

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v8i16.0292>

COMPARACIÓN DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN PASIVA CONTRA FUEGO PARA ESTRUCTURAS DE ACERO USANDO MATERIALES INDUSTRIALIZADOS Y NATURALES

COMPARISON OF PASSIVE FIRE PROTECTION SYSTEMS FOR STEEL STRUCTURES USING INDUSTRIALIZED AND NATURAL MATERIALS

Guerra-Valladares Marcelo David ¹; Zárate-Villacrés Andrea Natalí ²;
Marcillo-Zapata Cristian Andrés ³; Salazar-Flores Raúl Alexis ⁴

¹ Universidad Nacional de Chimborazo, UNACH. Riobamba, Ecuador.
Correo: marcelo.guerra@unach.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4119-4959>

² Universidad Nacional de Chimborazo, UNACH. Riobamba, Ecuador.
Correo: andrea.zarate@unach.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7183-2862>

³ Universidad Nacional de Chimborazo, UNACH. Riobamba, Ecuador.
Correo: cristian.marcillo@unach.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-2552-903X>

⁴ Universidad Nacional de Chimborazo, UNACH. Riobamba, Ecuador.
Correo: raul.salazar@unach.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6483-2613>

Resumen

El acero es increíblemente resistente, pero tiene un talón de Aquiles: el fuego. Cuando las temperaturas se disparan en un incendio, las estructuras de acero pueden perder su fuerza y correr el riesgo de colapsar. Para evitarlo, se usa sistemas de protección pasiva, una especie de escudo que da tiempo vital para una evacuación segura. El problema es que la información sobre estos sistemas está muy dispersa, lo que complica la vida a la hora de elegir el mejor material. Se divide los materiales en dos grandes equipos: los industrializados (como el yeso especial, la lana mineral, el hormigón o las pinturas que se hinchan con el calor) y los de origen natural, una alternativa sostenible que está ganando terreno. Aquí se expone el increíble potencial de la tierra apisonada, el adobe, los fardos de paja e incluso el hormigón de cáñamo, materiales cuyo rendimiento frente al fuego es sorprendentemente bueno, a menudo a la altura de los productos de fábrica. El resultado es una guía clara y ordenada que no solo ayuda a los profesionales a tomar mejores decisiones, sino que también abre la puerta a investigar materiales más ecológicos. El objetivo final: un sector de la construcción más seguro y, a la vez, más sostenible.

Palabras clave: Fuego, Acero, Protección, Materiales, Sostenibilidad.

Abstract

Steel is incredibly strong, but it has an Achilles' heel: fire. When temperatures soar during a blaze, steel structures can lose their strength and risk collapsing. To prevent this, passive protection systems are used—like a shield that provides vital time for a safe evacuation. The problem is that information about these systems is highly scattered, making it difficult to choose the best material. Materials are divided into two major groups: industrialized ones (such as special gypsum, mineral wool, concrete, or intumescent paints that swell when exposed to heat) and natural-origin alternatives, a sustainable option that is gaining ground. This work highlights the remarkable potential of rammed earth, adobe, straw bales, and even hempcrete—materials whose fire performance is surprisingly strong, often comparable to factory-made products. The result is a clear and well-structured guide that not only helps professionals make better decisions but also opens the door to researching more eco-friendly materials. The goal: a construction sector that is both safer and more sustainable.

Keywords: Fire, Steel, Protection, Materials, Sustainability.

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 09 de junio de 2025.

Fecha de aceptación: 29 de agosto de 2025.

Fecha de publicación: 29 de septiembre de 2025.



1. Introducción

Cuando se diseña un edificio, la seguridad contra incendios no es una opción, es la base de todo. Un incendio es una de las peores amenazas que puede sufrir una construcción, con consecuencias que van mucho más allá de lo material y afectan a vidas humanas. Hoy, con edificios cada vez más altos y complejos, esta protección es más importante que nunca.

El calor de un incendio puede debilitar la estructura de un edificio en cuestión de minutos, llevándola a un fallo catastrófico. Y aquí es donde el acero, uno de los materiales estrella de la construcción por su resistencia y versatilidad, muestra su gran debilidad. Una vez que el termómetro supera los 550 °C, el material reduce en gran medida sus características. Es su punto crítico. Por eso, es impensable no protegerlo.

Para defender las estructuras, existen dos estrategias que trabajan en equipo: la protección activa (los sistemas que se "encienden" para luchar contra el fuego, como rociadores y alarmas) y la protección pasiva. El documento se centra en la

segunda, que es la primera línea de defensa. Estos sistemas resisten el fuego, contienen su avance y mantienen el edificio en pie.

Ambas estrategias son complementarias y se utilizan conjuntamente para garantizar un nivel integral de seguridad. El trabajo se enfoca específicamente en los sistemas de protección pasiva, que son una defensa para proteger la integridad estructural.

Durante años, hemos desarrollado un arsenal de materiales para esta tarea: pinturas que se expanden con el calor, morteros que se proyectan o paneles aislantes. Todos funcionan como un escudo térmico, ralentizando el calentamiento del acero para que siga soportando la carga el mayor tiempo posible.

Estos productos funcionan como un aislante térmico, retrasando el aumento de la temperatura en el acero y, por tanto, extendiendo el tiempo durante el cual el elemento estructural puede mantener su capacidad de carga.

Que la información sobre estos materiales está por todas partes: en estudios científicos, en normativas complejas, en catálogos de

fabricantes... Esta fragmentación hace que elegir la opción correcta para un proyecto sea una tarea titánica. Además, casi toda la atención se la han llevado los productos industriales, dejando en la sombra a materiales naturales con un potencial enorme. Técnicas ancestrales que usan tierra, adobe o paja han demostrado ser increíblemente eficaces contra el fuego, además de ser mucho más ecológicas.

Adicionalmente, se observa un desequilibrio en el enfoque de la investigación. La gran mayoría de los estudios y desarrollos en protección pasiva se han centrado en productos industrializados y comercializados. Esta tendencia ha dejado en un segundo plano la exploración de materiales naturales y técnicas constructivas ancestrales que poseen un potencial protector contra

el fuego notable. Materiales como la tierra apisonada, el adobe o la paja compactada han demostrado históricamente un excelente comportamiento ante el fuego, además de ofrecer beneficios en términos de sostenibilidad y bajo impacto ambiental.

Esta falta de una guía clara y la poca atención a las alternativas naturales nos frena. Nos puede llevar a elegir soluciones que no son las mejores en coste, rendimiento o sostenibilidad. Por eso, hemos creado este trabajo: para reunir, ordenar y comparar toda esta información en un solo lugar. Queremos que esta guía sea una herramienta práctica que no solo muestre lo que ya existe, sino que también inspire a buscar un futuro donde nuestras construcciones sean más seguras y respetuosas con el planeta.

Figura 1. Sistema de espumas contra incendios



Fuente: (Grupo Nakashima, 2024).

Dada la dispersión de la información y la limitada investigación en materiales naturales, este estudio se justifica por la necesidad de desarrollar un recurso centralizado que facilite la consulta y comparación de estos productos. La elaboración de un catálogo estructurado, como el que se propone en este trabajo, permitirá a investigadores, ingenieros, arquitectos y constructores acceder a información organizada sobre las características, rendimiento y aplicaciones de una amplia gama de materiales, tanto industrializados como naturales.

La inclusión de materiales naturales no solo diversifica las opciones disponibles, sino que también fomenta la exploración de alternativas más sostenibles y ecológicas. Esto puede promover el desarrollo de nuevas investigaciones y la innovación en el sector de la construcción, contribuyendo a la vez a la seguridad estructural y a la eficiencia en la toma de decisiones. En este contexto, los objetivos de esta investigación son: desarrollar un catálogo completo y comparativo de productos industrializados y naturales utilizados como

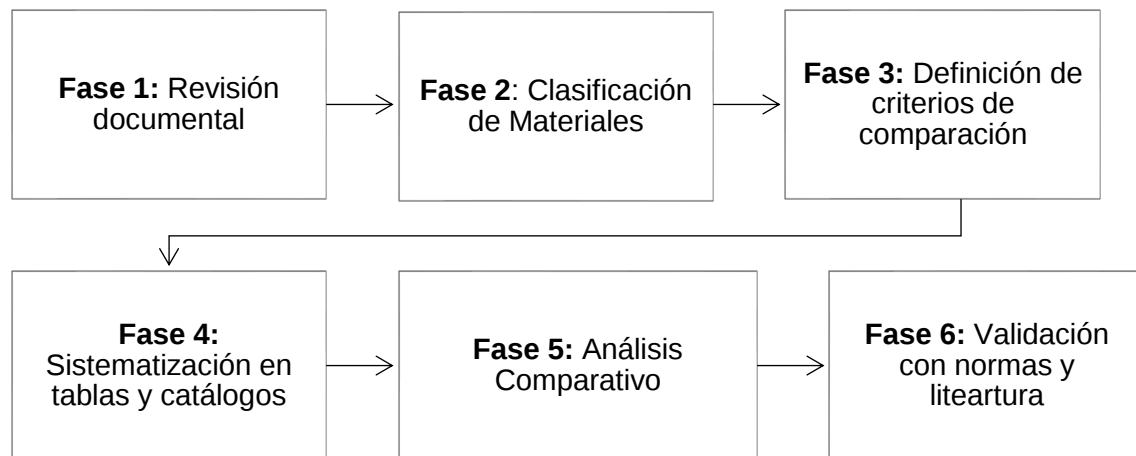
protectores contra fuego en estructuras de acero, que sirva como una referencia técnica para investigadores y profesionales del sector: recopilar y sintetizar información relevante de literatura científica, normativas internacionales y fichas técnicas sobre una variedad de protectores contra fuego, clasificar los productos en las categorías de "industrializados" y "naturales", destacando sus propiedades técnicas, mecanismos de protección y aplicaciones específicas, organizar la información recopilada en un formato estructurado y claro, que permita una fácil consulta y una comparación directa entre los diferentes productos, incluyendo tablas, gráficos y ecuaciones de diseño.

Este artículo busca, en última instancia, ser una guía práctica y teórica que no solo informe sobre las soluciones existentes, sino que también inspire futuras investigaciones para un entorno construido más seguro y sostenible.

2. Materiales y métodos

La investigación se desarrolla bajo un enfoque descriptivo-comparativo, orientado a sistematizar y analizar de manera estructurada los distintos materiales empleados en la protección pasiva contra fuego de estructuras de acero. El procedimiento metodológico se organizó en las siguientes etapas: Se recopiló y analizó información proveniente de literatura científica indexada, normativas internacionales (ASTM E119, ISO 834, UNE-EN 1363-1, ASCE/SEI/SFPE 29-05, entre otras), manuales técnicos, fichas de fabricantes y catálogos especializados. Esta etapa permitió identificar y seleccionar los materiales con mayor relevancia en la protección pasiva. Después los productos recopilados fueron organizados en dos grandes. Para garantizar un análisis integral, se establecieron criterios técnicos, constructivos, económicos y ambientales, tales como: Mecanismo de protección térmica, Resistencia al fuego (minutos/horas según ensayos normativos); método de aplicación e integración

constructiva, peso adicional incorporado a la estructura; durabilidad frente a agentes externos, estética y acabado final; sostenibilidad, disponibilidad local y costo relativo; se organizaron los datos en tablas comparativas y catálogos técnicos, integrando descripciones, propiedades físico-mecánicas y ecuaciones de cálculo normativo de resistencia al fuego. Este proceso permitió la estructuración de un recurso técnico centralizado y de fácil consulta; se contrastan los materiales en función de los criterios establecidos, evaluando ventajas, limitaciones y aplicaciones específicas. Se consideró tanto la evidencia experimental de ensayos documentados como la aplicabilidad en contextos constructivos reales; la información obtenida fue cotejada con normativas vigentes y literatura científica especializada, identificando el nivel de aceptación normativa de cada material y las brechas existentes, particularmente en los protectores de origen natural. En la figura 2 se muestra un diagrama de flujo con las actividades a realizar en el desarrollo de la metodología.

Figura 2. Metodología de la investigación

Definiciones de sistemas pasivos de protección contra fuego.

Para comprender a fondo los sistemas de protección pasiva, es esencial establecer una base teórica sólida que abarque desde la naturaleza del fuego hasta el comportamiento de los materiales a altas temperaturas y los estándares que rigen su evaluación.

Un incendio es un proceso de combustión rápida caracterizado por la generación de calor y luz. La clasificación del fuego es fundamental para determinar los materiales que pueden controlarlo y las medidas de prevención adecuadas. Según la norma NFPA 10 (2022), los fuegos se clasifican en cinco tipos principales:

- Tipo A: Se producen en materiales inflamables ordinarios como madera, tela, hojas de papel y plásticos.
- Tipo B: Producidos en materiales como solventes y alcoholes.
- Tipo C: Producidos en equipos eléctricos.
- Tipo D: Se generan en materiales como magnesio (Mg), titanio (Ti) o sodio (Na).
- Tipo K: Se generan aparatos utilizados en cocina con aceites y grasas combustibles.

Para el diseño estructural, esta clasificación se simplifica a menudo basándose en la naturaleza del combustible y la evolución de la temperatura en el tiempo. En este

trabajo, se consideran dos tipos principales de incendios:

- Fuego Celulósico: Originado en materiales como madera, papel y textiles (Clase A), es el más común en edificaciones residenciales y comerciales. Se caracteriza por un desarrollo relativamente lento, alcanzando temperaturas elevadas de forma gradual. La curva de fuego estándar utilizada en los ensayos de laboratorio (descrita más adelante) está diseñada

para simular este tipo de incendio.

- Fuego de Hidrocarburos: Relacionado con líquidos inflamables (Clase B), es típico de instalaciones industriales, plataformas petroleras y plantas químicas. Estos incendios son mucho más severos, con un aumento de temperatura extremadamente rápido y un potencial destructivo mayor, incluyendo el riesgo de explosiones.

Tabla 1. Tiempo mínimo de resistencia al fuego

Uso del edificio	Tiempo de resistencia (minutos)			
	Altura del último piso sobre el suelo			
	< 5min	< 18min	30min	> 30min
Oficinas	30	60*	90*	
Tiendas y comercio	60*	60	90*	
Reuniones y actividades recreativas	60*	60	90*	120 más
Industrial	60*	90*	120*	rociadores
Almacenamiento	60*	90*	120*	
Estacionamientos – otros	30	60	90	
Estacionamientos - abierto	15	15	15	60

* Se reduce en 30 minutos cuando se instalan aspersores

Fuente: (Fire safety, Volume 2 – Buildings other than Dwellings, 2020)

Normativas y Ensayos de Resistencia al Fuego

Para garantizar la seguridad y estandarizar el rendimiento de los materiales, existen normativas internacionales que prescriben cómo

se deben realizar los ensayos de resistencia al fuego. El objetivo de estos ensayos es determinar el tiempo (en minutos u horas) que un elemento constructivo puede resistir un incendio simulado sin perder su función estructural o de contención.

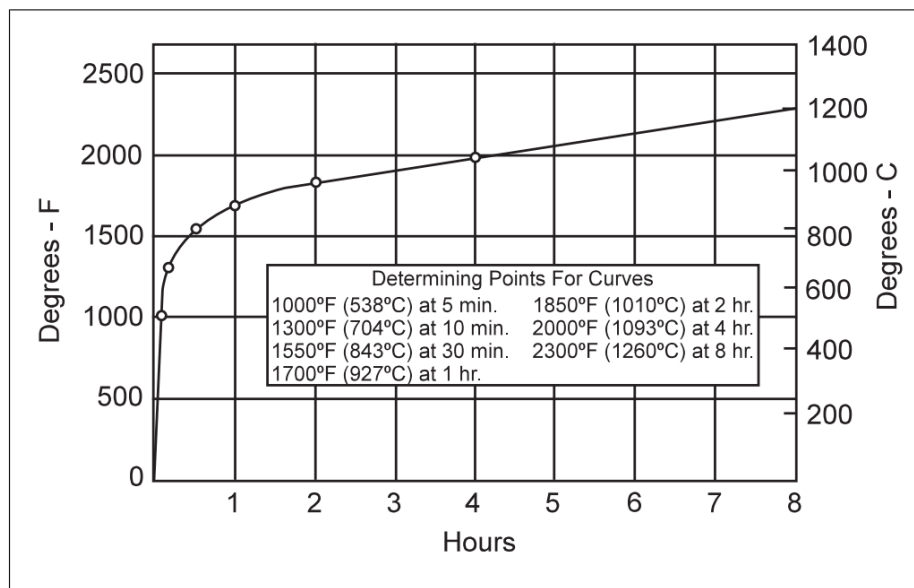
Las normas de ensayo más reconocidas a nivel internacional incluyen:

- ASTM E119 (EE. UU.): "Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials". Es una de las más utilizadas en América.
- ISO 834 (Internacional): "Fire-resistance tests - Elements of building construction".

- UNE-EN 1363-1 (Europa).
- BS 476 (Reino Unido): "Fire tests on building materials and structures".

Todas estas normas emplean un concepto fundamental: la curva estándar tiempo-temperatura. Esta curva define el aumento de la temperatura dentro de un horno de ensayo a lo largo del tiempo, simulando un incendio celulósico.

Figura 3. Curva estándar tiempo-temperatura ASTM E 119



Fuente: (DS 1-21 Fire Resistance of Buildings Assemblies, 2012)

3. Resultados y discusión

Protectores contra fuego industrializados

La mayoría de los productos utilizados como sistemas de protección pasiva contra incendios industrializados se encuentra

incluida en el "UL Fire Resistance Directory", una referencia técnica de carácter normativo que avala su desempeño conforme a estándares internacionales. Este directorio compila materiales y sistemas constructivos evaluados mediante metodologías de ensayo

estandarizadas de resistencia al fuego, tales como las normas de la propia UL (Underwriters Laboratories), garantizando así su

idoneidad y desempeño confiable en aplicaciones críticas de seguridad estructural.

Tabla 2. Tipos de protección de Underwrites Laboratories

Número	Tipo de protección
000-099	Unidades de construcción compuestas por paneles prefabricados (proveedores limitados de materiales)
100-199	Cubierta prefabricada resistente al fuego (camisas metálicas rellenas de hormigón alrededor de un núcleo de acero)
200-299	Envoltura endotérmica (envoltura endotérmica que absorbe el calor) y sistemas de envoltura cerámica
300-399	Tableros de fibra mineral (sistemas de una y varias capas)
400-499	Sistemas de listones y yeso (sistemas de yeso de vermiculita y perlita)
500-599	Sistemas de placas de yeso (placas de múltiples capas aplicadas directamente o con soporte de pernos metálicos)
600-699	Recubrimientos de masilla (recubrimiento de masilla intumescente y sublimante)
700-899	Materiales resistentes al fuego aplicados por aspersión
900-999	Protección de mampostería

Fuente: (Steel Design Guide 19 Fire Resistance of Structural Steel Framing, 2003)

Yeso (Gypsum Board): Su superpoder contra el fuego está escondido en su química. El yeso contiene moléculas de agua en su estructura (por eso es un sulfato de calcio dihidratado). Cuando el fuego lo ataca, el yeso no se quema; en su lugar, empieza un proceso que consume el calor: libera esa agua en forma de vapor. Es como si sudara para enfriarse. Este proceso mantiene la temperatura a raya, alrededor de los 100 °C, hasta que toda el agua se ha evaporado, dándole un tiempo precioso al acero

que está detrás. Este proceso consume una gran cantidad de energía térmica y mantiene la temperatura de la superficie no expuesta en torno a los 100°C hasta que toda el agua se ha evaporado, retrasando significativamente la transferencia de calor al acero.

Gypsum Tipo X: está específicamente diseñado para la resistencia al fuego, conteniendo fibras de vidrio y otros aditivos en su núcleo para mejorar su integridad estructural a altas temperaturas. El

yeso es una solución económica, ligera y fácil de instalar. Sin embargo, es susceptible al daño por impacto y a la humedad. Su aplicación se realiza en seco, lo que agiliza la construcción. Es ideal para muros cortafuego y protección de elementos estructurales en interiores.

Lana Mineral (Mineral Wool Board): La lana mineral es un material aislante no combustible fabricado a partir de fibras de roca basáltica o escoria reciclada. Funciona principalmente como un aislante térmico de alta eficiencia debido a su estructura fibrosa que atrapa el aire, lo que le confiere una muy baja conductividad térmica. Además, tiene un punto de fusión superior a los 1000°C. La lana mineral ofrece un excelente aislamiento térmico y acústico. Es más resistente a la humedad que el yeso y ofrece una protección más robusta. Su instalación también es en seco, pero suele ser más costosa que el yeso. Es una solución muy eficaz, tan eficaz que se adapta a cualquier entorno de trabajo

Hormigón: es uno de los materiales más tradicionales y efectivos para la protección contra fuego. Su eficacia

se debe a su baja conductividad térmica, su alta capacidad calorífica (absorbe mucho calor antes de aumentar su temperatura) y su naturaleza no inflamable. El concreto ofrece una protección extremadamente robusta y duradera, resistente a impactos y a la intemperie. Sin embargo, su aplicación (encofrado y vertido) es un proceso húmedo, lento y que añade un peso significativo a la estructura, lo que debe ser considerado en el diseño de las cimentaciones.

Materiales Aplicados por Aspersión (SFRM): son el método más común para proteger grandes áreas de acero estructural de forma rápida. Se aplican como una lechada húmeda que se adhiere al sustrato y se endurece para formar una capa aislante.

Recubrimientos Intumescentes: Las pinturas o recubrimientos intumescentes son una solución de alta tecnología que se aplica como una capa delgada de pintura. Cuando se exponen a temperaturas de incendio (aproximadamente 200-250°C), sufren una reacción química y se expanden hasta 50-100 veces su espesor original, formando una

capa de carbón porosa y aislante. Esta capa protege el acero del calor. Su principal ventaja es estética, ya que permiten dejar la estructura de acero expuesta con un acabado liso y de alta calidad. Son mucho más

ligeros que otros métodos. Sin embargo, son la opción más costosa y requieren una preparación de la superficie muy cuidadosa y una aplicación por personal especializado.

Tabla 3. Comparación de Protectores Industrializados

Característica	Mecanismo	Aplicación	Peso Añadido	Costo Relativo	Durabilidad
Yeso (Tipo X)	Calcinación (libera vapor)	Seca, atornillado	Bajo	Bajo	Baja (sensible a impacto/humedad)
Lana Mineral	Aislamiento térmico	Seca, fijación mecánica	Bajo a moderado	Moderado	Buena
Hormigón Revestido	Aislamiento y masa térmica	Húmeda, encofrado y vertido	Muy Alto	Moderado a Alto	Muy Alta
SFRM (Cementicio)	Aislamiento poroso	Húmeda, aspersión	Moderado	Bajo a Moderado	Moderada (sensible a impacto)
Pintura Intumescente	Expansión (formación de capa extra)	Húmeda, brocha/rodillo/aspersión	Muy Bajo	Muy Alto	Buena (requiere capa de sello)

Protectores Contra Fuego de Origen Natural

Ahora, se sale de la fábrica y se mira a la naturaleza. Los materiales que se usan en bioconstrucción no solo son ecológicos y saludables; tienen una resistencia al fuego que sorprende.

Tierra Apisonada (Tapial) y Adobe: Tanto el tapial como el adobe son materiales a base de

tierra (arcilla, arena, limo). Son inherentemente no combustibles. Su alta masa térmica y baja conductividad térmica hacen que el calor penetre muy lentamente a través de ellos. La tierra es una opción extremadamente duradera, económica (si se usa material local) y sostenible. El principal desafío para su uso en la protección de acero es la integración constructiva (cómo revestir una columna o viga de acero

con tapial) y la falta de estandarización en los códigos de construcción modernos.

Fardos de Paja (Straw Bale):

Aunque la paja suelta es altamente inflamable, cuando se compacta densamente en fardos y se reviste con un revoque de tierra o cal, su comportamiento ante el fuego es excelente. La alta densidad de los fardos limita el oxígeno que puede ser utilizado para la combustión. Cuando se expone al fuego, la superficie del revoque y la primera capa de paja se carbonizan, formando una capa de carbón aislante que protege el interior del fardo. La construcción con paja es un sistema híbrido ideal para combinar con estructuras de pórticos de acero, donde la paja actúa como cerramiento y aislante. Ofrece un aislamiento térmico y acústico superior. Sus principales retos son la protección contra la humedad.

Hormigón de Cáñamo

(Hempcrete): El hempcrete es un biocompuesto hecho de la médula leñosa de la planta de cáñamo, un aglutinante a base de cal, y agua. No es un material estructural, sino un material de relleno y aislante. Su resistencia al fuego se debe a la

combinación de la cal y la sílice presente en el cáñamo. Al exponerse al calor, libera vapor de agua y la cal se calcina, en un proceso endotérmico que absorbe calor. El hempcrete es un material carbono-negativo, ya que la planta de cáñamo absorbe más CO₂ durante su crecimiento del que se emite en la producción del material. Es ligero, transpirable y resistente a plagas. Su principal barrera es la falta de inclusión en la mayoría de los códigos de construcción y la disponibilidad variable de la materia prima.

Madera (Mass Timber): Surge la pregunta ¿madera para proteger del fuego? Suena contradictorio, ¿verdad? Pues resulta que los grandes bloques de madera maciza (lo que se conoce como mass timber) tienen un comportamiento ejemplar en un incendio. Cuando el fuego la alcanza, la superficie de la madera se quema y crea una capa de carbón. Este carbón actúa como un escudo aislante perfecto que protege el núcleo de la madera, que sigue intacto y manteniendo su capacidad estructural. La madera se sacrifica a sí misma de forma lenta y predecible para proteger el interior.

La madera es un material renovable y secuestra carbono. Su uso como protección para el acero podría consistir en "revestimientos sacrificiales" de madera maciza. Sin

embargo, su naturaleza combustible requiere un diseño cuidadoso y su aplicación directa para proteger acero no está estandarizada.

Tabla 4. Comparación de Protectores Naturales

Características	Mecanismo	Resistencia al Fuego	Sostenibilidad	Aplicación	Desafíos
Tierra (Tapial/Adobe)	No combustible, masa térmica	Excelente (4h+)	Muy Alta (material local)	Insitu, requiere encofrado/moldes	Estandarización, integración
Fardos de Paja	Carbonización, falta de oxígeno	Muy Buena (2h+)	Muy Alta (subproducto agrícola)	En seco, como mampostería	Protección de la humedad, mano de obra
Hempcrete	Calcinación, liberación de vapor	Buena (1h+)	Carbono-negativo	Húmeda, encofrado o proyectado	Estandarización, costo
Madera (Mass Timber)	Carbonización predecible	Buena y Calculable	Renovable	En seco, carpintería	Naturaleza combustible, uniones

Este análisis comparativo revela que no existe una solución única o perfecta. La elección del material de protección pasiva debe ser el resultado de un análisis multicriterio que considere el tiempo de resistencia al fuego requerido, las condiciones ambientales, el costo, la durabilidad, el peso añadido, la sostenibilidad y la estética deseada. Mientras los materiales industrializados ofrecen soluciones probadas y estandarizadas, el creciente interés en la construcción sostenible impulsa la necesidad de investigar y codificar el uso de materiales naturales, que

demuestran un rendimiento prometedor y ofrecen beneficios ambientales significativos. En resumen, el camino hacia edificaciones más seguras y resilientes ante el fuego pasa por una combinación de conocimiento técnico riguroso, innovación en materiales y una visión holística que abrace tanto la seguridad como la sostenibilidad.

Esta investigación ha recopilado y analizado de forma sistemática una amplia gama de materiales de protección pasiva contra incendios para estructuras de acero, abarcando tanto soluciones

industrializadas convencionales como alternativas prometedoras de origen natural. El estudio ha permitido no solo crear un recurso técnico unificado, sino también extraer conclusiones significativas sobre el estado del arte y delinear recomendaciones clave para el futuro del sector.

4. Conclusiones

Por muy bueno que sea, el acero se debilita con el calor. La protección pasiva no es un extra, es una pieza fundamental para garantizar que un edificio no se derrumbe y que la gente tenga tiempo de salir.

Los materiales de siempre (yeso, lana mineral, pinturas intumescentes) nos dan una gran tranquilidad. Han sido probados hasta la saciedad bajo normas internacionales y sabemos cómo se van a comportar. La elección entre ellos dependerá del presupuesto, de la estética que busquemos y de la obra.

Materiales como la tierra, los fardos de paja o el hempcrete no son solo una moda ecológica. Su capacidad para resistir el fuego es impresionante, a veces incluso

superior a las soluciones convencionales. Si a eso le sumamos que son sostenibles y saludables, tenemos unos candidatos muy serios para la construcción del futuro.

La mayor aportación ha sido crear una guía para navegar este mundo tan complejo. Al poner toda la información en un solo lugar, de forma clara y comparada, se espera que los profesionales puedan tomar decisiones mejores y más rápido, considerando todas las opciones disponibles.

Los protectores de origen natural como el tapial, el adobe, los fardos de paja y el hempcrete demuestran un desempeño en resistencia al fuego que es, como mínimo, destacable, y en muchos casos, superior al de varias soluciones convencionales. Su capacidad para alcanzar resistencias de 2 a 4 horas, combinada con sus beneficios de sostenibilidad (baja energía incorporada, secuestro de carbono, uso de recursos locales), los posiciona como una alternativa viable y deseable para la construcción moderna.

El estudio subraya que los sistemas de protección pasiva y activa no deben considerarse excluyentes, sino profundamente complementarios. Una estrategia de seguridad contra incendios robusta e integral se logra mediante la combinación de ambos enfoques: la protección pasiva garantiza la integridad estructural, mientras que la activa trabaja para suprimir el fuego en sus etapas iniciales.

La principal contribución de este trabajo es la sistematización de información previamente dispersa. Al presentar un catálogo estructurado y un análisis comparativo, se facilita una toma de decisiones más rápida, informada y optimizada para los profesionales del sector, permitiéndoles evaluar un abanico más amplio de soluciones.

Existe una brecha significativa entre el rendimiento probado de muchos materiales naturales y su aceptación y codificación en las normativas de construcción convencionales. Esta brecha representa la principal barrera para su adopción generalizada y destaca un área crítica para futuras investigaciones y desarrollo normativo.

Es crucial promover y financiar la investigación experimental en materiales naturales. Se deben realizar ensayos de resistencia al fuego bajo normas internacionales reconocidas (especialmente ASTM E119 e ISO 834) para validar cuantitativamente el desempeño de materiales como el hempcrete, el adobe estabilizado, y sistemas híbridos de acero y paja. Esto generará los datos necesarios para su futura normalización.

Crear y validar modelos numéricos avanzados (mediante análisis de elementos finitos) que simulen el comportamiento termo-mecánico de estructuras de acero protegidas con materiales naturales. Estos modelos permitirían optimizar diseños y reducir la necesidad de costosos ensayos a gran escala.

Realizar análisis de ciclo de vida (LCA) comparativos entre protectores industrializados y naturales, considerando no solo la resistencia al fuego sino también el impacto ambiental, el costo total (incluyendo mantenimiento) y la salud de los ocupantes.

Fomentar el uso y la difusión de catálogos técnicos como el

presentado en este estudio para facilitar la selección informada de protectores contra fuego⁸³. Los profesionales deben considerar el espectro completo de opciones, yendo más allá de las soluciones a las que están acostumbrados.

Desarrollar y participar en programas de capacitación continua sobre el diseño, especificación y aplicación correcta de sistemas de protección pasiva, con un énfasis creciente en las nuevas tecnologías y los materiales sostenibles.

Adoptar un enfoque de diseño integrado desde las fases tempranas del proyecto, donde las decisiones sobre la protección contra incendios se tomen en conjunto con las decisiones estructurales y arquitectónicas. Esto es especialmente importante al considerar recubrimientos intumescentes (estética) o materiales naturales (integración constructiva).

Incentivar la creación de comités para revisar y actualizar las normativas de construcción, de manera que integren materiales naturales de rendimiento probado. Esto podría comenzar con la creación de apéndices o guías de

diseño específicas, como ya existe en algunos códigos para la construcción con paja.

Desarrollar políticas públicas y programas de incentivos (fiscales, certificaciones, etc.) que promuevan el uso de materiales de construcción sostenibles y de bajo impacto ambiental, incluyendo aquellos con excelentes propiedades de resistencia al fuego.

Bibliografía

- American Society of Civil Engineers. (2007). ASCE/SEI/SFPE 29-05: Standard Calculation Methods for Structural Fire Protection.
- Andanari, M. W., & Erwand, D. (2024). Fire Protection Systems, Life-Saving Facilities, and Fire Management in Depok City in 2020: A Case Study. *The Indonesian Journal of Occupational Safety and Health*, 13(3), 304–313. <https://doi.org/10.20473/IJOSH.V13I3.2024.304-313>
- Brameld, M., & Baensch, T. (2023). Development of a novel Passive Fire Protection system – Humidur Char. *The APPEA Journal*, 63(2), S155–S158. <https://doi.org/10.1071/AJ22081>

- Čachová, M., Koňaková, D., Čechmánek, R., Vejmelková, E., & Keppert, M. (2016). Sustainable composites for fire protection of building structures. CESB 2016 - Central Europe Towards Sustainable Building 2016: Innovations for Sustainable Future. <https://www.scopus.com/pages/publications/84986918187?origin=resultslist>
- Correia, J. R., Branco, F. A., & Ferreira, J. G. (2010). The effect of different passive fire protection systems on the fire reaction properties of GFRP pultruded profiles for civil construction. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(3), 441–452. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2009.12.002>
- Covi, P., Tondini, N., Lamperti Tornaghi, M., Molina, F. J., Pegon, P., & Tsionis, G. (2024). Seismic experimental analysis of a full-scale steel building with passive fire protections. *Engineering Structures*, 300. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117203>
- Djunaidi, Z., Tuah, N. A. A., & Rafifa, G. (2018). Analysis of the Active and Passive Fire Protection Systems in the Government Building, Depok City, Indonesia. *KnE Life Sciences*, 4(5), 384-398–384–398. <https://doi.org/10.18502/KLS.V4I5.2569>
- Farida, F. M., Sofwan, A., & Surahman, A. (2021). A Review of Preliminary Experimental Factors of Making Geopolymer Paste as a Passive Fire Protection System. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 11(2), 674–681. <https://doi.org/10.18517/IJASEIT.11.2.4193>
- Garg, K., Singh, S., Rokade, M., & Singh, S. (2023a). The Behavior of Passive Fire Protection Materials Used for Fire Protection of Steel Structures in Standard, Hydrocarbon, and Jet Fire Exposure. *Fire Technology*, 59(5), 2517–2541. <https://doi.org/10.1007/s10694-023-01434-3>
- Garg, K., Singh, S., Rokade, M., & Singh, S. (2023b). The Behavior of Passive Fire Protection Materials Used for Fire Protection of Steel Structures in Standard, Hydrocarbon, and Jet Fire Exposure. *Fire Technology*, 59(5), 2517–2541. <https://doi.org/10.1007/s10694-023-01434-3>
- G.C., C. (2007). Design of composite steel floor systems for severe

- fires. Proceedings of 8th Pacific Structural Steel Conference - Steel Structures in Natural Hazards, PSSC 2007.
<https://www.scopus.com/pages/publications/55649101424?origin=resultslist>
- H.X., Y., & J.Y., R. L. (2005). Steel framed structures subjected to the combined effects of blast and fire - Part 2: Case study. *Advanced Steel Construction*.
<https://www.scopus.com/pages/publications/77952896406?origin=resultslist>
- Kline, T. (2004). Fire hazard. *Hydrocarbon Engineering*.
<https://www.scopus.com/pages/publications/0347337958?origin=resultslist>
- Lamont, S., Lane, B., & Usmani, A. (2005). The behaviour of multi-storey composite steel frame structures in response to compartment fires. *Fire Safety Science*, 177–188.
<https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.8-177>
- Passive fire protection: Intumescent coatings. (2014). *Journal of Protective Coatings and Linings*.
<https://www.scopus.com/pages/publications/84907976232?origin=resultslist>
- Ruddy, J. L., Joseph, S. E., Marlo, P., Ioannides, S. A., Alfawakhiri, F., & Eng, P. (2003). Steel Design Guide Fire Resistance of Structural Steel Framing.
- Sari, A., Ramana, E., Dara, S., & Azimov, U. (2016). Passive fire protection PFP optimization in offshore topsides structure. *Offshore Technology Conference Asia 2016, OTCA 2016*, 3275–3283.
<https://doi.org/10.4043/26579-ms>