

Protección pasiva contra el fuego de perfiles metálicos mediante morteros proyectados que contienen cenizas volantes de la combustión del carbón

Coal fly ash-containing sprayed mortar for passive fire protection of steel sections

L.F. VILCHES^(*), C. LEIVA, J. OLIVARES, J. VALE, C. FERNÁNDEZ

^(*)Universidad de Sevilla, Sevilla

Persona de contacto/Corresponding author: vilches@esi.us.es

Fecha de recepción: 4-V-04

Fecha de aceptación: 12-XII-04

ESPAÑA

RESUMEN

En este artículo se estudia el posible uso de las cenizas volantes procedentes de la combustión del carbón como constituyente principal de morteros que pueden ser proyectados sobre estructuras metálicas, para protegerlas contra el fuego. Con objeto de estudiar el proceso de proyección, se ha construido una planta piloto de gunitado por vía húmeda. La pasta se ha proyectado sobre placas metálicas y perfiles metálicos con diferentes relaciones superficie/volumen. Tras el gunitado, las probetas proyectadas se colocan en un horno y se someten a un programa de calentamiento según la norma de resistencia al fuego. A partir de los datos obtenidos se ha podido realizar una estimación de la resistencia al fuego del producto. Los resultados muestran que el material proyectado usado en este estudio, que contiene una alta proporción de cenizas volantes, tiene unas propiedades mecánicas aceptables y unas características potenciales de resistencia al fuego comparables a las de otros productos comerciales utilizados en la protección pasiva contra el fuego.

PALABRAS CLAVE: cenizas volantes, morteros, protección pasiva contra el fuego, estructuras metálicas, gunitado.

1. INTRODUCCIÓN

La protección pasiva contra el fuego puede entenderse como un conjunto de medidas de tipo constructivo racional que se toman con el fin de disminuir la posibilidad de que un fuego se desarrolle y propague, así como asegurar la estabilidad de una instalación hasta tanto el incendio no se controle y/o extinga. Un elemento de construcción es resistente al fuego el tiempo, expresado generalmente en minutos, durante el cual dicho elemento, sometido a un programa térmico normalizado (que se supone trata de reproducir las variaciones de temperatura con el tiem-

SUMMARY

The present article addresses the possible use of coal fly ash as the chief component of sprayed mortars to fireproof steel structures. A pilot wet-mix gunning rig was specifically designed and built to spray different pastes onto sheet steel and sections with different surface/volume ratios. After gunning, the specimens were placed in a furnace and subjected to standard fire resistance testing. Product fire resistance was calculated from the test results. The mortar used in this study, with a high fly ash content, was found to have acceptable mechanical properties as well as a fire resistance potential comparable to those of commercial passive fire protection products.

KEYWORDS: coal fly ash, mortars, passive fire protection, steel sections, gunning.

1. INTRODUCTION

Passive fire protection can be understood to be a series of rational measures integrated within the constructional fabric of a facility to reduce the likelihood that a fire will grow and spread and to ensure structural stability until the fire is controlled and/or extinguished. The length of time that a structural member is regarded to be fire resistant is generally expressed in minutes or hours and is defined to be the period during which that member, subjected to standardized fire testing (which is assumed to attempt to reproduce the temperature variations

po, durante un incendio real), conserva las siguientes cualidades: estabilidad, estanqueidad, no emisión de gases inflamables y aislamiento térmico.

Los perfiles metálicos, tan versátiles y resistentes a la hora de diseñar estructuras portantes, presentan el inconveniente de su vulnerabilidad frente al fuego. A efectos de seguridad contra incendios, unas temperaturas mínimas alrededor de 450-550 °C se pueden considerar como valores de temperatura críticos a los cuales para el acero de construcción, la resistencia a la tracción, el límite elástico y el modulo de elasticidad descienden en más del 50% del correspondiente a 20 °C. Estas temperaturas se alcanzan rápidamente en un incendio, por lo que, teniendo en cuenta la buena conductividad térmica del acero, los elementos no protegidos tardarán poco tiempo en alcanzarlas, produciéndose previsiblemente fallos en la estabilidad de las estructuras.

La velocidad de calentamiento de los elementos metálicos sometidos a la acción del fuego depende de dos factores: el factor de forma (relación superficie/volumen expuesta) y el tipo y naturaleza de la protección. Cuando el método de protección consiste en la interposición de un material entre el elemento de acero y el fuego (bien mortero proyectado o bien placas o paneles), ha de prestarse atención al material elegido. No sólo ha de ser buen aislante, sino que ha de conservar su integridad bajo la acción del fuego.

Dentro de los productos utilizados en la protección pasiva contra el fuego, los materiales que tienen la capacidad de almacenar agua son muy adecuados, ya que cuando se exponen al fuego el agua se evapora y es transportada hacia el interior del material, más frío, produciéndose su condensación. De esta forma, se genera una interfase líquida que se desplaza desde la cara expuesta hacia la cara no expuesta. Por ello, el contenido de agua del material produce en el perfil de temperaturas de la cara no expuesta una meseta, denominada de evaporación, alrededor de 100 °C, que retrasa la elevación de la temperatura.

En trabajos anteriores realizados por este grupo de investigación se han estudiado las posibilidades de reciclado de cenizas volantes procedentes de la combustión del carbón, como constituyente principal de diferentes composiciones resistentes al fuego, buscando nuevas alternativas de reciclado que generen productos de alto valor añadido (1-3). En el desarrollo de esos trabajos, se han obtenido diferentes productos compuestos mayoritariamente por cenizas volantes y moldeados como placas, con propiedades aislantes comparables a las de algunos productos comerciales utilizados en la protección pasiva contra el fuego, habiéndose demostrado que es posible producir materiales aislantes a partir de mezclas ricas en cenizas volantes, usando métodos de fabricación simples y rentables.

occurring during a real fire), preserves its stability, water-tightness and thermal insulation and emits no flammable gases.

Widely used in structural design for their versatility and strength, steel sections are nonetheless highly vulnerable to fire. In the general context of fire safety, the critical temperature for such members is generally regarded to range from 450 to 550 °C; in other words, these are the temperatures at which construction steel tensile strength, yield strength and modulus of elasticity drop to less than 50% of their 20 °C values. Given the good thermal conductivity of steel, it would take very little time for unprotected members to heat to such temperatures -quickly reached in a fire- and foreseeably compromise structural stability.

The speed at which steel members heat up when exposed to fire depends on two factors: form (the surface/volume ratio) and the type and nature of the protection. When protection consists of positioning another material between the steel and the fire (mortar, either gunned on to the steel or in the form of moulded casing), the material in question should be chosen carefully. Not only should it afford good insulation, but it must remain intact when exposed to fire.

Materials able to store water are particularly well suited for passive fire protection: when exposed to fire the water evaporates and the water vapour is driven to the cooler, inner part of the material where it condenses. The outcome is a shift in the position of the liquid interface from the exposed to the unexposed surface. The water content of the material retards further temperature rises and is ultimately responsible for the plateau at around 100 °C in the heating curve -referred to here as the "evaporation plateau"- for the unexposed side of the material.

In earlier studies, this research team analyzed the feasibility of using coal fly ash as the chief component of fire-resistant materials, in the form of value-added products (1-3). One of the chief findings of those studies was that the insulating properties of the products obtained, mainly fly ash mortar moulded into plates, were comparable to those of certain types of commercial fire-proofing. It was likewise shown that the manufacture of insulating materials for fly ash-rich mortars involves a fairly simple cost-effective process.

En este trabajo se ha tratado de estudiar la posible aplicación de los morteros descritos en el párrafo anterior a la protección pasiva contra el fuego de estructuras metálicas. Para ello, la composición de uno de los productos desarrollados en los trabajos citados anteriormente, compuesto por una alta proporción ($>60\%$) de cenizas volantes, vermiculita y cemento Portland, se ha tomado como base para este estudio, en el que se ha visto el comportamiento aislante del nuevo material en perfiles metálicos con diferentes formas (relación superficie/volumen). Además, se ha comparado la capacidad aislante del producto con la de dos morteros comerciales utilizados en la protección pasiva contra el fuego, cuando se someten a las mismas condiciones experimentales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Como constituyentes del producto desarrollado, se han utilizado cenizas volantes (FA) Clase F (ASTM) procedentes de la central térmica Los Barrios (Cádiz, España), una vermiculita comercial (Ver) que contiene un 56% de partículas con un diámetro menor de 28,3 mm y un cemento Portland de uso común en construcción (CEM II/B-M 32,5)

Con fines comparativos, se han estudiado dos productos usados comercialmente en la protección pasiva contra el fuego de estructuras metálicas; uno, constituido fundamentalmente por vermiculita con ligantes inorgánicos y diferentes aditivos sin identificar por el fabricante (C-1), y otro, compuesto por yeso, vermiculita y otros aditivos tampoco identificados (C-2).

2.2. Metodología experimental

La metodología seguida en este trabajo consta de los siguientes pasos:

- 1) Estudio de la influencia de la proporción de vermiculita en la capacidad aislante de placas compuestas mayoritariamente ($>60\%$) por cenizas volantes, con el objeto de poder seleccionar una composición inicial para el mortero a proyectar.
- 2) Diseño de la planta piloto de gunitado, selección de la composición del mortero y estudio del procedimiento de proyección de acuerdo con las características de la máquina de gunitado.
- 3) Estudio de las propiedades aislantes del mortero, cuando la misma composición se utiliza en el gunitado o en el encofrado de los perfiles metálicos.

The present study was conducted to analyze the possible use of the mortars described in the preceding paragraph as passive fire protection for steel structures. The base material for this study was one of the products developed in previous research, comprising chiefly high ($>60\%$) fly ash, along with vermiculite and Portland cement as the other components. The insulating performance of the new material was analyzed using steel sections with different forms (surface/volume ratio) and compared to the capacity of two commercial passive fire protection mortars measured under the same experimental conditions.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Materials

The components of the product developed were (ASTM) Class F fly ash (FA) taken from a coal-fired steam power plant at Los Barrios, a town in the Spanish province of Cadiz, a commercial vermiculite (Ver), 56% of whose particles were under 28.3 mm in diameter, and a Portland cement (CEM II/B-M 32.5) commonly used in construction

For the intents and purposes of comparison, two commercial fire-proofing products for steel structures were also studied: one composed primarily of vermiculite with inorganic binders and different admixtures not identified by the manufacturer (C-1) and the other composed of gypsum, vermiculite and other likewise unidentified admixtures (C-2).

2.2. Experimental methodology

The methodology followed in this study is described below:

- 1) Study of the effect of the proportion of vermiculite on the insulating capacity of the fly ash (main component: $>60\%$) mortar plates to determine the optimum composition of sprayed mortar.
- 2) Design of a pilot spraying plant, selection of the mortar composition for testing and study of the spraying procedure best suited to the characteristics of the material to be protected.
- 3) Comparison of the insulation capacities of sprayed and casing mortar of the same composition.

4) Estudio de las propiedades aislantes del mortero proyectado sobre una placa metálica plana, cuando se utilizan diferentes boquillas de proyección.

5) Comparación de la capacidad aislante del mortero desarrollado con la que presentan algunos productos comerciales ensayados en las mismas condiciones experimentales.

2.3. Propiedades aislantes

El criterio para el comportamiento aislante de los productos ensayados, se basa en la idea general de aislamiento presentada en las normas de resistencia al fuego. Así, en este estudio se ha considerado la capacidad aislante de los productos moldeados en forma de placas, como el tiempo que necesita la cara no expuesta de la placa en alcanzar la temperatura de 180 °C (t_{180}), cuando la temperatura de la cara expuesta se regula y controla de tal forma que cumpla la relación temperatura-tiempo que establece la curva de calentamiento normalizada:

$$T = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1)$$

donde T es la temperatura del horno en °C y t el tiempo en minutos desde el comienzo de la prueba.

Para los perfiles metálicos, la capacidad aislante se ha determinado midiendo el tiempo necesario para que el acero alcance 450 °C (t_{450}), cuando el perfil recubierto se somete a la curva de calentamiento normalizada. Asimismo, se ha determinado la conductividad térmica del producto de acuerdo con la norma UNE 23820:1997 (4).

2.4. Elaboración de las placas

Las placas se han fabricado usando un método simple y de bajo coste, sin tratamientos previos de los residuos. Para ello, se han seguido los siguientes pasos: los componentes de la mezcla se pesan según la formulación del producto; a continuación, los componentes se disponen en una mezcladora planetaria con la suficiente cantidad de agua para que la mezcla sea homogénea; finalmente, la masa se deposita en moldes de 27 x 17 cm², y las placas se desmoldan después de 24 h de curado a temperatura ambiente.

2.5. Planta piloto de gunitado por vía húmeda

Para estudiar la posible aplicación de las cenizas volantes en morteros proyectados usados en la protección pasiva contra el fuego, se ha diseñado una planta piloto de gunitado por vía húmeda capaz de pulverizar los materiales aislantes. La Figura 1 muestra un esquema de la planta.

Los elementos que constituyen la planta piloto se describen a continuación:

4) Comparison of mortar insulation properties when sprayed on to flat sheet steel using different nozzle tips.

5) Comparison between the insulating capacity of the material developed and the capacity of a number of commercial products under the same experimental conditions.

2.3. Insulating capacity

The criterion used for measuring the performance of the products tested was as generally defined in fire resistance standards. In this study, then, the insulating capacity of plate-moulded products was regarded to be the time taken to reach a temperature of 180 °C (t_{180}) on the unexposed side of the plate, raising the temperature on the exposed side at a rate to fit the standard heating curve:

$$T = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1)$$

where T is the furnace temperature in °C and t the time in minutes from time zero.

For steel sections, the insulating capacity was determined by measuring the time needed for the steel to reach a temperature of 450 °C (t_{450}) when the covered section was subjected to standard heating curve conditions. The thermal conductivity of the product was also determined, using the method described in Spanish standard UNE 23820:1997 (4).

2.4. Plate manufacture

The simple, low-cost procedure devised to manufacture the plates from non-pretreated wastes consisted in the following steps. The components were proportioned by weight as defined in the formula and placed in a concrete mixer with sufficient water to produce a uniform mix; the mortar was then poured into 27 x 17-cm² moulds, from which the plates were removed after curing at laboratory temperature for 24 h.

2.5. Pilot wet-mix gunning rig

A pilot wet-mix gunning rig was designed and built to study the possible use of fly ash in sprayed mortars for passive fire protection. A drawing of the rig is given in Figure 1.

The elements comprising the pilot rig are described below:

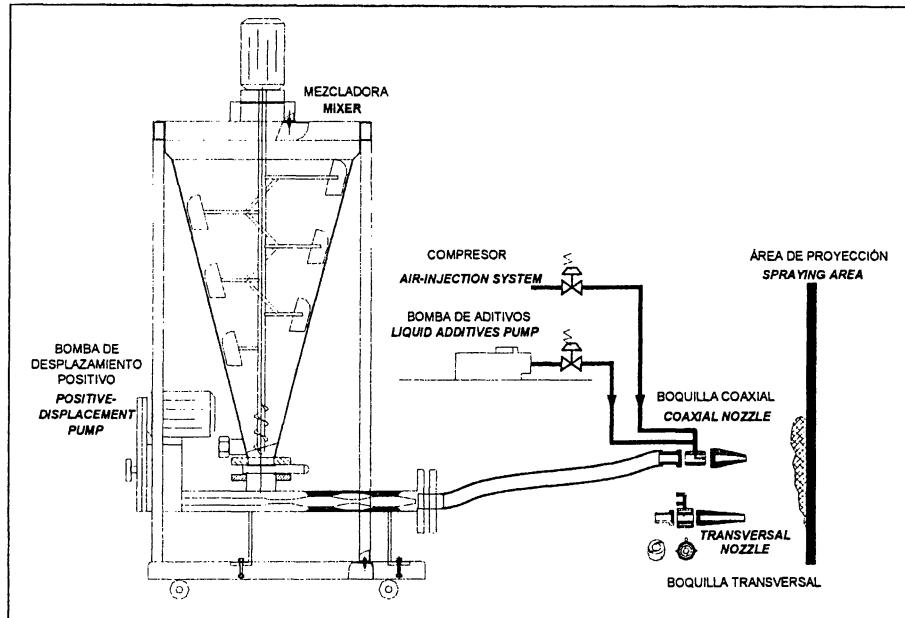


Figura 1.- Planta piloto de gunitado.
Figure 1.- Pilot wet-mix spraying rig.

Mezcladora

Para la preparación del mortero se ha utilizado una tolva/mezcladora de eje vertical, emplazada sobre una estructura metálica, cuya misión es la mezcla de los distintos materiales con las dosificaciones previamente establecidas, así como la descarga del material al sistema de transporte, cuando se abre la compuerta de tajadera existente en el fondo de la tolva. El volumen de la mezcladora es de 50 l, con objeto de disponer de autonomía para proyectar superficies de 1 m², con espesores de pasta de hasta unos 5 cm. El sistema de mezcla consiste en una serie de palas de teflón con una inclinación de 45 °, cogidas al brazo que gira alrededor del eje, mediante el accionamiento de un motorreductor de 1,5 kW y velocidad variable entre 0-50 rpm.

Bomba de impulsión

Para el transporte de la pasta desde la mezcladora hasta las boquillas de proyección, se ha utilizado una bomba volumétrica de desplazamiento positivo con las siguientes especificaciones: caudal variable de 10 a 150 l/h, ajustado mediante variador mecánico de accionamiento manual, presión de impulsión a 4 bar y 0,4 kW de potencia.

Sistema de regulación de aire

Se ha utilizado el equipo central de suministro de aire de los laboratorios, el cual aporta un caudal de aire de 80 m³/h, a una presión de servicio de 11 bar. La presión del aire a la entrada de las boquillas de inyección se ha regulado a 3 bar, disponiéndose de un manorreductor tarado a esa presión en la toma de aire ubicada en el laboratorio donde se han realizado los ensayos.

Mixer

A vertical axis mixer/hopper mounted on a steel frame was used to prepare the mortar, mixing the various materials in the pre-established proportions, and ejecting the mortar onto the conveyor when the hatch at the bottom of the hopper was pulled open. Its 50 l capacity sufficed to cover 1-m² surfaces with a layer of mortar up to 5 cm thick. The materials were mixed by Teflon flights pivoted at an angle of 45 ° and attached to a revolving arm driven by a 1.5-kW variable speed (0 to 50 rpm) motor.

Pump

The mortar was lifted from the mixer to the spray nozzles by a 0.4-kW manually regulated positive displacement pump with an output range of from 10 to 150 l/h and pressure of 4 bar.

Air regulation system

The laboratory is fitted with a central air supply system with an output of 80 m³/h and a service pressure of 11 bar, which was used to inject air into the gunning rig. The air pressure at the spray nozzle inlet was adjusted to 3 bar with a manual pressure reducer positioned at the air outlet.

Boquilla de inyección

Para el diseño de las boquillas se tuvieron en cuenta las sugerencias de distintos autores (5) para la atomización de fluidos de alta viscosidad, como es el caso de los morteros ensayados en este trabajo, que recomiendan para estas pastas la utilización de atomizadores neumáticos. Dentro del grupo de los atomizadores neumáticos, se han seleccionado los de mezcla interna, que producen una mezcla más intensa entre aire y pasta. Los elementos críticos que pueden asegurar un buen funcionamiento son: el dispositivo de entrada de aire en la boquilla, el sistema de mezclado aire-pasta y la forma y tamaño de la tobera de salida. De esta forma, se han diseñado dos dispositivos de entrada de aire de las siguientes características:

- Entrada de aire coaxial con la pasta (B-1), en la que el aire se inyecta en el canal del flujo de la pasta a través de un tubo coaxial con el eje del atomizador. La boquilla de salida del aire se ha diseñado para poder ensayar distintos diámetros.
- Entrada de aire transversal al canal del flujo de pasta (B-2), mediante orificios tangenciales que crean un movimiento helicoidal de la mezcla pasta-aire. De esta forma, el aire arrastra a la pasta y consigue su dispersión debido a la turbulencia creada por el movimiento helicoidal.

Se han diseñado toberas de salida de distintas longitudes y diámetros de salida, ya que las características de la dispersión pueden verse influenciadas por la pérdida de energía del aire y por la velocidad de salida de la mezcla. Así, se han empleado toberas de 100 mm de longitud, con diámetro de salida de 10 y 20 mm, para la boquilla de entrada de aire coaxial, y de 180 mm de longitud y diámetro de salida de 10 y 20 mm, para la boquilla de entrada de aire transversal. Con estas dimensiones se han podido ensayar velocidades de salida de hasta 90 m/s y relaciones máximas entre masa de aire y masa de pasta de 5.

Sistema de proyección

Las pastas se han proyectado sobre una superficie cóncava, aproximadamente de 1 m², en la cual se fijan las placas y perfiles a recubrir. Con el fin de evitar las salpicaduras del proceso, este dispositivo se ha recubierto con una estructura de madera, cerrada por tres paneles perpendiculares y una tapa corredera en la parte superior.

2.6. Procedimiento de proyección

Hay muchos factores que pueden influir en las características finales de un mortero proyectado, por ejemplo, la naturaleza de los materiales que componen el mortero (aglomerantes, fibras y aditivos), el tipo de mezclador y el equipo de bombeo y sus condiciones de operación, el

Spray nozzle

The design of a nozzle able to atomize highly viscous fluids such as the mortars tested drew heavily on the descriptions of the pneumatic atomizers recommended in the literature (5). An internal mix pneumatic atomizer was used to attain the most effective air-mortar mix. The chief elements considered for ensuring good performance were: the air inlet device, the air-mortar mixing system and the shape and size of the nozzle tip. Two air inlet devices were designed to the following characteristics:

- Coaxial injection (B-1) of air into the paste from a coaxial tube located inside the atomizer. The air outlet nozzle was designed to test tips of different diameters.

- Transverse injection (B-2) of air into the paste flow from tangential openings that swirl the air-paste mix. The turbulence created by the swirling air propels the paste outward through the spray nozzle.

Nozzle tips with different lengths and outlet diameters were designed, since the characteristics of the spray may be affected by energy losses in the air and output speed. Specifically, 100-mm tips with outlet diameters of 10 and 20 mm were used for the coaxial air nozzle and 180-mm tips with outlet diameters of 10 and 20 mm for the transversal nozzle. Speeds of up to 90 m/s and air mass/paste mass ratios of up to 5 could be tested with these nozzle tips.

Spraying system

The pastes were sprayed on to a concave surface covering an area of approximately 1 m² to which the sheet and sections to be covered were attached. This area was framed with a wooden structure consisting of three perpendicular panels on the sides and a sliding cover at the top to prevent spattering.

2.6. Spraying procedure

Many factors may affect the final characteristics of a sprayed mortar; including the nature of the component materials (binders, fibres and admixtures), mixer and pump type and operating conditions, nozzle type and environmental conditions. One of the objectives of this

tipo de boquilla usado, y otras condiciones ambientales. Uno de los objetivos de este estudio ha sido el de poner en marcha la planta piloto de gunitado, pero no la optimización de las condiciones de operación de esta máquina concreta, lo que no tendría interés práctico, puesto que dicha optimización no es extrapolable de unas máquinas a otras. Como el número de variables que intervienen en el proceso es muy grande, se ha intentado eliminar la influencia de alguna de dichas variables. Así, las siguientes condiciones han permanecido constantes en los ensayos de gunitado realizados:

- La pasta se mezcla durante un tiempo constante de 5 minutos en la mezcladora y con una proporción de agua constante.

- Siempre se ha trabajado con el caudal de pasta y de aire máximos (100 l/h de pasta y 80 m³/h de aire), con una presión de salida del aire en la boquilla de 3 bar. Esto implica que en todas las pruebas la relación aire/masa se ha mantenido constante y aproximadamente igual a 2,5.

- Se ha proyectado a una distancia constante de 1 metro y siempre en posición perpendicular a la superficie proyectada.

- Se ha proyectado sobre perfiles y placas de acero al carbono a los que no se ha sometido a ningún tratamiento superficial, ni siquiera limpieza.

2.7. Mortero proyectado y encofrado

Los ensayos de gunitado se han llevado a cabo empleando la boquilla de inyección B-2 con una tobera de 180 mm de longitud y dos diámetros de 10 y 20 mm, proyectándose sobre placas de acero de 3 mm de espesor y 27 x 17 cm de superficie, y sobre perfiles IPN80 y HEB100 de 20 cm de longitud. Asimismo, se ha analizado el comportamiento aislante del producto mediante encofrado de los perfiles anteriores. La proyección y encofrado del mortero sobre las placas y perfiles se muestran en la Figura 2.

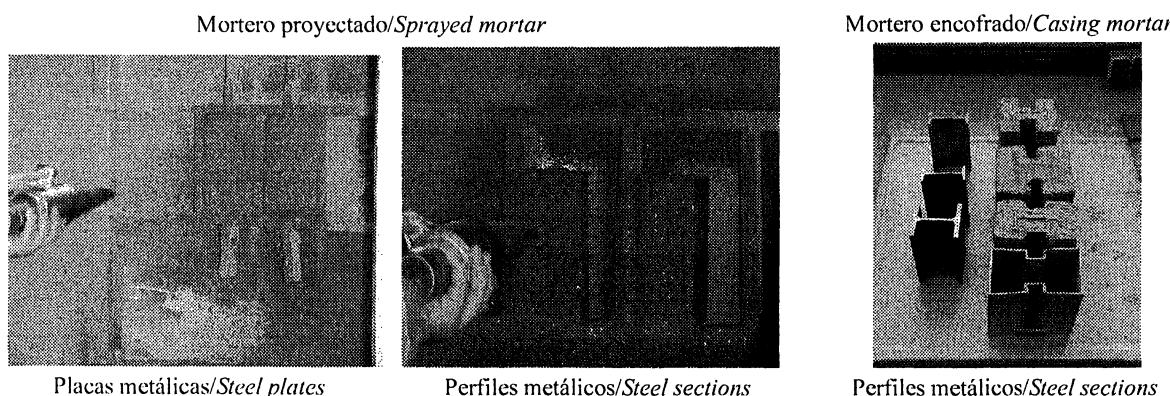


Figura 2.- Procedimiento de proyección y encofrado sobre perfiles y placas metálicas.
Figure 2.- Spraying and casing steel plates and sections.

study was to design a pilot gunning rig, but optimization of the operating conditions for this specific machinery was not sought. Such information would be of little practical interest, inasmuch as what is optimal for one machine is not necessarily applicable to another. In view of the large number of variables involved in the process, an attempt was made to neutralize the effect of some of them. Consequently, the following conditions were kept constant in all the gunning tests conducted:

- The paste was mixed for 5 minutes in the mixer with a constant proportion of water.

- The maximum paste and air outflow was used throughout (100 l/h of paste and 80 m³/h of air), with a nozzle outlet pressure of 3 bar. This means that the air/mass ratio was held constant at approximately 2.5 in all the tests.

- The mortar was sprayed at a constant distance of 1 metre and always with the sprayer perpendicular to the surface sprayed.

- The mortar was sprayed on to carbon steel sections and sheet steel with untreated – and even unwashed - surfaces.

2.7. Sprayed and casing mortar

The gunning tests were conducted with the B-2 nozzle and two 180-mm nozzle tips, one 10 mm and the others 20 mm in diameter. The mortar was sprayed on to 27x17-cm x 3-mm sheet steel plates and 20-cm IPN80 and HEB100 sections. The sections were also encased with the mortar plates in other trials to measure the insulating capacity of the product under those conditions. The plate and section spraying and casing procedures are illustrated in Figure 2.

Para analizar las propiedades aislantes del mortero proyectado sobre los perfiles IPN80 y HEB100, éstos se pulverizaron con la pasta por una de sus caras; el resto de las caras se encofraron, empleando para ello el mismo material. Para conseguir que los espesores de material fueran idénticos, se tuvo que rebajar parte del material proyectado de forma manual. Una vez finalizado el período de fraguado del material (28 días), los perfiles protegidos se introdujeron en el horno y se sometieron a la curva normalizada de resistencia al fuego. Para ello, las partes superior e inferior del perfil se aislaron con una capa de 2 cm de espesor de fibra cerámica, con una conductividad térmica a 800 °C de 0.2 W/m·K. Las temperaturas se registraron mediante termopares tipo S dispuestos en el exterior del material aislante y entre el material y el acero, tal como se indica en la Figura 3.

2.8. Propiedades físicas

La porosidad del material (porosidad abierta) se ha determinado midiendo la diferencia entre los pesos húmedo (saturado de agua) y seco del mortero. Para ello, se extrajeron muestras, mediante un proceso manual de separación del mortero de la placa metálica. También se ha determinado la densidad aparente del material (6).

One of the surfaces of the IPN80 and HEB100 sections was sprayed to analyze the insulating properties of the mortar; all other sides were encased with the same material. Part of the layer of sprayed material was removed manually to standardize material thickness. After the material had set (28 days), the sections were placed in a furnace and exposed to standard fire resistance heating curve conditions. The tops and bottoms of the sections were insulated with a 2-cm layer of ceramic fibre having a thermal conductivity of 0.2 W/m·K at 800 °C. The temperatures were recorded with S-type thermocouples positioned on the outer surface of the insulating material and between the material and the steel, as shown in Figure 3.

2.8. Physical properties

Material porosity (open porosity) was determined by measuring the difference between the wet (water-saturated) and dry weights of the mortar. Samples were extracted by manually separating the mortar from the sheet steel plates. The apparent density of the solid material was likewise determined (6).

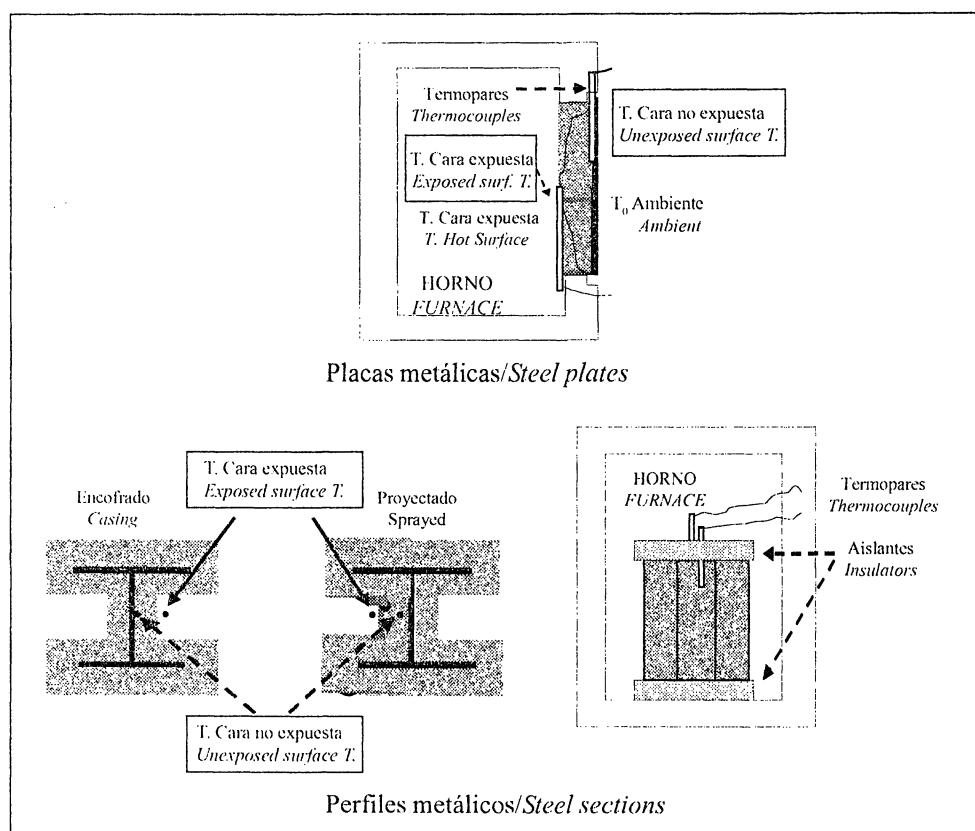


Figura 3.- Medida de las propiedades aislantes del mortero.

Figure 3.- Measuring the insulating capacity of the mortar.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Selección de la composición del mortero

En la Figura 4, se muestran las temperaturas obtenidas en las caras expuesta y no expuesta, para dos placas de 33 mm de espesor, con las siguientes proporciones en peso de FA-PC-Ver: 75-15-10 (A) y 50-15-35 (B). Como se puede observar, el incremento de la proporción de vermiculita aumenta la capacidad aislante, al generarse mesetas de evaporación más grandes, con tiempos t_{180} mayores de 120 minutos. Este hecho sugiere la utilización de una composición del mortero a proyectar con el contenido máximo de vermiculita que permita la bombeabilidad del producto.

A pesar de lo anterior, los primeros ensayos de gunitado pusieron de manifiesto la existencia de dificultades para proyectar un producto de esas características, como consecuencia de la falta de homogeneidad de la mezcla. Por ello, se hizo necesaria una etapa de optimización de la composición del mortero vermiculítico proyectado.

Así, respetando la idea general de aplicación de las cenizas volantes como componente mayoritario, se han tenido en cuenta la influencia positiva en las propiedades aislantes de una mayor proporción de vermiculita y las características de bombeabilidad y adherencia de la pasta al soporte metálico. El resultado de los ensayos previos ha sido la obtención de un producto con una composición

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Mortar composition

Figure 4 shows the temperatures recorded on the exposed and unexposed sides of two 33-mm thick plates with the following proportions, by weight, of the components (FA-PC-Ver): 75-15-10 (A) 50-15-35 (B). Increasing the proportion of vermiculite enhanced insulating capacity, with longer “evaporation” plateaus at t_{180} test times of over 120 minutes. This advised using a composition for the spraying mortar with as high a vermiculite content as product pumpability would allow.

Difficulties were encountered in the first gunning tests, however, because of the lumps formed in the mix. This necessitated an additional step in the experimental protocol to optimize the composition of the vermiculite-rich spray mortar.

Consequently, while fly ash continued to be the majority component, other criteria were likewise considered in mix composition, such as the beneficial effect of a higher vermiculite content, paste pumpability and adherence to the steel support. The optimal proportions of the three

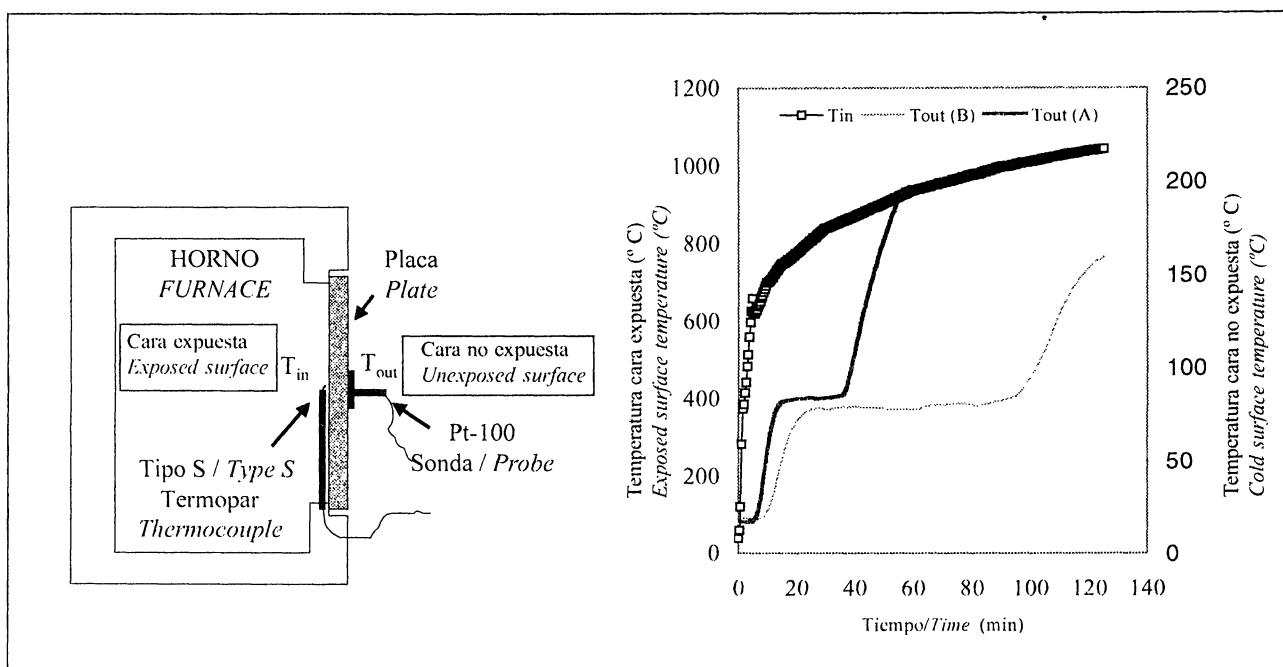


Figura 4.- Influencia de la proporción de vermiculita (placas de 33 mm de espesor).

Figure 4.- Effect of the proportion of vermiculite (33-mm plates).

en peso optimizada para sus componentes principales de FA-PC-Ver: 75-10-15, composición que es la que se ha utilizado en los ensayos que se describen a continuación.

3.2. Propiedades aislantes de los perfiles proyectados y encofrados

Con el procedimiento indicado anteriormente, el mortero se proyectó sobre una de las caras de los perfiles IPN80 y HEB100 (con unas relaciones superficie/volumen altas, de 401 m^1 y 218 m^1 respectivamente), empleando la boquilla de 20 mm. El resto de las caras se encofraron. Para cada perfil se prepararon dos probetas (una proyectada y otra completamente encofrada), de 2 cm de espesor para el perfil IPN80 y de 3 cm de espesor para el perfil HEB100. La Figura 5 muestra la evolución de las temperaturas obtenidas en la superficie metálica. En los perfiles gunitados, la temperatura se ha registrado en la cara que contiene el mortero proyectado (ver Figura 3), con el objeto de poder comparar los resultados del material proyectado con los del encofrado.

En la Figura 5, se puede observar cómo para espesores de 3 cm la meseta de evaporación del perfil proyectado y su t_{450} es sensiblemente inferior a la del encofrado. Esto es debido a la menor densidad del mortero proyectado (539 kg/m^3) frente a la del encofrado (880 kg/m^3), lo que implica un contenido de agua menor en el primero. Con vistas a alcanzar la misma capacidad de aislamiento para este perfil, el mortero proyectado debería tener más espesor o ser más denso.

La Figura 6, muestra las conductividades térmicas medias para ambas formas de aplicación del mortero, calculadas según la norma UNE 23820:1997. Estos valores son similares ($0,25$ y $0,24\text{ W/m}\cdot\text{K}$ para el encofrado y pro-

chief components found as a result of such pretesting were FA-PC-Ver: 75-10-15, by weight. These were the proportions used in the tests described below.

3.2. Insulating properties of sprayed and casing mortars

Following the procedure specified in section 2, the mortar was sprayed on to one of the surfaces of the IPN80 and HEB100 sections (whose surface/volume ratios were 401 m^1 and 218 m^1 , respectively), with the 20-mm nozzle tip. All the other surfaces were encased. Two specimens were prepared with each type of section (one sprayed as described and the other fully encased), with covers 2 cm thick for the IPN80 section and 3 cm thick for the HEB100 section. Figure 5 shows the temperatures recorded on the steel surface. In the gunned sections, the temperature was recorded on the surface covered by the sprayed mortar (see Figure 3) for comparison with the encased steel.

Figure 5 shows that for 3-cm thicknesses, the "evaporation" plateau on the heating curve for the sprayed section, as well as its t_{450} , are substantially shorter than for the encased sample. This is due to the lower density and therefore the lower water content of the sprayed (539 kg/m^3) compared to the casing (880 kg/m^3) mortar. In other words, in order to insulate this type of section as effectively as the casing, the sprayed mortar would have to be either thicker or denser.

Figure 6 gives the mean thermal conductivities for the two product variations, calculated as specified in Spanish standard UNE 23820:1997. These values are similar ($0,25$ and $0,24\text{ W/m}\cdot\text{K}$ for the casing and sprayed mortar,

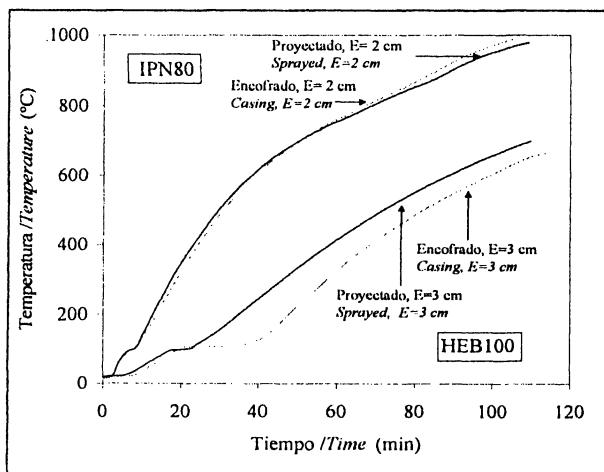


Figura 5.- Comparación entre el mortero proyectado y el encofrado.

Figure 5.- Comparison of sprayed and casing mortar.

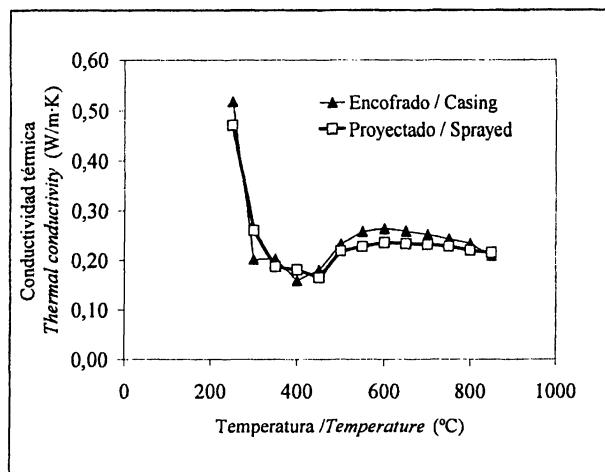


Figura 6.- Comparación entre las conductividades térmicas del mortero proyectado y del encofrado.

Figure 6.- Comparison of conductivity in sprayed and casing mortar.

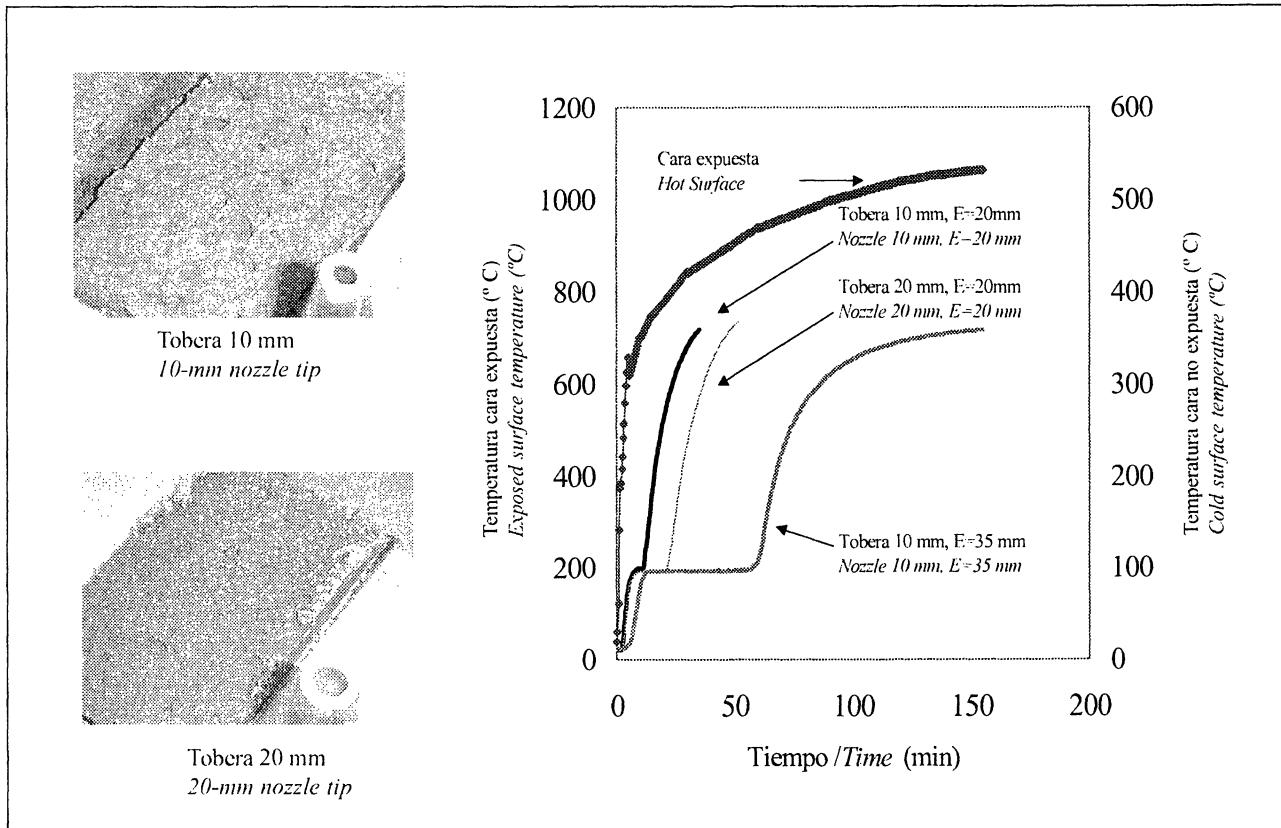


Figura 7.- Comportamiento térmico de las placas proyectadas.
Figure 7.- Thermal behavior of sprayed plates.

yectado respectivamente), aunque se observa un leve descenso de la conductividad del producto proyectado a mayores temperaturas.

3.3. Propiedades del producto proyectado sobre placas metálicas

Las placas metálicas planas se han proyectado utilizando las toberas de 10 y 20 mm de diámetro de salida. Los espesores de mortero obtenidos han sido de 20 y 35 mm aproximadamente. Las curvas de temperatura del ensayo de resistencia al fuego se muestran en la Figura 7, así como una imagen de la rugosidad del material proyectado con ambas toberas.

De la gráfica anterior, se puede concluir lo siguiente:

- Las muestras presentan una textura rugosa (más rugosidad en los morteros proyectados a mayor velocidad, que se corresponden con las toberas de 10 mm), lo que obliga a la definición de unos espesores medios del recubrimiento de las placas (E). A pesar de ello, los morteros obtenidos con las toberas de 10 mm presentan una meseta de evaporación menor, quizás debido a la diferencia de porosidad (64% con la tobera de 10 mm, frente al 71% en el caso de la tobera de 20 mm), y de densidad (688 kg/m^3

respectively), although a slight decline is observed in the sprayed product at higher temperatures.

3.3. Properties of the mortar sprayed on to sheet steel

The flat sheet steel plates were sprayed with 10- and 20-mm diameter nozzle tips. Layers of mortar approximately 20 and 35 mm thick were obtained, respectively. The fire resistance test heating curves are given in Figure 7, together with pictures showing the texture of the mortar sprayed with the two tips.

The following conclusions may be drawn from the above figure:

- The samples have a rough texture (rougher in mortars sprayed at a higher speed, i.e., with 10-mm nozzle tips), which necessitates defining the mean thickness (E) of the plate cover: That notwithstanding, the mortars obtained with the 10-mm nozzle tips have a shorter "evaporation" plateau, perhaps due to porosity (64% with the 10-mm tip compared to 71% in the 20-mm tip) and density (688 kg/m^3 for the 10-mm, compared to 539 kg/m^3 for the

con la tobera de 10 mm, frente a 539 kg/m^3 con la tobera de 20 mm). Probablemente se pueden generar mayores gradientes de presión de la mezcla vapor-aire en las muestras menos porosas, lo que justificaría la menor duración de la meseta de evaporación (7, 8).

- Se obtienen mesetas de evaporación superiores en las muestras de mayor espesor, alcanzándose valores de cerca de 60 minutos para $E = 35 \text{ mm}$.

Finalmente, se debe destacar la estabilidad mecánica observada en el producto proyectado después del ensayo de resistencia al fuego. El producto presenta consistencia y no se apreciaron desmoronamientos ni grietas tras la realización del ensayo.

3.4. Comparación con productos comerciales

La Figura 8 muestra las curvas de temperatura de los distintos perfiles encofrados (espesor de 3 cm) con el material estudiado y con otros dos productos comerciales, cuando se someten al calentamiento según los ensayos de resistencia al fuego

Como se puede observar, el mortero estudiado tiene una t_{450} intermedia cuando se compara con la t_{450} de los dos morteros comerciales utilizados en este estudio. Este hecho pone de manifiesto el potencial de resistencia al fuego de dicho mortero, el cual puede considerarse una base de partida prometedora de cara a la preparación de un mortero vermiculítico con alta proporción de cenizas volantes y con una composición optimizada, que pueda ser utilizado industrialmente en la protección pasiva contra el fuego de estructuras metálicas.

20-mm tip) differences. Larger steam-air pressure gradients may be generated in less porous samples, which would explain the shorter duration of the plateau (7, 8).

- Longer evaporation plateaus are obtained in the thicker samples, with values of nearly 60 minutes for $E = 35 \text{ mm}$.*

Finally, the sprayed product remained essentially stable after the fire resistance test, maintaining its consistency and exhibiting no spalling or cracking.

3.4. Comparison with commercial products

Figure 8 shows the fire resistance test time-temperature curves for the various sections encased (3-cm thick) with the material studied and treated with two commercial products.

The value of the t_{450} for the mortar studied was midway between the values for the two commercial products tested. This is an indication of the fire resistance potential of this mortar and a possible starting point for optimizing the composition of a vermiculite-rich fly ash mortar for industrial use in the passive fire protection of steel structures.

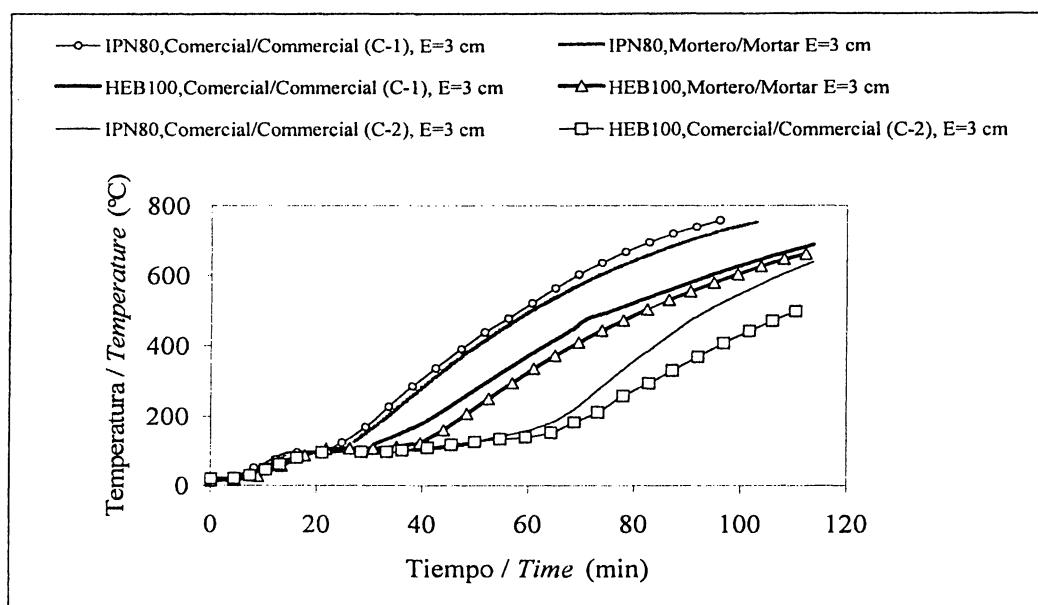


Figura 8.- Comparación con productos comerciales.

Figure 8.- Comparison with commercial products.

4. CONCLUSIONES

Las propiedades aislantes determinadas para el producto desarrollado en este estudio demuestran que morteros fabricados con cenizas volantes poseen propiedades similares o incluso mejores que algunos productos comerciales usados actualmente en la protección pasiva contra el fuego. Además, de manera más concreta, se puede concluir que el mortero ensayado puede aplicarse a la protección pasiva contra el fuego de estructuras metálicas, bien mediante gunitado o bien mediante placas fabricadas a partir de dicho mortero, dispuestas de manera que recubran por completo a la pieza metálica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de esta investigación por parte de la Comunidad Económica del Carbón y el Acero, bajo el proyecto CEFYR 7220-ED/006.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) L.F. Vilches, C. Fernández-Pereira, J. Olivares del Valle, M. Rodríguez-Piñero, J. Vale: *Development of new fire-proof products made from coal fly ash: the Cefyr project*. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 77 (2002), 361-366.
- (2) L.F. Vilches, C. Fernández-Pereira, J. Olivares, J. Vale. *Recycling potential of coal fly ash and titanium waste as new fire-proof products*. Chemical Engineering Journal, 95 (2003), 155-161
- (3) C. Fernández-Pereira, L. F. Vilches Arenas, J. Vale Parapar, M. Rodríguez-Piñero, J. Olivares del Valle: *Production of plates based on coal fly ash for their use as insulating materials in doors and fire break walls*. 2001 International Ash Utilization Symposium. 22-24 Oct 2001. Lexington, KY.
- (4) UNE Spanish Standard 23820 EX, 1997: *Test method for determining the contribution to the fire resistance of structural members by applied protection to steel structural members*.
- (5) P. Walzel: *Liquid atomization*. International Chemical Engineering, 1 (1993), 46-59.
- (6) ASTM E 605-77 (Reapproved 1982): *Thickness and density of sprayed fire-resistive material applied to structural members*.
- (7) Z.F. Jin, Y. Asako, Y. Yamaguchi, M. Harada: *Fire resistance test for fire protection materials with high water content*. International Journal Heat Mass Transfer, 43 (2000), 4395-4404.
- (8) P. Kalifa, F.O. Menneteau, O. Quenard: *Spalling and pore pressure in HPC at high temperature*. Cement and Concrete Research, 30 (2000), 1915-1927.

4. CONCLUSIONS

Based on the findings of this study, the insulating capacity of fly ash mortars is comparable to or even higher than some of the commercial products presently in use as passive fire protection materials. Such mortar, moreover, may be applied to steel structures either by gunning the surface or completely casing the member in mortar plates.

ACKNOWLEDGMENTS

This project was funded by the European Coal and Steel Community, under CEFYR project ECSC 7220-ED/006.

* * *

BIBLIOTECA DEL IETCC

RECURSOS DE INFORMACIÓN PARA EL ÁREA DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y CONSTRUCCIÓN

La Biblioteca del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (<http://www.ietcc.csic.es/biblioteca.html>) creada desde la fundación del Instituto en el año 1952, está integrada dentro de la red de bibliotecas del CSIC (<http://www.csic.es/cbic/cbic.htm>). Es una biblioteca de investigación especializada en temas de ingeniería, arquitectura, construcción, ciencias de los materiales, normativa, etc. Su fondo bibliográfico está formado por más de 19.000 volúmenes y 684 títulos de revistas nacionales y extranjeras, disponible dentro de los Catálogos Informatizados de las Bibliotecas del CSIC (<http://sauco.csic.es:4505/ALEPH>). Integra también este fondo la colección de “*Monografías del Instituto Eduardo Torroja*” con 400 títulos publicados y un fondo especializado de folletos, cartillas y manuales que recogen trabajos de investigación especializados en el área de la ingeniería, arquitectura y construcción.

Su sala cuenta con 10 puestos de lectura y dispone de 3 ordenadores para consulta de bases de datos, catálogos, revistas electrónicas y recursos de información científica en Internet

La biblioteca ofrece sus servicios de información a la comunidad científica española y profesionales del área de la ingeniería, arquitectura y construcción.

Servicios de referencia e información bibliográfica:

Acceso a la información electrónica:

Catálogos CIRBIC: (<http://www.csic.es/cbic/acceso.htm>)

Bases de Datos de la Red de CD-ROM del CSIC

Revistas Electrónicas

Acceso a la información especializada disponible en Internet:

Servicio de búsquedas bibliográficas:

Este servicio facilita la obtención de referencias bibliográficas sobre cualquier tema de interés para el usuario.

Servicio de suministro de documentos:

Obtención de Documentos:

Búsqueda y suministro de artículos, libros, normas, manuales, etc. Además del envío de documentos por medios convencionales (correo, fax, etc.) la biblioteca del Instituto dispone de un servicio de envío de documentos por correo electrónico.

Para más información sobre los servicios y tarifas de los mismos:

jimendoza@ietcc.csic.es

Bib_Torroja@bib.csic.es

<http://www.ietcc.csic.es/biblioteca.html>