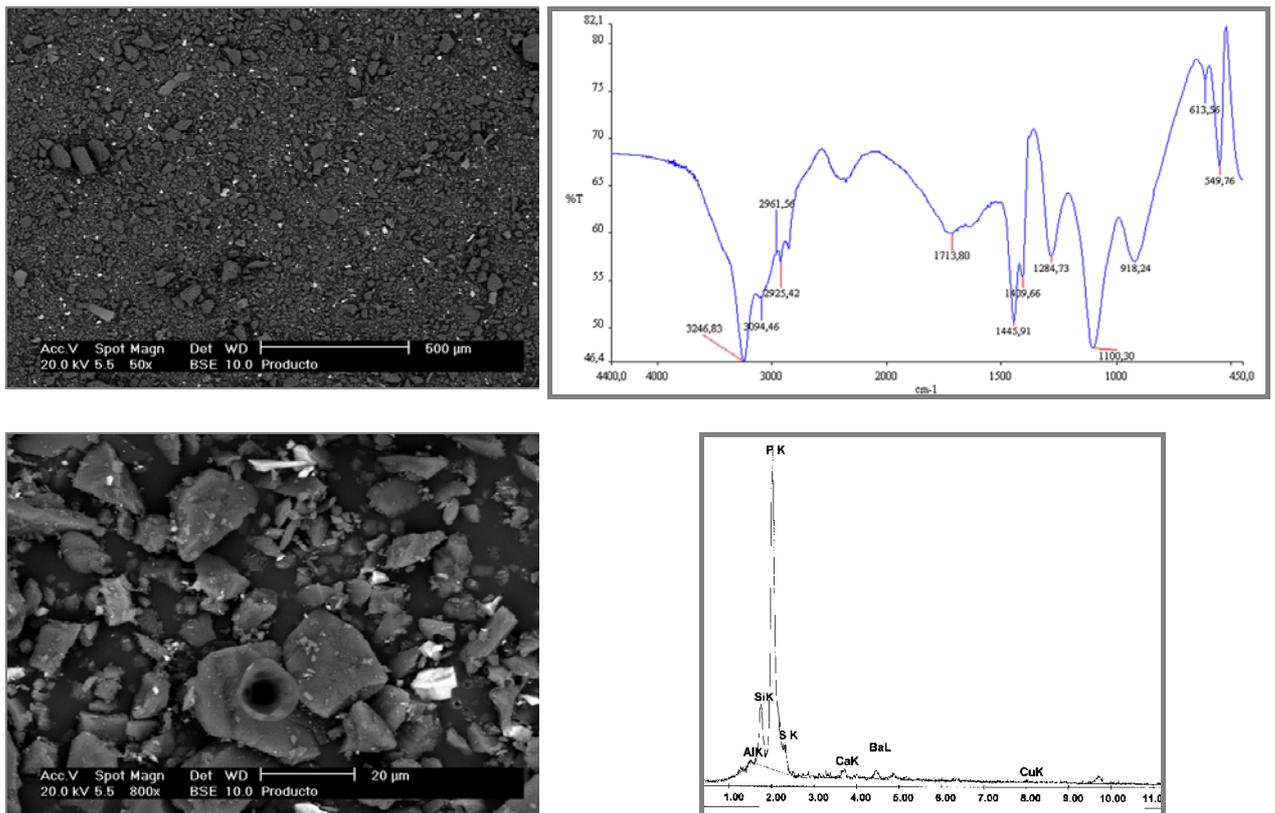


Figura 1.- A la izquierda se observan las imágenes al microscopio electrónico de barrido (BSE) de los granos del producto (50 X – 800 X). A la derecha se muestran los espectros FTIR y EDXS obtenidos del análisis del producto

El producto está compuesto básicamente por fosfato de amonio monobásico, además, compuestos de silicio, sulfatos y sulfato de bario

Las principales propiedades del fosfato de amonio monobásico se resumen en la siguiente tabla⁴:

<i>Sinónimos</i>	fosfato de amonio monobásico - amonio bifosfato - amonio dihidrógeno fosfato - amonio fosfato primario.
<i>Formula química</i>	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$
<i>Peso molecular</i>	115.03
<i>Grupo químico</i>	compuesto de amonio inorgánico - sal de amonio.
<i>Estado físico</i>	sólido.
<i>Apariencia</i>	cristales o polvos blancos.
<i>Olor</i>	ligero olor ácido.
<i>pH</i>	3.8 - 4.4 (disolución al 5% a 25 °C).
<i>Temperatura de ebullición</i>	no aplicable.
<i>Temperatura de fusión</i>	150 °C (se descompone).⁵
<i>Densidad a 19 °C</i>	1.80 kg / L
<i>Presión de vapor a 20 °C</i>	no aplicable.
<i>Densidad de vapor</i>	no aplicable.
<i>Solubilidad</i>	moderadamente soluble en agua (1 - 10%)

⁴ <http://www.winklerltda.com/msds/AM-0330.htm>

⁵ Otros textos indican un valor de temperatura de 200 °C para el fosfato de amonio dibásico

Resultados de los ensayos realizados para evaluar la estabilidad del producto ante el calor y el agua

	<i>Polvos sin calentamiento previo</i>	<i>Polvos que fueron empleados en ensayos de calentamiento en estufa entre 50 °C y 200°C</i>
<i>emisión de gases con pH básico al calentar entre 150°C y 200°C</i>	pH alcalino	pH alcalino
<i>formación de compuestos ácidos</i>	el pH de la superficie varió de 5,4 a 5,0	el pH de la superficie pintada varió de 5,2 a 4,4

Se observó que tanto los polvos que nunca habían sido utilizados, como los que habían sido empleados en algún ensayo previo con calor eran capaces de emitir gases con un pH básico, posiblemente amoníaco, cuando se calentaron entre 150 y 200 °C.⁶

También hubo una tendencia a la disminución del pH de la superficies pintadas que mantuvieron restos de polvos químicos. La formación de ácidos parece ser más acusada en aquellas en las que los polvos químicos han sufrido un proceso de calentamiento.

⁶ Agradecemos a la Dra. Carmen Muro la repetición y comprobación de este resultado en el laboratorio del Museo Reina Sofía

2ª Etapa. Estudio de posibles residuos del polvo químico sobre la superficie de probetas de pintura -con y sin barniz- sometidas a diferentes regímenes de calor.

1.- Probetas que no fueron sometidas a ningún régimen de temperatura

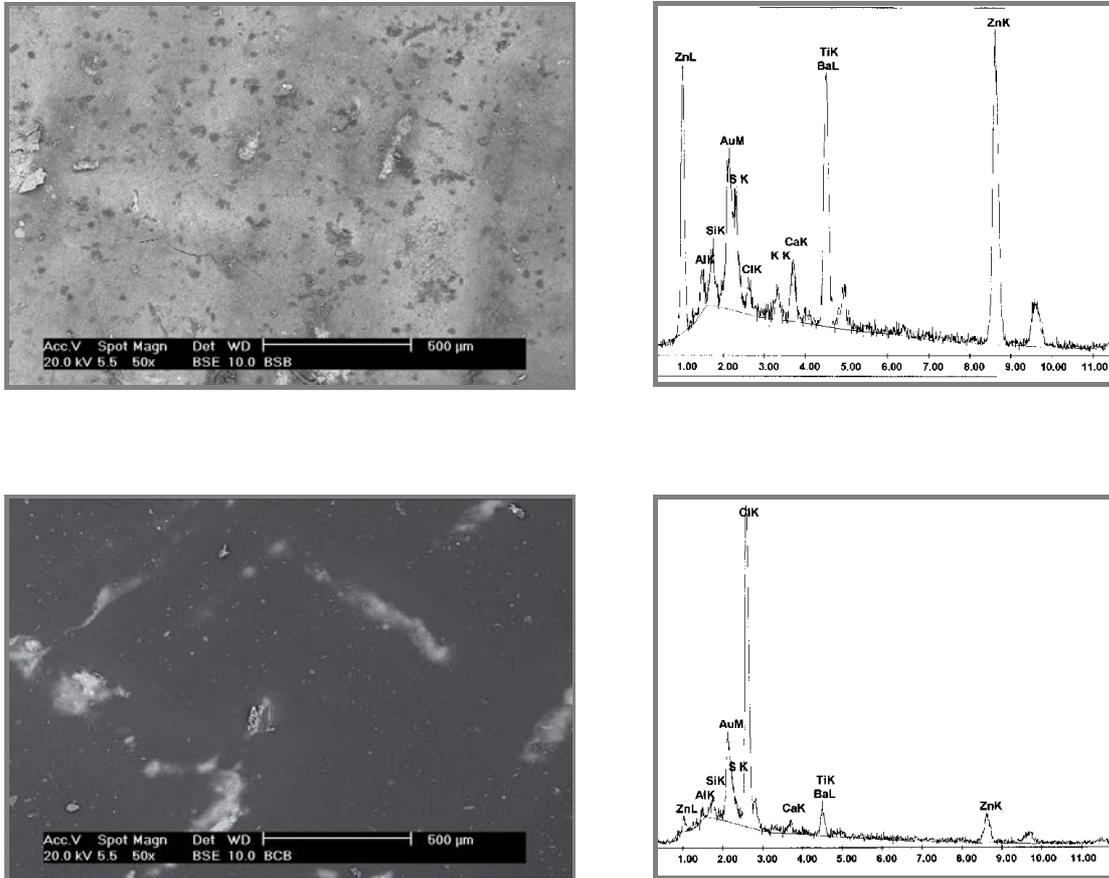


Figura 2 a.- A la izquierda. Imágenes al microscopio electrónico de barrido de las superficies de las probetas que no han sido tratadas (sin barniz en la parte superior y con barniz en la inferior)

Figura 2 b.- A la derecha. Espectros EDX obtenidos de los análisis realizados sobre las superficies de las muestras sin tratar (sin barniz en la parte superior y con barniz en la inferior)

Se han obtenido espectros de la composición de la pintura en los que no se identifica fósforo (P), permitiendo así la posterior comprobación mediante este método de la presencia de fósforo en las muestras tratadas con fosfato de amonio

2.- Muestras tratadas a 50 °C y posterior adición del agente extintor

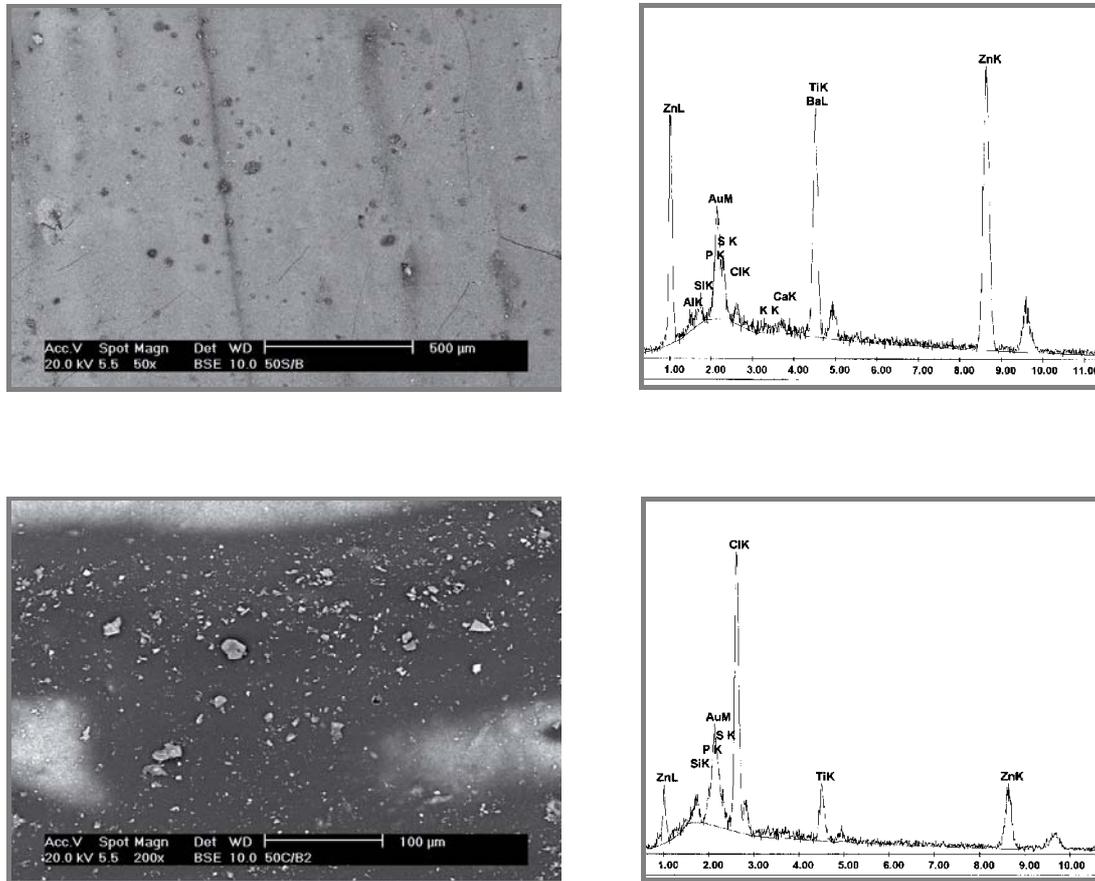


Figura 3 a. A la izquierda. Imagen obtenida al microscopio electrónico de barrido de las probetas tratadas a 50° C y con el fosfato de amonio (sin barniz en la imagen superior y con barniz en la inferior).

Se puede observar una mayor proporción de residuos en la muestra barnizada

Figura 3b.- Espectros EDX obtenidos de los análisis realizados sobre la superficie de las muestras. En ambos casos se detecta fósforo (P) confirmando la presencia de residuos de fosfato de amonio

Se pudo comprobar que en los dos casos quedaron residuos de fosfato de amonio después de realizar la limpieza. En la muestra con barniz la presencia de residuos es mayor

3.- Muestras tratadas a 100° C y posterior adición del agente extintor

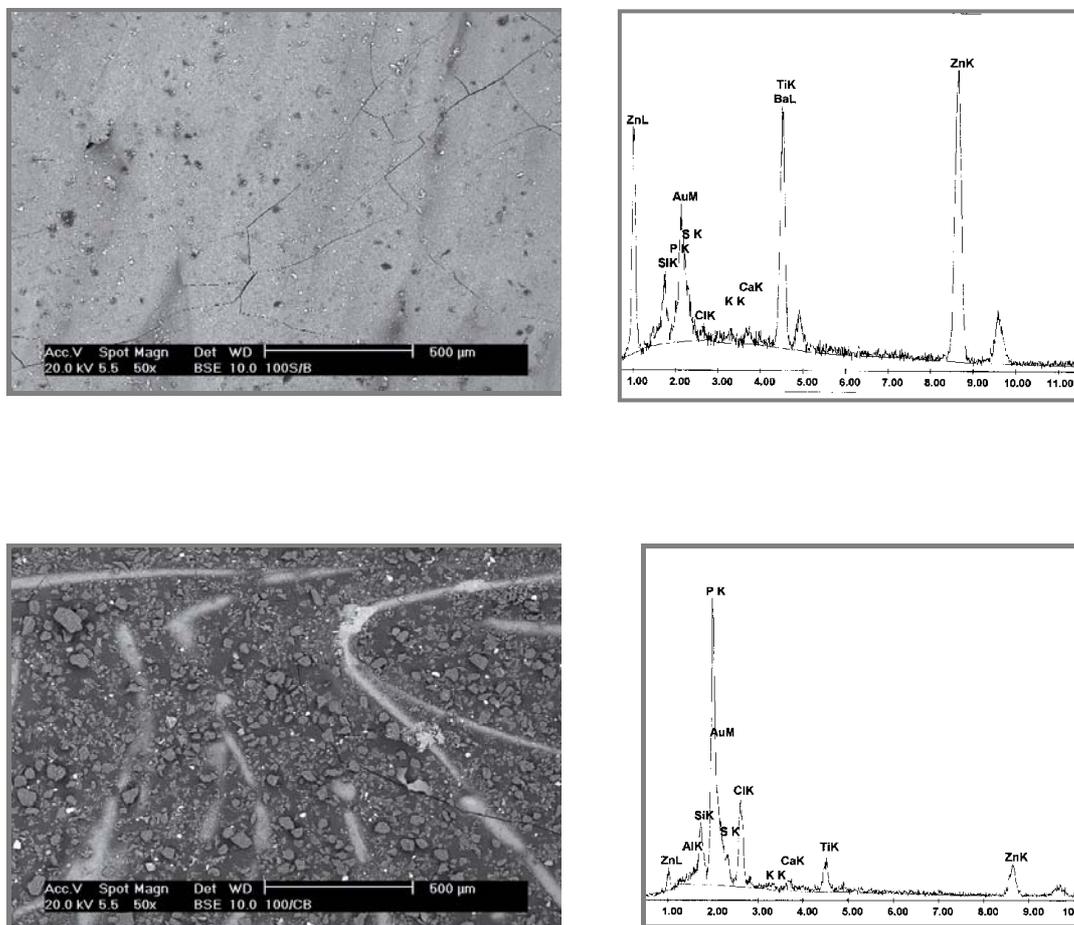


Figura 4 a. A la izquierda. Imagen obtenida al microscopio electrónico de barrido de las probetas tratadas a 100° C y con el fosfato de amonio (sin barniz en la imagen superior y con barniz en la inferior).

Se puede observar una mayor proporción de residuos en la muestra barnizada

Figura 4 b.- Espectros EDX obtenidos de los análisis realizados sobre la superficie de las muestras. En ambos casos se detecta fósforo (P) indicando la presencia de residuos de fosfato de amonio

Se pudo comprobar que en los dos casos quedaron residuos de fosfato de amonio después de realizar la limpieza. En la muestra con barniz la presencia de residuos es significativamente mayor

4.- Muestras tratadas a 150° C y posterior adición del agente extintor

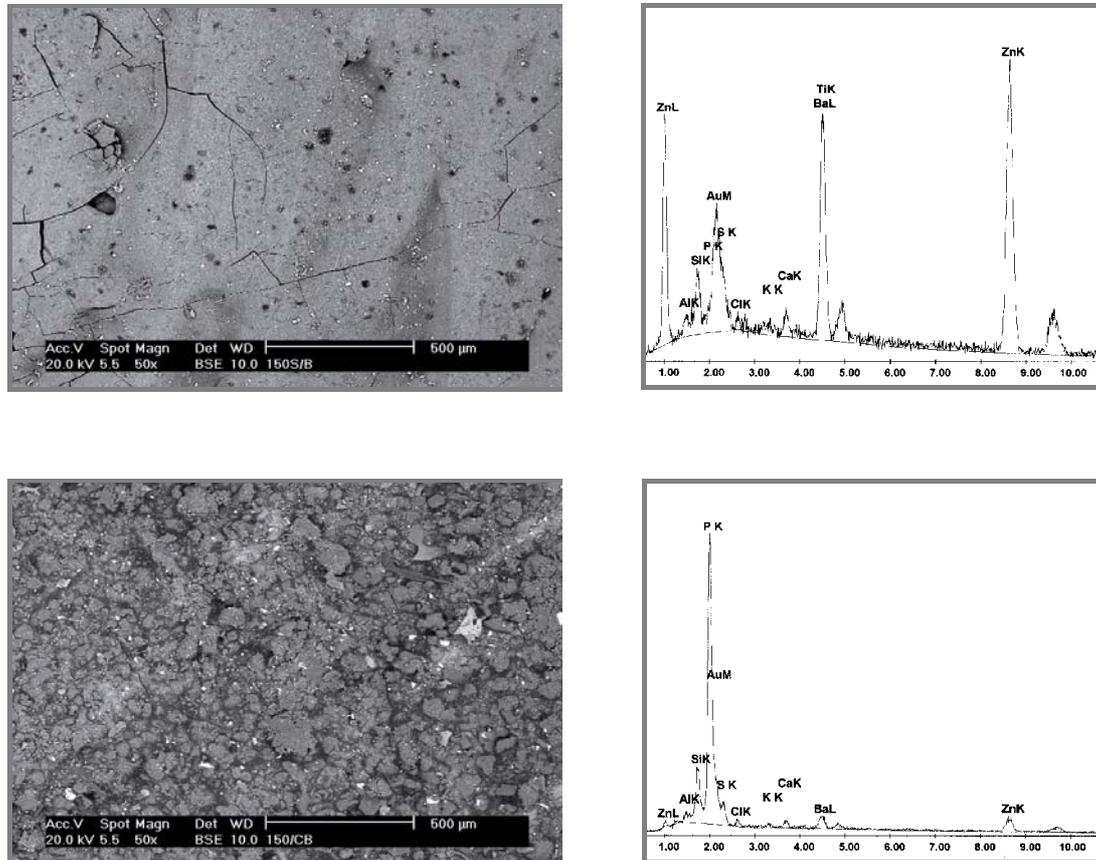


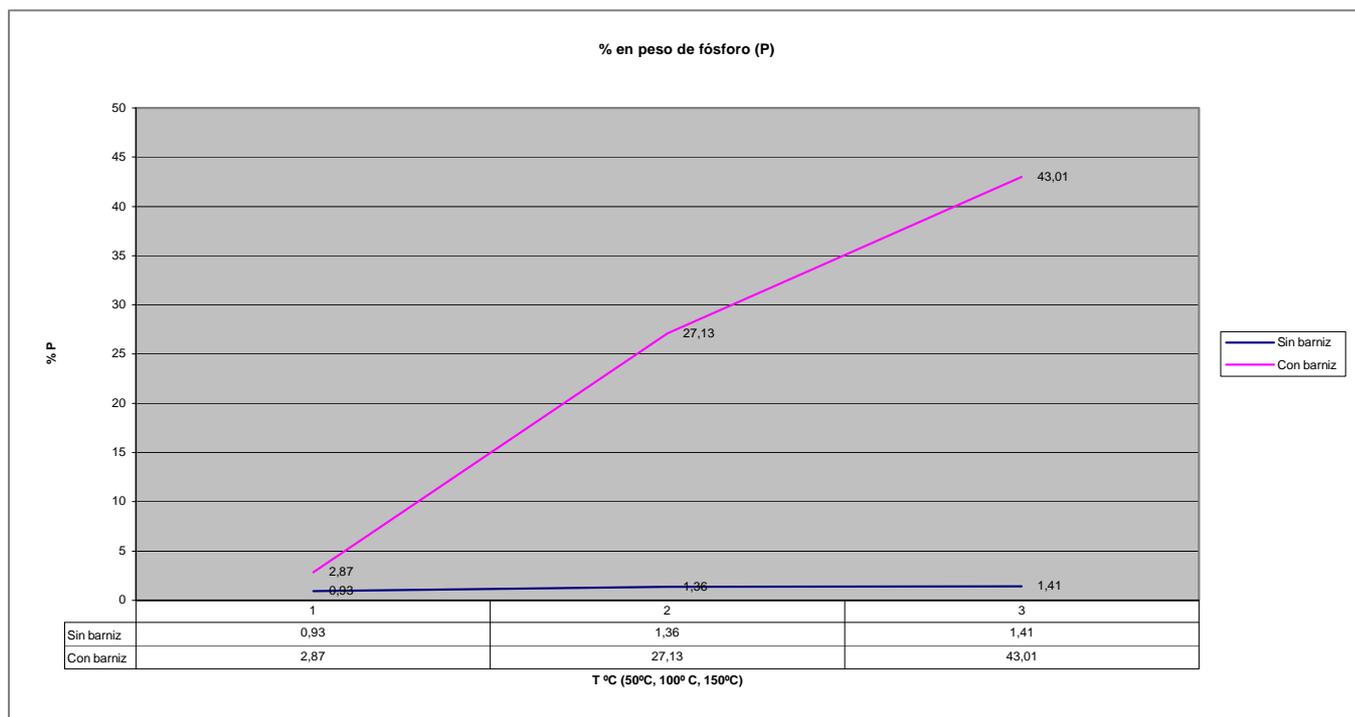
Figura 5 a. A la izquierda. Imagen obtenida al microscopio electrónico de barrido de las probetas tratadas a 150° C y con el fosfato de amonio (sin barniz en la imagen superior y con barniz en la inferior).

Se puede observar una mayor proporción de residuos en la muestra barnizada

Figura 5b.- Espectros EDX obtenidos de los análisis realizados sobre la superficie de las muestras. En ambos casos se detecta fósforo (P) indicando la presencia de residuos de fosfato de amonio

Se pudo comprobar que en los dos casos quedaron residuos de fosfato de amonio después de realizar la limpieza. En la muestra con barniz la presencia de residuos es significativamente mayor, como indica la gran señal de fósforo que muestra el espectro EDX

Análisis semi - cuantitativo de los residuos de fósforo (P) presentes en la superficie de las muestras



El análisis semi cuantitativo de la proporción de fósforo presente en la superficie de las muestras permitió comprobar que en todos los casos quedaban residuos del producto. En las pinturas sin barniz esta proporción varió en un 0,48 % entre la temperatura más baja y la más alta. Sin embargo, el incremento de fósforo en las muestras barnizadas fue de un 40,14 % entre los límites de temperatura empleados.

Los resultados anteriores indican que quedan residuos del producto sobre la superficies de las pinturas, especialmente si estas están barnizadas. Es importante destacar que estas pruebas se han realizado en condiciones extremas de aplicación del polvo, es decir, sobre probetas en posición horizontal, lo cual favorece el depósito del producto sobre las superficies y, con una aplicación directa y abundante sobre las mismas, cuando en los casos reales el polvo quedaría disperso en el ambiente. De cualquier manera, lo que queremos comprobar es el potencial que puede tener el polvo químico de adherirse a películas que pueden reblandecer con el calor, como son las capas de pintura y los recubrimientos, especialmente después de haber comprobado que a temperaturas entre 150°C y 200°C éste producto presenta signos de descomposición.

3ª Etapa.- Estudio de posibles residuos del polvo químico sobre la superficie de pinturas sometidas a un simulacro de conato de incendio y extinción con polvos químicos.

1.- Análisis de la superficie de la pintura sometida a simulacro de incendio y posterior extinción con polvos químicos. Obra sin protección.

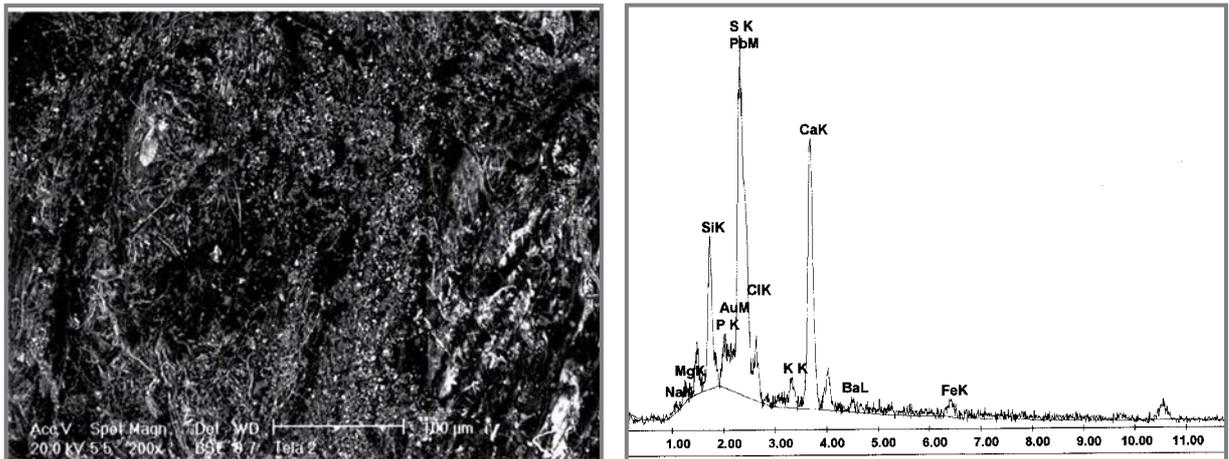


Figura 6 a. A la izquierda. Imagen obtenida al microscopio electrónico de barrido de una muestra tomada de la pintura que no tuvo protección. Se puede observar que existen pequeños residuos del polvo sobre la superficie una vez aspirada

Figura 6 b.- Espectro EDX obtenido del análisis realizado sobre los granos depositados sobre de la superficie de la muestra. Se detecta fósforo (P) indicando la presencia de residuos de fosfato de amonio

Se ha podido comprobar que sobre la superficie de la pintura no protegida, situada en posición vertical, también han quedado pequeños residuos del polvo químico una vez aspirada

2.- Análisis de la superficie de la pintura sometida a simulacro de incendio y posterior extinción con polvos químicos. Obra protegida en una cámara semi-estanca

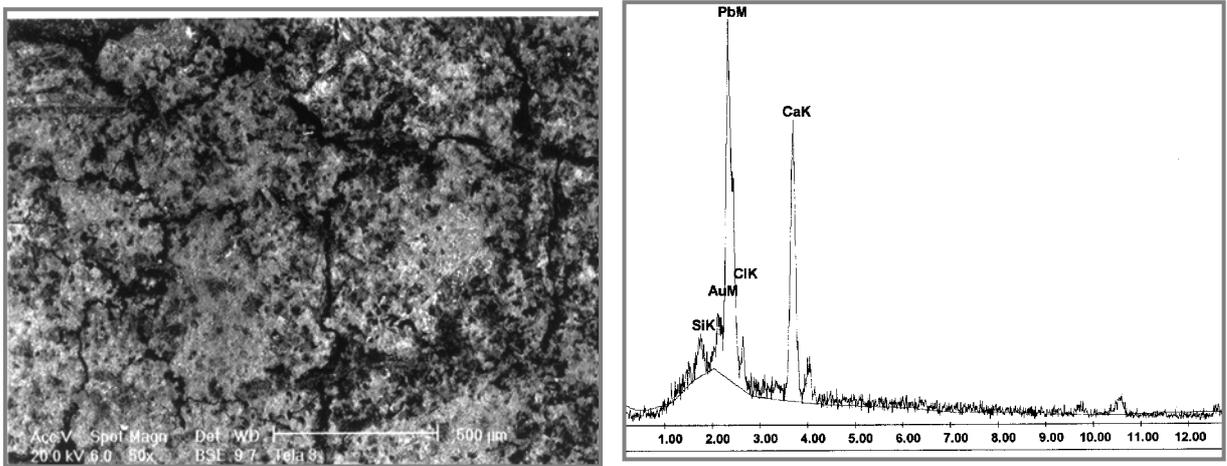


Figura 7 a. A la izquierda. Imagen obtenida al microscopio electrónico de barrido de una muestra tomada de la pintura protegida en cámara semi-estanca. No se observan restos del fosfato de amonio sobre la superficie

Figura 7 b.- Espectro EDX obtenido del análisis realizado sobre la superficie de la muestra. No se detecta fósforo sobre la superficie

Se ha podido comprobar que sobre la superficie de la pintura protegida en cámara estanca no quedan restos del polvo químico una vez aspirada

3.- Análisis de la superficie de la pintura sometida a simulacro de incendio y posterior extinción con polvos químicos. Obra parcialmente protegida con papel MYLAR / MERLINEX (Zona desprotegida)

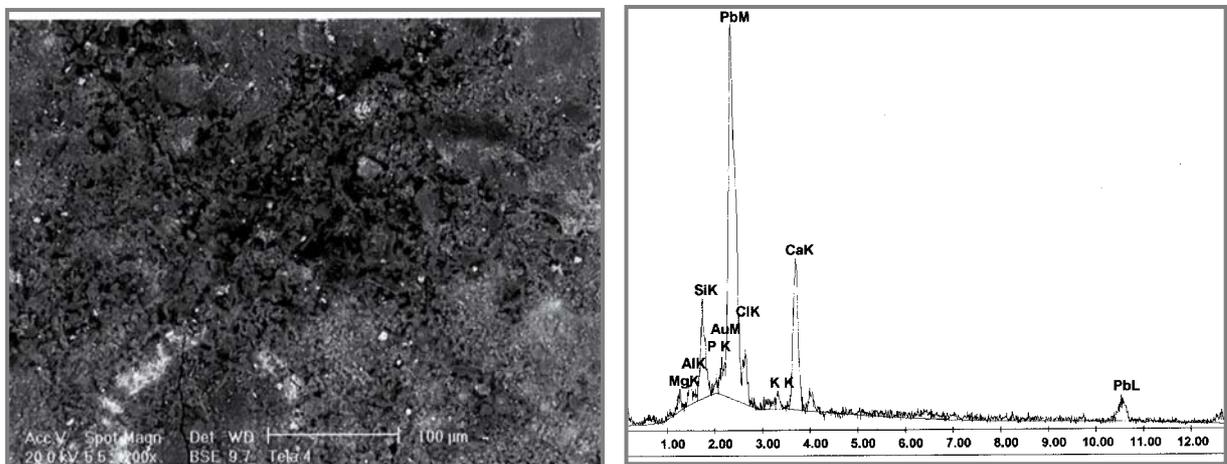


Figura 8 a. A la izquierda. Imagen obtenida al microscopio electrónico de barrido de una muestra tomada de la pintura parcialmente protegida con papel MYLAR / MELINEX (zona no protegida). Se puede observar que existen pequeños residuos del polvo sobre la superficie una vez aspirada

Figura 8 b.- Espectro EDX obtenido del análisis realizado sobre los granos depositados sobre la superficie de la muestra. Se detecta fósforo (P) indicando la presencia de residuos de fosfato de amonio

Se ha podido comprobar que en la zona no protegida, situada en posición vertical, también han quedado pequeños residuos del polvo químico una vez aspirada

3 a.- Análisis de la superficie de la pintura sometida a simulacro de incendio y posterior extinción con polvos químicos. Obra parcialmente protegida con papel MYLAR / MERLINEX (Zona protegida)

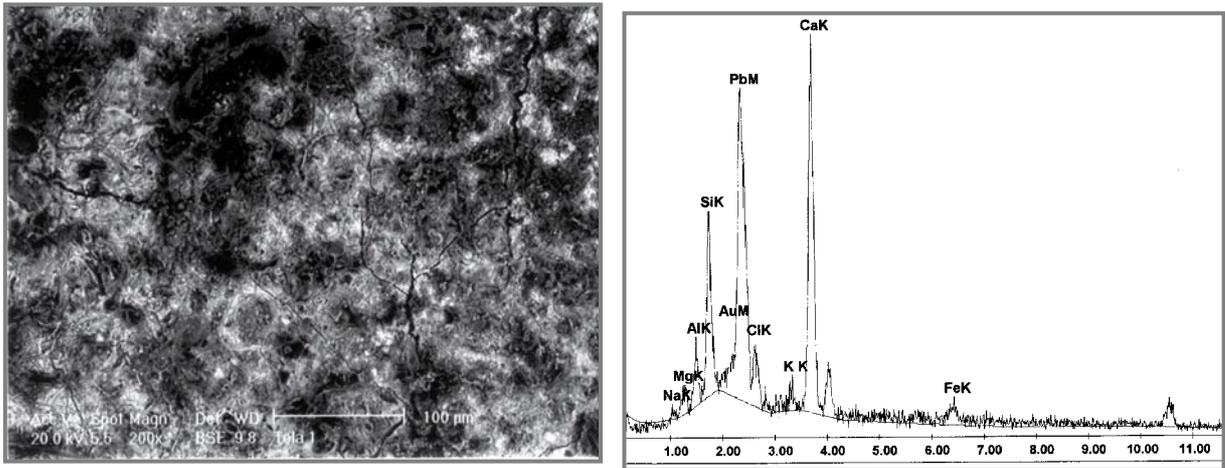


Figura 9 a. A la izquierda. Imagen obtenida al microscopio electrónico de barrido de una muestra tomada de la pintura parcialmente protegida con papel MYLAR / MELINEX (zona protegida). Se puede observar que no existen residuos del polvo sobre la superficie una vez aspirada

Figura 9 b.- Espectro EDX obtenido del análisis realizado sobre la muestra tomada de la pintura parcialmente protegida con papel MYLAR / MELINEX (zona protegida). No se detecta fósforo (P) sobre la superficie

Se ha podido comprobar que sobre la superficie de la pintura protegida, situada en posición vertical, no han quedado residuos del polvo químico una vez aspirada

En esta fase del estudio se pudo comprobar que pueden quedar pequeños residuos del polvo químico, en pinturas no barnizadas, colocadas en posición vertical y habiendo aplicado el agente extintor en la forma indicada. Sin embargo, si las pinturas están protegidas en recintos semi-estancos, como los peines de almacenajes de la colección, o cubiertas con un material resistente al calor, como el papel MYLAR / MELINEX el riesgo de que queden residuos sobre las pinturas puede disminuir ampliamente. Estas condiciones de protección de las obras no deben afectar su equilibrio térmico e higroscópico con el ambiente

4.2.- Comparación de los daños que pueden producir los polvos químicos en las pinturas con los que teóricamente pudieran provocar otros sistemas que utilizan agua o gases inertes

<i>Daños que pueden ser provocados en las pinturas</i>	<i>Polvos químicos</i>	<i>Agua</i>	<i>Gases inertes⁷</i>
Daños en el bastidor de madera (aplicables al soporte de madera)	hidrólisis ácida de la madera en zonas puntuales, si se sometiera a un alto porcentaje de humedad relativa, esta hidrólisis no entrañaría riesgos en la pérdida de las propiedades mecánicas del bastidor o del soporte	.- hinchamiento y posterior contracción del bastidor o soporte durante el secado .- migración de compuestos solubles de la madera que podrían pasar a la pintura	posible contracción debido a un descenso brusco de la humedad relativa ⁸
Daños en el soporte de tela	.- hidrólisis ácida del soporte en zonas puntuales si se somete a un alto porcentaje de humedad relativa, sí puede entrañar riesgos para la estabilidad del soporte. .- es difícil extraer los residuos que puedan quedar atrapados entre la trama del tejido del soporte con sistemas de aspiración convencional	.- hinchamiento y posterior contracción brusca del soporte de tela durante el secado .- migración de compuestos solubles del soporte de tela que podrían pasar a la pintura .- remoción de los materiales orgánicos solubles en agua próximos al soporte de tela (preparaciones, adhesivos, etc)	posible contracción debido a un descenso brusco de la humedad relativa

⁷ Es importante destacar que existen métodos empleados en la restauración de bienes culturales que se realizan a partir del uso controlado de gases inertes, como es la desinsectación de obras, entre ellas, las pinturas.

⁸ Es conocido que la sustitución del oxígeno por gases inertes en un recinto cerrado produce una disminución considerable de la humedad relativa. Por esta razón, los tratamientos de obras de arte con gases inertes como el nitrógeno, se realizan con un tratamiento simultáneo de humectación controlada. En este caso citamos las posibles consecuencias que pudiera ejercer este descenso de la humedad sobre los materiales constitutivos de las obras, aunque, juega un papel importante la cinética específica de la variación en cada caso, es decir, los daños estarán determinados por el porcentaje del descenso, la velocidad a la que este ocurra, el tiempo de permanencia en el valor mínimo y la velocidad de recuperación a los valores iniciales

<i>Daños que pueden ser provocados en las pinturas</i>	<i>Polvos químicos</i>	<i>Agua</i>	<i>Gases inertes</i>
Daños en la capa de pintura	puede provocar alteraciones químicas en aquellos puntos de la capa de pintura donde quedarán residuos, debido a la reacción con pigmentos sensibles a los compuestos ácidos que se pudieran formar (sólo en obras no barnizadas)	puede hinchar o disolver capas de pintura solubles en agua	no produce daños aparentes sobre las capas de pintura, a no ser los provocados por los posibles movimientos de dilatación y contracción del soporte debido a la variación de la humedad relativa
Daños sobre los recubrimientos	el material es más sensible a fijarse sobre recubrimientos que reblandecen con el calor, la eliminación de estos recubrimientos requiere de personal muy especializado, de procesos lentos y de no pocos riesgos para la capa de pintura	puede redisolverse parcial o totalmente algunos recubrimientos, la eliminación de estos recubrimientos requiere de personal muy especializado, de procesos lentos y de no pocos riesgos para la capa de pintura	no produce daños aparentes sobre los recubrimientos, a no ser los provocados por los posibles movimientos de dilatación y contracción del soporte debido a la variación de la humedad relativa ⁹

⁹ A modo de observación general se puede decir que altos valores de temperatura y humedad pueden favorecer la formación de compuestos de nitrógeno, específicamente óxidos, dejando así de ser inerte este gas

Materiales presentes en las pinturas que pueden ser afectados por altos niveles de humedad relativa. Valores recomendados para su estabilidad¹⁰

<i>Material</i>	<i>Valor de humedad relativa recomendado para su estabilidad (%)</i>
textil	45 – 55
madera	50 – 55, requiere máxima estabilidad
pintura sobre madera	50 – 55, requiere máxima estabilidad
pintura sobre metal	40 (o menos)
acabados	50 – 55, requiere máxima estabilidad
colas de origen animal	50 - 55

¹⁰ Bachmann, K. (editor) *Conservation Concerns. A Guide for Collectors and Curators*. Smithsonian Institution Press, Washington DC, 1992, p. 132

Conclusiones:

Después de analizados los resultados y, teniendo en cuenta los objetivos específicos propuestos, llegamos a las siguientes conclusiones:

1.- El polvo químico seco estudiado ZENITHSPAIN – CDAF está compuesto por fosfato de amonio, sulfato de bario y compuestos de silicio.

2.- El producto es estable hasta alcanzar los 150 °C - 200°C, a partir de esta temperatura puede desprender pequeñas cantidades de un gas básico, posiblemente amoníaco. Al cabo de un mes y en presencia de humedad, el polvo residual sometido a los regímenes de calor provocó una disminución del pH de la superficie de las pinturas debido a la formación de ácido fosfórico.

3.- El polvo químico aplicado sobre superficies pintadas pueden dejar residuos después de la limpieza mecánica con brocha y un aspirador convencional, principalmente en obras barnizadas. Si las pinturas están protegidas en recintos semi-estancos o cubiertas con un material resistente al calor, como el papel MYLAR / MELINEX, el riesgo de que queden residuos sobre las pinturas disminuye ampliamente. Estas condiciones de protección de las obras no deben afectar su equilibrio térmico e higroscópico con el ambiente. A partir de estos hechos es recomendable el uso de este sistema de extinción en sitios que alberguen pinturas protegidas de esta forma.

4.- De modo general se puede decir que el polvo químico estudiado previsiblemente pudiera producir daños sobre las pinturas, a mediano plazo, si quedaran residuos directamente sobre éstas, especialmente si las partículas pasan por un calentamiento previo y se mantienen al menos un mes en atmósfera húmeda (aproximadamente un 55% de humedad). Comparado con otros sistemas de extinción como el agua y los gases inertes, puede indicarse que el agua es potencialmente el más peligroso de los sistemas, pudiendo ser los gases inertes los que menos efectos nocivos puedan provocar sobre las pinturas.

Observaciones:

1.- Sugerimos evaluar la limpieza de superficies barnizadas sometidas al polvo químico con el aspirador electrostático recomendado por la casa RÜHL FEUERLÖSCHMITTEL GMBH, con lo cual se podría facilitar la separación de las partículas que quedan retenidas en los barnices debido a la fuerte atracción electrostática y al calor.

2.- Este trabajo sólo ha evaluado los posibles efectos del polvo químico en las pinturas, tarea encomendada por el Departamento de Restauración del Museo Thyssen Bornemisza. La eficacia del sistema extintor, la viabilidad y diseño del mismo, así como los posibles efectos tóxicos, deben ser aportados por el equipo de ingenieros, toxicólogos, fabricantes y administrativos vinculados a la producción del material y a la protección de las obras contra los incendios.