



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO IGNÍFUGO PARA
APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN.**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL - CONSTRUCCIÓN

P R E S E N T A :

MAURICIO CORTÉS MARTINEZ



TUTOR:

Dra. Mirna Rosa Estrada Yáñez

México, D.F. Febrero 2010

JURADO ASIGNADO

Presidente: **Ing. Luis Armando Díaz Infante De La Mora**

Secretario: **Dr. Jesús Hugo Meza Puesto**

Vocal: **Dra. Mirna Rosa Estrada Yáñez**

1^{er}. Suplente: **Ing. Luis Zárate Rocha**

2^{do}. Suplente: **M.I. Marco Tulio Mendoza Rosas**

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM.

Tutor de Tesis:

Dra. Mirna Rosa Estrada Yáñez.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, que por medio de la Facultad de Ingeniería me dio la oportunidad y los medios para adquirir mi formación.

Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por los recursos que me otorgó para poder desarrollar mis estudios.

A la Dra. Mirna Rosa Estrada Yáñez, directora de la tesis, por su invaluable apoyo en la realización de este trabajo, por su paciencia, dedicación, comprensión y formación que me proporcionó durante todo el tiempo en el que desarrollé mi trabajo bajo su tutela.

Al Ing. Luis Zarate Rocha y al Mtro. Sergio Macuil Robles por su apoyo para desarrollar este trabajo.

A mis profesores y jurado, Dr. Jesús Hugo Meza Puesto, M.I. Marco Tulio Mendoza Rosas y al Ing. Luis Armando Díaz Infante De La Mora, por el tiempo dedicado en la revisión, por sus aportaciones y consejos para mejorar el trabajo final.

A mi familia por su apoyo incondicional.

A mis amigos y compañeros, por todos los momentos que pasamos juntos.

A los técnicos Leticia Baños López, Esteban Fragoso y Ernesto Sánchez Colín.

CONTENIDO

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

INTRODUCCIÓN, OBJETIVO, ORIGINALIDAD, HIPÓTESIS Y ANTECEDENTES	8
INTRODUCCIÓN	8
OBJETIVO	9
ORIGINALIDAD	9
HIPÓTESIS	10
ANTECEDENTES	10
Capítulo 1 GENERALIDADES	14
1.1 FUEGO EN LA EDIFICACIÓN	14
1.1.1 Fuego e Incendio	15
1.1.1.1 Modelos de fuego	17
1.1.1.2 Fases de un incendio	18
1.1.1.3 Propagación del fuego	19
1.1.1.4 Clasificación del fuego	21
1.1.1.5 Extinción y agentes extinguidores del fuego	22
1.1.2 Legislación y Reglamentación	25
1.1.2.1 Requerimientos esenciales en la edificación	26
1.1.3 Seguridad en Caso de Incendio en las Edificaciones	27
1.1.3.1 Prevención de incendios	28
1.1.3.2 Protección en caso de incendio	28
1.1.3.3 Principios de la seguridad en caso de incendio	29
1.1.3.4 Árbol de decisiones para la seguridad contra incendios	33
1.1.3.5 Métodos de evaluación de riesgo de incendio en edificaciones	35
1.1.3.6 Grado de riesgo en las edificaciones	35
1.1.3.7 Comportamiento al fuego de los materiales en la edificación	38
1.1.3.8 Seguridad contra incendio en la construcción	44

1.2	POLÍMEROS EN LA EDIFICACIÓN	44
1.2.1	Química de los Polímeros	47
1.2.1.1	Definición y clasificación	47
1.2.1.2	Síntesis de polímeros	49
1.2.1.3	Comportamiento térmico	50
1.2.1.4	Comportamiento mecánico	52
1.2.1.5	Degradación térmica de los polímeros	54
1.2.1.6	Proceso de combustión	55
1.2.1.7	Aplicación de polímeros en la construcción	57
1.2.2	Espumas de Poliuretano	57
1.2.2.1	Materias primas	58
1.2.2.2	Generalidades de la preparación, espuma PUR	62
1.2.2.3	Procedimiento de fabricación de la espuma PUR	63
1.2.2.4	Aplicación en la edificación	63
1.3	NANOCOMPUESTOS	78
Capítulo 2 EXPERIMENTACIÓN		81
2.1	MATERIALES	81
2.2	EQUIPO	81
2.3	PROCEDIMIENTOS	82
2.3.1	Preparación de la Espuma PUR pura y con MMT	82
2.3.1.1	Preparación de la arcilla MMT	85
2.3.1.2	Preparación del desmoldante	85
2.3.1.3	Procedimiento de fabricación de la espuma PUR	85
2.4	TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN	88
2.4.1	Prueba de Inflamabilidad	88
2.4.1.1	Diseño de chimenea y características de las muestras	88
2.4.1.2	Determinación de la densidad aparente	90
2.4.1.3	Diseño del mechero	90
2.4.1.4	Calibración de la flama	90
2.4.1.5	Procedimiento de medición	90
2.4.2	Prueba Mecánica	91
2.4.3	Análisis Termogravimétrico(TGA)	91
Capítulo 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN		92
3.1	EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE INFLAMABILIDAD DE LAS ESPUMAS	92
3.2	EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE ESTABILIDAD TÉRMICA	96
3.3	EVALUACIÓN DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS	97
CONCLUSIONES		100
REFERENCIAS		101

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS

ABS	Acrilnitrilo Cutadieno Estireno
ADSI	Árbol de Decisiones para la Seguridad Contra Incendio
CFC	Monofluorotriclorometano
CO ₂	Dióxido de Carbono
CP	Cantidad de Partida
CPE	Polietileno Clorado
CR	Cantidad Residual
DM	Densidad Media
DS	Desarrollo Sostenible
E	Empuje
EPE	Polietileno Expandido
FRP	Fibras Reforzadas de Plástico
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GP	Grado de Polimerización
GRP	Polímero Reforzado con Fibras
MDI	Diisocianato de Metilendifenileno
NAFTA	North American Free Trade Agreement (TLCAN)
NC	Nanocompuesto
NFPA	National Fire Protection Association
NOM	Norma Oficial Mexicana
OH	Hidroxilo
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidad
PEBD	Polietileno de Baja Densidad
PELBD	Polietileno Lineal de Baja Densidad

PET	Polietilenteraftalato
PH	Perdida de Espumante
PIC	Polímero Impregnado de Concreto
PIR	Poliisocianurato
PMMA	Polimetilmetacrilato
PP	Polipropileno
PPO	Polióxido de Fenileno
PS	Poliestireno
PSE	Poliestireno Expandido
PU	Poliuretano
PUDC	Cloruro de Polivinilideno
PUR	Poliuretano Rígido
PVC	Policloruro de Vinilo
PVDF	Polifluoruro de Vinilideno
SBS	Estireno Butadieno Estireno
td	Temperatura de Descomposición
Tf	Temperatura de Fusión
Tg	Temperatura de Transición Vítreá
UV	Ultra Violeta
V	Volumen
UF	Formaldehido

INTRODUCCIÓN, OBJETIVO, ORIGINALIDAD, HIPÓTESIS Y ANTECEDENTES

INTRODUCCIÓN

El comportamiento de los polímeros aplicados en la Industria de la Construcción, han demostrado ser productos apropiados a las nuevas tendencias constructivas. El diseño y la construcción de obras sostenibles radica en la utilización de los recursos eficientemente, esta innovadora forma constructiva trata de afectar lo menos posible al ambiente. La Ingeniería confía en los polímeros para ayudar a maximizar el confort así como el rendimiento energético, durabilidad y funcionamiento de las edificaciones¹.

La espuma de PoliUretano Rígida (PUR) es un polímero utilizado como aislante térmico, por lo que en la mayoría de sus aplicaciones en la edificación el aislamiento térmico juega un papel destacado². Sin embargo por su estructura química es altamente inflamable, está formado por compuestos orgánicos, lo cual lo convierte en un material peligroso al estar en contacto con el fuego³. Para incrementar su resistencia a incendiarse, retrasar la propagación de la llama, encendido, reducir el calor despedido, así como suprimir o reducir la producción de humo, es necesario añadir algunos componentes ignifugantes para mejorar las propiedades frente al fuego. Los retardantes de fuego que se utilizan generalmente son compuestos halogenados, los cuales desprenden vapores en el proceso de combustión que son altamente tóxicos, y otros que pueden contribuir al calentamiento global^{4,5}.

Las propiedades de los nanocompuestos poliméricos han sido objeto de diversos estudios, debido a que se han encontrado grandes ventajas frente a compuestos convencionales^{6,7}. La inflamabilidad es una de estas propiedades, pero también se ha encontrado que contribuyen a desprender menos gases tóxicos y contaminantes, productos del proceso de combustión.

La Ciencia e Ingeniería de los materiales es un campo interdisciplinario que se ocupa de inventar nuevos materiales o mejorar los ya conocidos, como es el caso de este trabajo; mediante el desarrollo de un conocimiento más profundo de las relaciones entre microestructura, composición, síntesis y procesamiento de los materiales.

La presente investigación evalúa el comportamiento frente al fuego de la espuma PUR con arcilla nanoestructurada, materia prima natural, no contaminante, versátil y de fácil disponibilidad en territorio nacional.

Para poder hacer esta modificación al material se desarrollaron temas relacionados, como son el fenómeno de fuego, percance de incendio, la relación fuego-edificación, sin embargo también fue necesario conocer la composición del polímero, ya que nos indica la constitución química del material; arreglo atómico (estructura), el procesamiento, que indica el modo en que se conforman los materiales en componentes útiles y para poder causar cambios en las propiedades del material. Esta información fue necesaria para poder desarrollar la parte experimental del trabajo.

El estudio se complementó con un análisis mecánico al que se ven sometidos los materiales aplicados en la Industria de la Construcción.

OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

Contribuir con el desarrollo de un material compuesto polimérico contra fuego, espuma PUR, que pueda ser utilizado de la Industria de la Construcción.

ORIGINALIDAD

Continuar con el desarrollo de la metodología de un material compuesto polimérico, espuma PUR, con la adición de partículas de arcilla nanoestructurada la cual al quemarse no genera agentes tóxicos ni contaminantes, es una materia prima de existencia nacional. Generando una opción de material para las nuevas tendencias constructivas, haciéndolo más seguro.

Contribuir a difundir la prevención de accidentes con el uso de materiales seguros en la construcción.

HIPÓTESIS

- La presencia de las laminillas de arcilla en la espuma PUR inducirá un mejor comportamiento del material, aminorando la combustión y reflejado en una menor pérdida de masa del material.
- La relación polioliol-arcilla, con una buena dispersión de la arcilla, permitirá una igual distribución en toda la muestra y ejercerá su efecto como retardante a la flama en la espuma PUR.
- Al lograr una dispersión adecuada de la arcilla en la espuma PUR, se mantendrán o mejorarán las propiedades mecánicas del material.

ANTECEDENTES

Todo el mundo es cada vez más consciente de la necesidad de actuar con mayor responsabilidad para proteger nuestro mundo, pensando en las generaciones futuras. Esto se materializa en la búsqueda de un Desarrollo Sostenible (DS), actuando de tal forma que no se limiten las opciones económicas, sociales y ambientales disponibles para las futuras generaciones.

Partiendo de lo ya existente, es necesario seguir innovando, desarrollando productos, tecnologías y sistemas nuevos, aprendiendo de la experiencia para avanzar en nuestra contribución a una sociedad más sostenible⁸.

Las opciones para ahorrar energía no están agotadas. Existen muchas posibilidades para reducir el consumo de energía de una forma duradera en las edificaciones. El ahorro energético está íntimamente relacionado con el calentamiento de nuestro planeta. Desde el ámbito político e industrial se intenta luchar contra este fenómeno. El Protocolo de Kyoto aspira a rebajar la emisión global de los gases influyentes en el clima en un 5.2 % hasta 2012, en comparación con los niveles de 1990⁹.

La emisión desmesurada de dióxido de carbono CO₂, uno de los principales causantes del calentamiento global del planeta, prácticamente no presenta reducción¹⁰. Las posibilidades técnicas para ello ya existen, han sido maduradas y probadas en la práctica en ciertos sectores. Un

En la producción de un metro cúbico de espuma PUR se necesitan solamente 70 litros de petróleo. El uso de ese metro cúbico de espuma rígida para aislamiento ahorra, a lo largo de 50 años, unos 50 mil litros de combustible para climatización. A esto hay que añadir que se emiten a la atmósfera 19 mil kilogramos menos de CO₂ y de otros gases que perjudican al medio ambiente¹². Es una inversión que mejora la calidad de la edificación, aumenta su valor y se amortiza con rapidez a lo largo de los años.

Sin embargo estos materiales utilizadas como aislante térmico en la edificación, presentan un inconveniente al ser peligrosas si se ponen en contacto con el fuego o alguna fuente de ignición.

Tan sólo en Estados Unidos de acuerdo con las cifras publicadas por la National Fire Protection Association (NFPA), se reportaron 1,557,500 casos de incendio durante el año 2007, de los cuales¹³:

- Incendios en estructuras correspondió a un 34 %,
- En vehículos 19%,
- Incendios en el exterior y otros 49%.

Los incendios en edificaciones fueron 530,500. Uno por ciento más que el año pasado, tres mil civiles muertos, 15,350 heridos y más de \$10.6 billones de dólares en pérdidas. Las cifras son alarmantes, tomando en cuenta que el tipo de construcción estadounidense utiliza grandes cantidades de espuma PUR y que su aplicación es creciente, también en nuestro país el consumo aumenta, por lo que es importante dar una nueva opción de material, más seguro en cuanto a resistencia al fuego.

En nuestro país la cultura de prevención y protección contra el fuego es escasa, debido tal vez, al tipo de edificación que se ha venido desarrollando, en su mayoría con materiales cerámicos, no combustibles. Debido a las nuevas tendencias constructivas, materiales, tecnologías, es necesario saber los riesgos que corremos al utilizarlos y como poder mitigar su impacto. Los polímeros son materiales combustibles, que cada vez son más utilizados en toda la Industria de la Edificación y como Ingenieros encargados de este desarrollo debemos conocer uno de los graves problemas al que nos estamos enfrentando, que es la posibilidad de un incendio.

Con la inquietud de dar solución a ciertas problemáticas en las propiedades de los polímeros, es como surge la utilización de materiales nanocompuestos (NC) ¹⁴, donde se utiliza arcilla nanoestructurada como un nuevo aditivo retardante a la flama en diversos polímeros^{15,16,17,18,19,20,21}. La investigación sobre NC de PUR ha aumentado en los últimos años, la

caracterización estructural y las propiedades mecánicas son temas de gran interés, en cuanto a las propiedades térmicas, los estudios realizados son más recientes^{22,23,24,25,26}.

Como resultado en muchos de los trabajos, están de acuerdo en que la utilización de materiales nanocompuestos si afectan las propiedades de los materiales frente al fuego^{27,28,29}.

El mecanismo al que se le atribuye esta mejora en las propiedades es al de barrera, que consiste en la formación de una capa de residuos sólidos del polímero y la arcilla producto de la combustión, reteniendo la liberación de los gases combustibles y así se protege al polímero del calor de la llama, deteniendo el proceso químico de la combustión a través de un mecanismo físico^{30,31}.

CAPÍTULO UNO

GENERALIDADES

1.1 FUEGO EN LA EDIFICACIÓN

Un incendio es un percance previsible, costoso en pérdidas materiales y de vidas humanas. Las estadísticas indican que los incendios, principalmente en la Industria de la Construcción, aumentan con el progreso técnico y las indemnizaciones representan cantidades económicas considerables³².

Por otra parte, los grandes incendios con pérdidas humanas han ido sensibilizando a la opinión pública con respecto a este grave problema.

Las leyes obligan a tomar precauciones para evitar que el fuego se inicie y desarrolle, precauciones que se materializan en determinadas disposiciones que los Ingenieros debemos tomar en cuenta y definir desde el inicio de la creación de un proyecto.

Las disposiciones atañen a todo el equipo que interviene en la edificación, desde el arquitecto, los suministradores, pasando por el contratista, por mencionar algunos. Este problema es aún más complejo por el hecho de que los elementos de seguridad no afectan sólo una parte de la obra, sino todos los aspectos: electricidad, albañilería, fontanería, acabados, etc., en el caso de la construcción.

Diseñar una edificación estable y resistente al fuego constituye un trabajo importante, ya que la normativa nacional de prevención contra incendio no ha alcanzado todavía los niveles y amplitud, deseables.

Si bien existe, en el país, una reglamentación contra incendio, ésta fija los parámetros mínimos a tener en cuenta y no especifica los medios para conseguirlo, dejándolos a la iniciativa particular. Esta normalización se limita, en general, a la protección de las personas. En lo que respecta a

bienes, son la iniciativa privada y aseguradoras las que han redactado otras normas que complementa a las primeras.

1.1.1 Fuego e Incendio

Es necesario distinguir la diferencia fundamental existente entre las palabras fuego e incendio, ya que a menudo se usan indistintamente e incorrectamente.

La palabra fuego se refiere al fenómeno en sí y la palabra incendio implica una manifestación no deseada del fuego^{33.34}.

Para poder entender el fenómeno del fuego es indispensable saber; que al proceso químico de una o más sustancias produciendo una nueva se le llama reacción química, en este tipo de reacción puede haber desprendimiento o absorción de energía.

Las reacciones químicas pueden clasificarse en:

- Exotérmicas: desprenden energía calorífica,
- Endotérmicas: absorben calor.

La combustión es una reacción exotérmica autoalimentada con presencia de un combustible en fase sólida, líquida o gaseosa. Este proceso está relacionado con la oxidación del combustible, en el caso de la materia en fase sólida y líquida se vaporiza antes de arder. Es así como se entiende el desprendimiento de calor en un incendio ya que es uno de los productos de este tipo de reacción.

El agente oxidante más común es el oxígeno molecular del aire, que consta de un quinto de oxígeno y cuatro quintos de nitrógeno. Sin embargo hay ciertos productos químicos que son potencialmente oxidantes, que si se mezclan con materia combustible, producen una mezcla que reacciona fuertemente.

El proceso fundamental inherente a todo incendio es el desarrollo de una reacción de oxidación-reducción, exotérmica, que se denomina combustión. Los productos reaccionantes en este tipo de reacción son el oxidante y el reductor, que en terminología de incendios el reductor es denominado combustible y la mezcla gaseosa que contiene el oxidante en concentración suficiente para que se desarrolle la reacción se denomina comburente.

Reacción química de oxidación-reducción, exotérmica (combustión).

Reductor = Combustible

Oxidante = Comburente

Combustible + Comburente = Combustión

El factor preponderante de la reacción química del fuego, es el estado de la materia y de su facilidad para el intercambio químico oxidación-reducción.

Al analizar la estructura molecular de los tres estados de la materia, sólido, líquido y gas como elementos reductores, con la habitual manifestación del oxígeno como elemento oxidante, se deduce que en el estado sólido, al aumentar la temperatura puede llegar un momento en que los enlaces químicos se rompan perdiendo su estructura cristalina, pasando al estado líquido a través de un proceso de fusión. De este proceso se puede concluir que:

- Solamente los gases como tales y los vapores procedentes de los procesos de fusión y/o vaporización pueden desarrollar el fuego,
- Cuanto más pequeña es la división del combustible más posibilidad de oxidarse (mayor superficie).

Para que se inicie el fuego es necesario que el combustible y comburente se encuentren en el espacio y el tiempo, en un estado energético suficiente para que el choque molecular sea efectivo, verificándose la reacción. La energía precisa para que el combustible y comburente reaccionen se denomina energía de activación y es aportada por los focos de ignición.

La íntima relación oxidante y reductor sólo se logra mediante el aporte de una energía que aumentará la rapidez del proceso químico.

De la energía desprendida en la reacción, parte es disipada al ambiente provocando los efectos térmicos derivados del fuego y el resto calienta más productos reaccionantes, aportando la energía de activación precisa para que el proceso continúe, si esta energía no es suficiente, el proceso se detiene y si es superior a la necesaria el proceso se acelera. Si dicha energía es igual o superior a la necesaria el proceso se encadena desarrollándose en sucesivas etapas, mientras existan productos a reaccionar. Cuando el proceso transcurre de esta forma se dice que se está verificando la reacción en cadena³⁵.

Manifestaciones del fuego:

- Llamas,
- Calor,
- Humos,
- Gases.

1.1.1.1 Modelos de fuego

1.1.1.1.1 *Triángulo de fuego.* Este modelo ilustra un triángulo en el que, el combustible en presencia de un elemento comburente podría iniciar fuego si se le aplica la energía de activación suficiente, por medio de un foco de ignición. Un incendio necesita de la coincidencia en tiempo, cantidad y lugar de tres factores: combustible, comburente/oxidante y calor /foco de ignición.

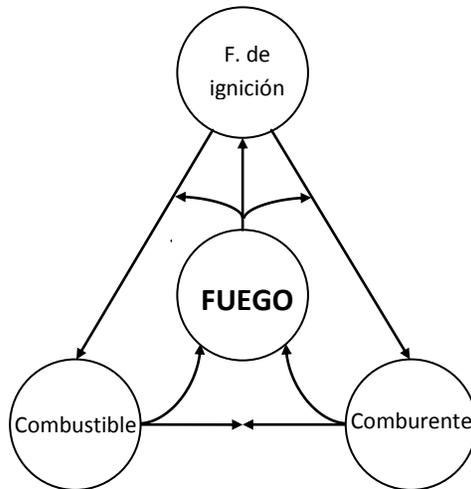


Figura 1.01. Triángulo de Fuego.

1.1.1.1.2 *Tetraedro de fuego.* En los últimos años se anexo al triángulo de fuego otro factor, la reacción en cadena, que es la reacción que proporciona el calor necesario para mantener el fuego.

Por lo tanto, se necesita de cuatro factores para que el fuego se inicie, se mantenga y propague:

- Combustible, comburente, calor/foco de ignición y la reacción en cadena.

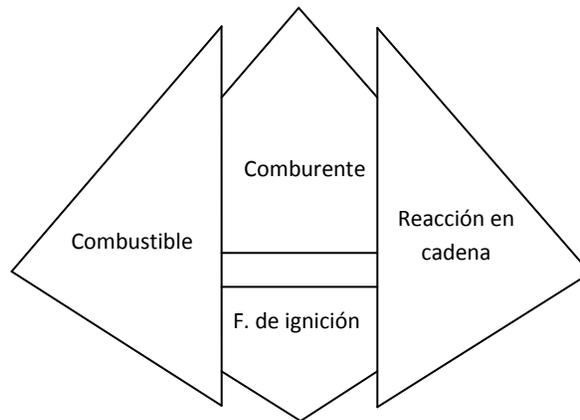


Figura 1.02. Tetraedro de fuego.

TABLA 1.01. EJEMPLOS, ELEMENTOS DEL TRIÁNGULO DE FUEGO		
ELEMENTOS DEL TRIANGULO DE FUEGO	TIPO	EJEMPLO
Combustible	Sólido	Carbón, madera, polímeros, turba, trapos, etc.
	Líquido	Gasóleo, queroseno, gasolina, alcohol, acetona, aceites, etc.
Comburente	Gas	Gas natural, propano, butano y gas LP.
	Sólido	Perclorato de amonio, permanganato de amonio o potasio.
Foco de ignición o calor	Líquido	Peróxido de hidrógeno, tetranitrometano y ácido perclórico.
	Gas	Oxígeno, ozono y óxido nitroso.
	Focos térmicos	Hornos, estufas, máquinas de motor de combustión, cigarrillos encendidos, calderas, condiciones ambientales, etc.
	Focos eléctrico	Cortocircuitos, chispas de los interruptores y motores, sobre carga eléctrica, electricidad estática, descargas eléctricas atmosféricas, etc.
	Focos mecánicos	Calor generado por fricción o rozamiento, chispas producidas por fricción y calor de compresión, etc.
	Focos químicos	Sustancias muy reactivas, oxidantes fuertes, reacciones exotérmicas y sustancias auto-oxidables o pirofóricas.
	Foco nuclear	Energía nuclear.

1.1.1.2 Fases de un incendio

Los incendios de edificios comienzan típicamente con la ignición, por diferentes causas, de algún material combustible, presente en el inmueble. A partir de ese momento, se produce un lento incremento de la temperatura en el área afectada, presentándose la fase de crecimiento y propagación de las llamas, consumiendo cantidades significantes de materiales combustibles fácilmente inflamables. El incremento de la temperatura en el lugar facilita la ignición de cantidades cada vez mayores de materiales combustibles, hasta alcanzar un punto en que se produce el llamado flashover o combustión brusca generalizada, definida como una transición súbita al estado de combustión generalizada de toda la superficie del conjunto de materiales combustibles incluidos dentro de un recinto.

A partir del flashover se llega rápidamente a un estado aproximado de equilibrio termodinámico del incendio, en que la cantidad de calor producido por unidad de tiempo es aproximadamente igual al calor desprendido por unidad de tiempo, debido a la convección, la radiación y la conducción, incluyendo la energía acumulada por calentamiento de los elementos

constructivos y los materiales depositados en el interior del lugar. En esta fase, el incendio se ha desarrollado totalmente y la temperatura en el recinto permanece aproximadamente constante. Si se realizan tareas de sofocación del incendio, por ejemplo con agua, el calor latente de vaporización de los volúmenes de agua volcados por unidad de tiempo, incide en el balance termodinámico, disminuyendo la temperatura del incendio, con lo cual se logra disminuir la intensidad y duración del mismo.

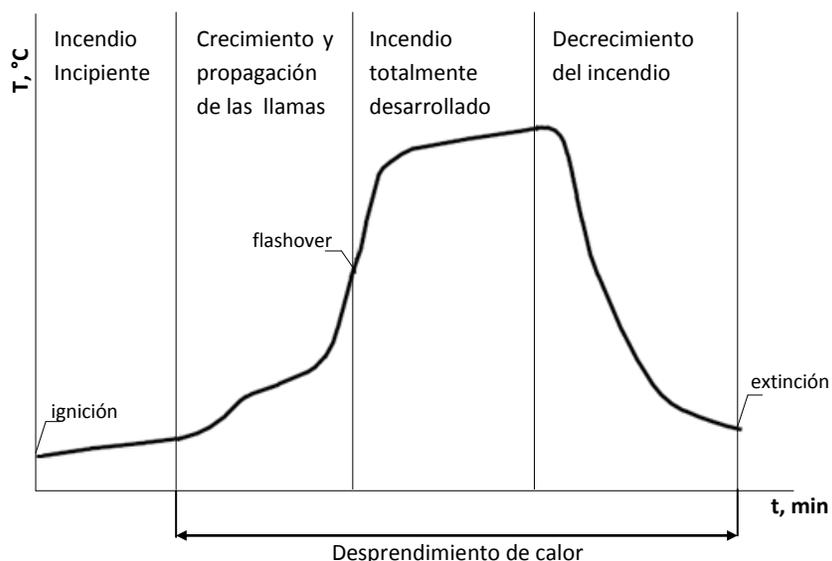


Figura 1.03. Fases de un incendio interior(<http://construccionyseguridad.blogspot.com>)

Transcurrido algún tiempo, la energía producida por el incendio empieza a decrecer y ya no alcanza a igualar las pérdidas de calor debidas a los fenómenos antes mencionados, el incendio entró en su fase de decrecimiento, con la disminución de la temperatura en el lugar, hasta la extinción total³⁶.

1.1.1.3 Propagación del fuego

El fuego se propaga por la transmisión de un material a otro, transfiriendo la energía térmica de tres maneras distintas:

1.1.1.3.1 Conducción. Es un mecanismo de transferencia energética en materiales sólidos. Se produce cuando un objeto está en contacto directo, pasando la energía térmica del objeto más caliente al de menor temperatura. Los materiales conductores de electricidad son generalmente

buenos conductores de calor. En otros materiales que no tienen la propiedad de conducir la electricidad el calor se transfiere por vibraciones en la estructura molecular.

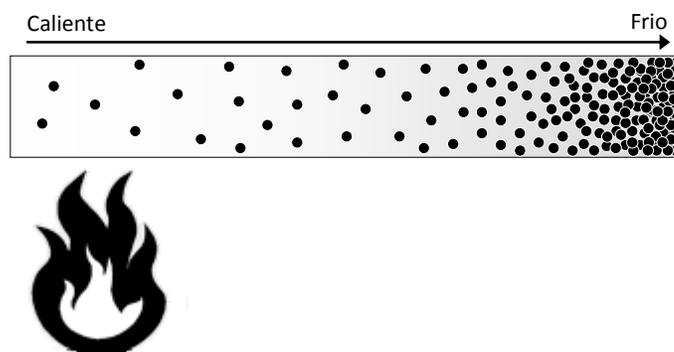


Figura 1.04. Conducción energética (NFPA's Illustrated Dictionary of Fire Service Terms).

Las propiedades de un material que influyen en el cálculo de la transferencia de calor son la densidad, calor específico y la conductividad térmica.

Hay dos propiedades derivadas útiles, según sea el caso. La difusividad térmica, se usa para determinar las velocidades de transferencia de calor y la inercia térmica que indica la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo así como la velocidad con la que la cede o absorbe del entorno.

TABLA 1.02. PROPIEDADES TÉRMICAS UTILIZADOS EN ALGUNOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN³⁷

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA K W/mK	CALOR ESPECIFICO C _p J/kgK	DENSIDAD P Kg/m ³	DIFUSIVIDAD TÉRMICA A m ² /s	INERCIA TÉRMICA K PCP W ² s/m ⁴ K ²
Cobre	387	380	8940	1.14x10 ⁻⁴	1.3x10 ⁹
Acero	45.8	460	7850	1.26x10 ⁻⁵	1.6x10 ⁸
Ladrillo	0.69	840	1600	5.2x10 ⁻⁷	9.3x10 ⁵
Concreto	0.8-1.4	880	1900-2300	5.7x10 ⁻⁷	2x10 ⁶
Vidrio	0.76	840	2700	3.3x10 ⁻⁷	1.7x10 ⁶
Yeso	0.48	840	1440	4.1x10 ⁻⁷	5.8x10 ⁵
PMMA	0.19	1420	1190	1.1x10 ⁻⁷	3.2x10 ⁵
Roble	0.17	2380	800	8.9x10 ⁻⁸	3.2x10 ⁵
Pino amarillo	0.14	2850	640	8.3x10 ⁻⁸	2.5x10 ⁵
Asbesto	0.15	1050	577	2.5x10 ⁻⁷	9.1x10 ⁴
Tablero aislante de fibra	0.041	2090	229	8.6x10 ⁻⁸	2.0x10 ⁴
Espuma de poliuretano	0.034	1400	20	1.2x10 ⁻⁶	9.5x10 ²
Aire	0.024	1040	1.1	2.2x10 ⁻⁵	---

1.1.1.3.2 Convección. Es la transferencia de calor por el movimiento de fluidos, líquidos o gases. La transferencia de calor por convección es un factor importante en la dispersión del fuego, así como en el transporte de humo y gases, al techo o fuera de la zona de incendio por los orificios.

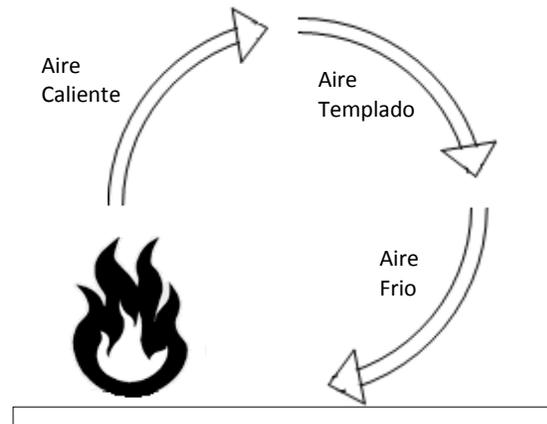


Figura 1.05. Convección energética (NFPA's Illustrated Dictionary of Fire Service Terms).

1.1.1.3.3 Radiación. Es la transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas a través del ambiente o un medio material. La radiación en un incendio es importante ya que por medio de este mecanismo se trasladan las llamas al material combustible, del humo caliente a los objetos y del edificio en llamas a los edificios colindantes³⁸.

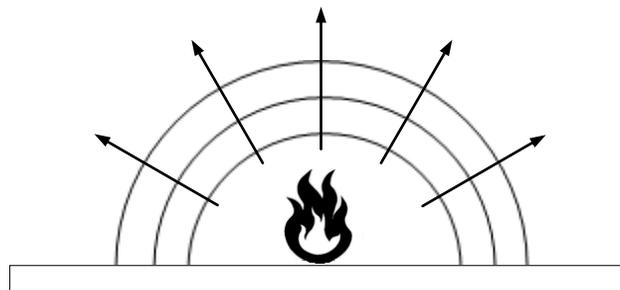


Figura 1.06. Radiación energética (NFPA's Illustrated Dictionary of Fire Service Terms).

1.1.1.4 Clasificación del fuego

Los servicios de seguridad han clasificado las diferentes categorías del fuego según el material sujeto a combustión.

1.1.1.4.1 Fuegos de clase A. Fuegos de materiales sólidos de naturaleza orgánica tales como trapos, viruta, papel, madera, basura, y en general, materiales sólidos que al quemarse se agrietan, producen cenizas y brasas.

1.1.1.4.2 Fuegos de clase B. Fuegos que se producen como resultado de la mezcla de un gas (butano, propano, etc.) o de los vapores que desprenden los líquidos inflamables (gasolina, aceites, grasas, solventes, etc.) con el aire y flama abierta.

1.1.1.4.3 Fuegos de clase C. Fuegos que se generan en sistemas y equipos eléctricos energizados.

1.1.1.4.4 Fuegos de clase D. Fuegos que se presentan en metales combustibles en polvo o a granel a base de magnesio, titanio, sodio, litio, potasio, zinc u otros elementos químicos.

Cabe mencionar, que la mayoría de los incendios no se dan en una sola clase, ya que por lo regular es una combinación de las tres primeras clasificaciones (A, B, C) debiendo tenerlas siempre en mente, para emplear el agente extinguidor adecuado, ya que en el mercado existen varios tipos de extintores, de contenidos y capacidades diferentes³⁹.

1.1.1.5 Extinción y agentes extinguidores del fuego

Para apagar un incendio es necesario disponer de medios de extinción suficientes, capaces de actuar eficazmente y en un intervalo de tiempo corto. Si el fuego no se controla, se puede expandir y generar grandes daños.

La extinción del incendio consta de de tres fases:

- Reconocimiento del incendio en función de la velocidad de propagación del fuego y de los medios físicos de detección,
- Transmisión de esta información al centro de auxilio,
- Extinción en función de la eficacia del servicio de protección.

La duración de cada una de estas fases debe ser lo más corta posible, dependiendo de cuanto más elevado sea el potencial calórico del combustible. El fuego es sus inicios es relativamente fácil de extinguir. Si la intervención es tardía y conociendo las condiciones de los edificios colindantes se determinará si es necesario protegerlas o no.

Pueden emplearse varios mecanismos para la extinción del fuego, ya sea de forma independiente o simultánea, quitando una o varias esquinas del tetraedro de fuego:

1.1.1.5.1 La eliminación o dilución del combustible: teóricamente, el método más directo para extinguir un incendio, consiste en eliminar el combustible que arde. Lo cierto es que una forma de reducir el riesgo de incendio, es no almacenar materiales combustibles cerca de lugares peligrosos o sitios en donde esté presente alguna fuente de ignición. Para diluirlo se puede alternar material combustible con material incombustible (H₂O, arena).

1.1.1.5.2 La eliminación o dilución del comburente: la sofocación, puede describirse como el proceso que impide a los vapores combustibles, ponerse en contacto con el comburente; es lo que hacemos cuando arrojamos arena sobre el fuego o lo cubrimos con una manta. La inertización se logra disminuyendo e incluso eliminando la cantidad o concentración de comburente⁴⁰.

1.1.1.5.3 La eliminación del calor/foco de ignición: para poder arder, los combustibles necesitan desprender vapores inflamables mediante el calor, debe alcanzar su temperatura de inflamación. Por lo tanto, si se consigue disminuir esta temperatura, el fuego desaparecerá. Esta disminución de temperatura es lo que se pretende al arrojar agua al fuego.

1.1.1.5.4 Inhibición y desactivación de la reacción en cadena: la reacción de combustión se desarrolla a nivel molecular a través de un mecanismo químico de radicales libres. El fuego se extingue por inhibición desactivando químicamente los radicales libres intermedios y por desactivación física interponiendo moléculas del agente extintor entre las especies reactivas, ambos efectos provocan la discontinuidad de la reacción en cadena.

1.1.1.5.5 Agentes extinguidores. Un agente extinguidor, se define como una sustancia o mezcla de ellas, que al contacto con un material en combustión en la cantidad adecuada, apaga el fuego⁴¹.

Los agentes extinguidores especiales son los productos que se utilizan para apagar fuegos clase D, para metales combustibles.

Cuando los agentes extinguidores se encuentran expuestos a la atmosfera se clasifican, según su estado físico, en tres grupos:

- Líquidos,
- Sólidos,
- Gases y vapores.

Un extintor es el equipo portátil o móvil sobre ruedas sin locomoción propia, que contiene un agente extinguidor el cual puede expelerse bajo presión con el fin de combatir o extinguir un fuego incipiente⁴².

TABLA 1.03. CLASIFICACIÓN DE LOS EXTINTORES		
Por su tipo	Portátiles	Extintor, manta, arena, batefuegos, palas hachas, explosivos, etc.
	Móviles	Bocas de fuego equipadas, extintor, mangueras contra incendio, etc.
Por el agente extintor	Fijos (manuales, semiautomáticos o automáticos)	Redes de hidrantes, Redes de rociadores y Redes de inundación.
	Agentes extintores hídricos	Agua, agua con aditivos y espuma
	Gases no reactivos	Dióxido de carbono y la combinación de este con gases (argón y nitrógeno)
	Agente químicos	Polvo químico seco, disoluciones acuosas de carbonatos y/o acetatos potásicos, agentes limpios (S-III, fm-200, fe-13, inergen, argonite,etc)
	Elementos de acción física	Mantas, batefuegos, palas, hachas, arena, explosivos, etc.

La selección de extintores portátiles y móviles se hará de acuerdo a las diferentes clases de fuego, y de conformidad con la siguiente Tabla:

TABLA 1.04. TIPO DE AGENTE EXTINGUIDOR APLICABLE SEGÚN LA CLASE DE FUEGO ⁴³				
AGENTE EXTINGUIDOR	FUEGO CLASE A	FUEGO CLASE B	FUEGO CLASE C	FUEGO CLASE D
Agua	SI	NO	NO	NO
Polvo químico seco, tipo ABC	SI	SI	SI	NO
Polvo químico Seco, tipo BC	NO	SI	SI	NO
Dióxido de carbono	NO	SI	SI	NO
Halón	SI	SI	SI	NO
Espuma	SI	SI	NO	NO
Agentes Especiales	NO	NO	NO	SI

1.1.2 *Legislación y Reglamentación*

A lo largo del tiempo, las autoridades han promulgado una reglamentación para disminuir los riesgos de incendio en las ciudades.

Actualmente hay disposiciones oficiales que pretenden cubrir todos los aspectos de la edificación. Estas reglamentaciones nacionales provienen de distintas dependencias gubernamentales.

- Secretaría del Trabajo y Previsión Social,
- Secretaría de Desarrollo Social,
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes,
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, actualmente Secretaría de Economía, Dirección General de Normas,
- Secretaría de Energía,
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales,
- Secretaria de Salud,
- Normas, Reglamentos y Leyes de aplicación local.

Para el Distrito Federal, algunos ejemplos son:

Ley de Desarrollo Urbano para el Distrito Federal, Reglamento de la Ley de Desarrollo Urbano para el Distrito Federal, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones par el Distrito Federal y la Ley de Protección Civil Para el Distrito Federal.

La responsabilidad de los participantes en la edificación está muy interrelacionada, y cada cual, sea cual sea su puesto en la jerarquía o en el proceso, debe verificar minuciosamente su función bajo el aspecto de seguridad.

Cada país tiene su propia normativa de reacción ante el fuego, centradas en las legislaciones nacionales. Se está organizando una unificación del tema.

Las normalizaciones privadas son publicadas por organizaciones, como son: la American Society for Testing and Materials (ASTM), las compañías de seguros, o bien por códigos de referencia internacional, como son la National Fire Proteccion Association (NFPA) o por la European Standards Organización (CEN) o la European Organización for Technical Approvals (EOTA), por mencionar algunas.

1.1.2.1 *Requerimientos esenciales en la edificación*

Los requerimientos que a continuación se mencionan son la base para toda edificación, sin importar el lugar en el que se desarrolle, siempre se deberán tomar en cuenta los conceptos siguientes:

1.1.2.1.1 Resistencia mecánica y estabilidad. Las obras deben ser proyectadas y construidas de forma que las cargas a las que puedan verse sometidas durante su construcción y utilización no produzcan ninguno de los siguientes resultados:

- Derrumbe de toda o parte de la obra,
- Deformaciones importantes en grado inadmisibles,
- Deterioro de elementos de la obra, accesorios o del equipo instalado, como consecuencia de una deformación importante de los elementos.

1.1.2.1.2 Seguridad en caso de incendio. En el caso de incendio en una construcción, las obras deberán proyectarse y construirse de forma que:

- La capacidad de sustentación de la construcción, se mantenga durante un periodo de tiempo determinado,
- La aparición, propagación del fuego y del humo dentro de la edificación estén limitados,
- La propagación del fuego a edificaciones vecinas esté limitada,
- Los ocupantes puedan abandonar el recinto o ser rescatados por otros medios,
- Se tenga en cuenta la seguridad de los equipos de rescate.

1.1.2.1.3 Higiene, salud y medio ambiente. Las obras deberán proyectarse y construirse de forma que no suponga riesgo para la higiene o para la salud de los ocupantes o vecinos, en particular como consecuencia de cualquiera de las siguientes circunstancias que deberán evitarse:

- Fugas de gas tóxico,
- Presencia de partículas o gases peligrosos en el aire,
- Emisión de radiaciones peligrosas,
- Contaminación o envenenamiento del agua o suelo,
- Defectos de evacuación de aguas residuales, humos y residuos sólidos o líquidos,
- Presencia de humedad en partes de la obra o en superficies interiores de la misma.

1.1.2.1.4 Seguridad de utilización. Las obras deben proyectarse y construirse de forma que su utilización o funcionamiento no suponga riesgos de accidentes tales como resbalones, caídas, colisiones, quemaduras, electrocución o heridas originadas por explosión.

1.1.2.1.5 Protección contra el ruido. Las obras se deben proyectar y construir de forma que el ruido percibido por los trabajadores, ocupantes y las personas que se encuentren en las proximidades se mantenga a un nivel que no ponga en peligro su salud y que les permita dormir, descansar y trabajar en condiciones satisfactorias.

1.1.2.1.6 Ahorro de energía y aislamiento térmico. Las obras y sus sistemas de calefacción, refrigeración, iluminación y ventilación deberán proyectarse y construirse de forma que la cantidad de energía necesaria para su utilización sea moderada, tomando en cuenta las condiciones climáticas del lugar y a sus ocupantes.

La espuma PUR es un material utilizado para cubrir varios de estos conceptos, como son la protección contra el ruido, higiene y medio ambiente.

Como se mencionó en párrafos anteriores el aislamiento térmico es uno de los seis requerimientos esenciales de la construcción, por lo que la utilización de materiales aislantes es un factor importante a la hora de desarrollar un proyecto de edificación. Un problema en la utilización de estos materiales es su resistencia al fuego, por lo que es necesario adicionar una cantidad representativa de agentes ignífugos que mejoren esta propiedad⁴⁴.

1.1.3 Seguridad en Caso de Incendio en las Edificaciones

En el tema de seguridad en caso de incendio hay tres términos muy importantes, que son: la prevención, la protección y la atención rápida en caso de incendio. En terminología de incendios la palabra prevención se utiliza genéricamente como el conjunto de medidas tendentes a evitar que suceda el accidente o a limitar sus consecuencias; las medidas tendentes a minimizar las consecuencias en caso de que el riesgo evolucione, son lo que se denomina protección contra incendios y la atención es disponer de la infraestructura en el lugar para sofocar el fuego.

1.1.3.1 Prevención de incendios

La primera oportunidad de conseguir la seguridad contra incendios en un edificio es a través de la prevención del fuego, que supone separar las posibles fuentes de calor/foco de ignición de los combustibles.

La mayoría de los incendios en los edificios empiezan en fuentes de calor y materiales combustibles que se introducen al edificio.

Todo incendio requiere del comburente, un foco de ignición, una fuente combustible y algo que los ponga en contacto; este algo casi siempre es un elemento humano, generalmente un acto u omisión inmediatos que acercan la fuente de calor al combustible o en ocasiones los efectos retardados de un error en el proyecto o instalación son causa de fuego (como soldar cerca de una lona, de cierto tipo de impermeabilizantes o recipientes con disolvente)⁴⁵.

El campo de la prevención de incendios es cada vez más completo, dado a la cantidad de recursos disponibles resultado del adelanto tecnológico y al mismo tiempo más complejo, ya que las edificaciones que se realizan en la actualidad también lo son.

Los conocimientos sobre el comportamiento del fuego han aumentado, con lo que se ha conseguido retener los incendios en el edificio afectado inicialmente, evitado así su propagación a edificios colindantes.

La experiencia ha demostrado que el conocimiento y la puesta en marcha de las medidas de prevención son particularmente útiles para disminuir el número de desastres. Por ejemplo: la realización de los proyectos de los edificios bajo la normativa y reglamentación aplicables, capacitación de personal y usuarios para actuar en caso de incendio, correctas instalaciones, uso de materiales inflamables, características constructivas, resistencia al fuego, estabilidad al fuego, elección de los sistemas de extinción correctos, protección de los sistemas eléctricos, vigilancia de la instalación, distribución correcta en planta, equipos apropiados, almacenaje y manipulación adecuada de materiales, mantenimiento adecuado, limpieza, orden, por mencionar algunas.

1.1.3.2 Protección en caso de incendio

Comúnmente el principio fundamental de la protección contra incendios, es que los ocupantes no sufran ningún daño, puedan evacuar por sus propios medios del edificio en riesgo y llegar hasta un lugar seguro. En segundo lugar viene la posibilidad de proteger al edificio y sus instalaciones.

Actualmente otro factor a considerar es la seguridad al medio ambiente, tratando de afectarlo lo menos posible.

Estos principios varían dependiendo de la reglamentación local, del tipo de edificación y sus ocupantes.

Los principios fundamentales implican el cumplimiento de las siguientes acciones, por citar algunas:

- Las salidas, puertas y escaleras deben distribuirse de tal forma que permitan una evacuación rápida de la totalidad de los ocupantes, quedando aislados del peligro,
- Una construcción que permita reducir los riesgos de extensión del fuego y de propagación a las edificaciones aledañas,
- Utilización de elementos estructurales que garanticen la estabilidad ante el fuego,
- Un acceso fácil para el cuerpo de bomberos y sus equipos,
- Tomas de agua distribuidas estratégicamente, con el suministro garantizado,
- Medios de primera intervención y de alarma,
- Iluminación y señalización suficiente que permita localizar las salidas.

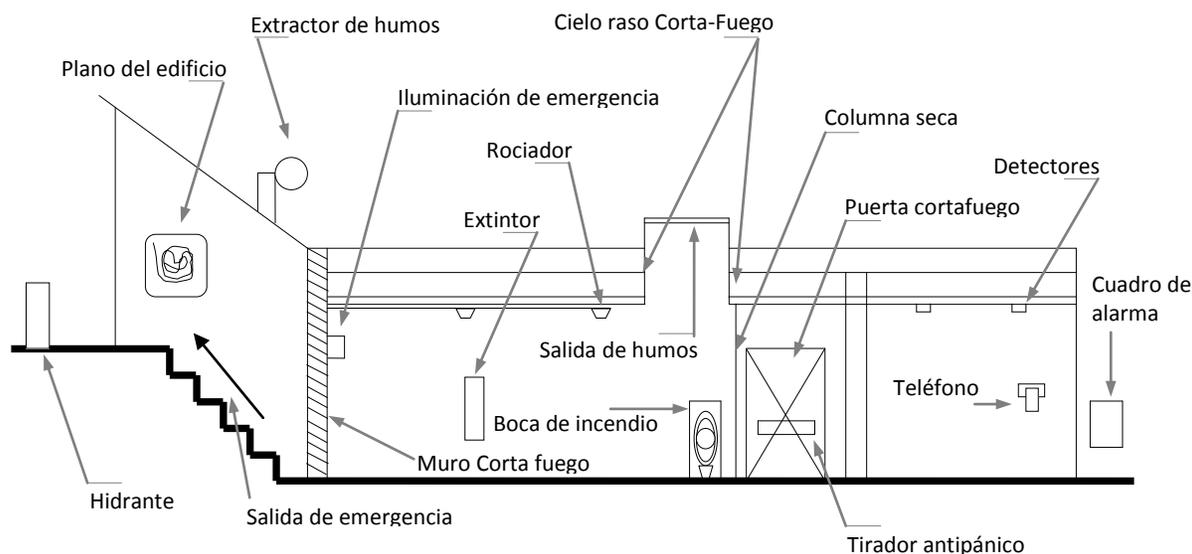


Figura 1.07. Protección contra incendio.

1.1.3.3 Principios de la seguridad en caso de incendio

1.1.3.3.1 *Seguridad de los ocupantes.* El principio más común es el de la preservación de la vida y consiste en garantizar un escape seguro del inmueble. Para ello es necesario alertar a los

ocupantes, tener vías de evacuación adecuados y asegurarse de que no se vean afectados por el fuego ni el humo mientras escapan del siniestro. En casos especiales, se deberá tomar distintas medidas de seguridad ya que habrá casos en los que los ocupantes no se podrán desplazar autónomamente, por ejemplo un hospital. Es importante también tomar en cuenta a los ocupantes de edificaciones aledañas, por lo que es indispensable tener bien definidas las rutas de emergencia hacia lugares seguros.

Medios de evacuación. En caso de incendio la mejor garantía para las personas es la evacuación rápida del edificio. Por ello es necesario que puedan salir rápidamente y lo más tranquilos posibles a través de espacios interiores bien señalizados, iluminados y con la mínima afección de humo. Se deben prever posibilidades de evacuación alternas en caso de que las salidas principales fallaran.

Se debe hacer un estudio por parte del proyectista de los puntos, que a continuación se mencionan:

De las salidas normales y de emergencia. La distancia a recorrer desde el punto más lejano del interior de una edificación, a un área de salida, no debe ser mayor de 40m, en caso de que sea mayor, el tiempo máximo en que debe evacuarse al personal a un lugar seguro, es de tres minutos. Lo cual se puede comprobar en los registros de los simulacros de evacuación.

Los elevadores no deben considerarse como parte de la ruta de evacuación.

Las puertas de las salidas normales de la ruta de evacuación y de las salidas de emergencia deben:

- Abrirse en el sentido de la salida, y contar con un mecanismo que las cierre y otro que permita abrirlas desde adentro mediante una operación simple de empuje;
- Estar libres de obstáculos, candados picaportes o de cerraduras con seguros puestos, durante las horas laborales,
- Comunicar a un descanso en caso de acceder a una escalera,
- Ser de materiales resistentes al fuego y capaces de impedir el paso del humo entre las distintas áreas,
- Estar identificadas conforme a los colores y señalización de seguridad e higiene.

Los pasillos, corredores, rampas y escaleras que sean parte del área de salida deben cumplir con lo siguiente:

- Ser de materiales ignífugos y si tienen acabados, estos deben ser de materiales resistentes al fuego,

- Estar libres de obstáculos,
- Identificarse con señales visibles en todo momento.

En caso de fallo de cualquiera de estos dispositivos será necesaria la utilización de medios alternos, como pueden ser:

- Toboganes,
- Escaleras provistas por los cuerpos de bomberos.

1.1.3.3.2 Protección de los bienes. Tiene como objetivo proteger la estructura del edificio y su contenido. Para poder entender la protección contra incendios de una edificación será necesario dividirlo en distintas categorías, como se muestra a continuación⁴⁶:

Protección pasiva. En esta clasificación se incluyen aquellas medidas que no actúan directamente sobre el fuego, pero que pueden dificultar o imposibilitar su iniciación y propagación, evitar el derrumbe del edificio o facilitar la evacuación, dando tiempo para la llegada y acción del cuerpo de bomberos. En realidad, su eficacia depende de sólo su presencia. Son por tanto:

- El diseño del inmueble,
- La selección de los materiales utilizados en los elementos constructivos.

Protección integrada. Consiste en la colocación de una serie de dispositivos para prevenir y combatir incendios. Estos evitan los posibles errores humanos; pero su acción debe ser complementada por el personal capacitado en la lucha contra el fuego. Se distinguen los siguientes:

- Detectores de las primeras manifestaciones del fuego (calor o humo),
- Rociadores,
- Extintores,
- Hidrantes,
- Elementos móviles que tienen por objeto detener temporalmente la propagación del fuego por las aberturas (puertas y cortinas corta fuego),
- Medios de primera intervención: boca de incendio, columna seca,
- Alarma,
- Señalización.

Protección activa. Es el conjunto de medios de lucha contra el fuego que se ponen en marcha una vez que se ha declarado el siniestro. Los manejan personal de seguridad especializado utilizando material móvil, generalmente de gran potencia. Los cuerpos de bomberos garantizan esta protección cuando los equipos de seguridad son insuficientes o inexistentes.

Protección financiera. Después de un siniestro es necesario indemnizar a las víctimas o a sus familiares, reconstruir su patrimonio y reemprender su actividad. Es aquí donde intervienen las compañías de seguros. Las primas constituyen un factor nada despreciable en los gastos de protección de un edificio y están en función, entre otras variables, de su grado de protección contra el fuego.

Protección industrial. En su caso, es la selección y aplicación de medios destinados a evitar que se declare un siniestro debido a un proceso de fabricación o de almacenamiento.

La protección activa y la protección financiera sólo intervienen cuando ya se han terminado los trabajos de construcción. No obstante, es interesante estudiar la protección financiera, ya que es un argumento importante a la hora de justificar el financiamiento de las instalaciones de prevención y extinción, mediante la reducción de las primas de seguro en función de los medios instalados.

La protección pasiva y la protección integrada forman un conjunto, en el cual el fallo de un solo elemento puede ser suficiente para volver inoperantes a los demás.

1.1.3.3.3 *Protección ambiental.* En muchos países, un objetivo adicional es el de limitar los daños al medio ambiente en caso de incendio en un edificio. Las principales preocupaciones son las emisiones de gases contaminantes y la contaminación de líquidos, utilizados en la lucha contra el incendio, ya que pueden tener importantes impactos ambientales.

En ambientes exteriores e interiores los vapores y contaminantes gaseosos aparecen en diferentes concentraciones. Los contaminantes gaseosos más comunes son el dióxido de carbono, el monóxido de carbono, los hidrocarburos, los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre y el ozono. Diferentes fuentes producen estos compuestos químicos pero la principal fuente artificial es la quema de combustible fósil. La mejor manera de evitar estas emisiones es la extinción de cualquier incendio, del tamaño que sea, lo más pronto posible⁴⁷.

1.1.3.4 Árbol de decisiones para la seguridad contra incendios

El Árbol de Decisiones para la Seguridad contra Incendios (ADSI) proporciona un procedimiento general mediante el cual se analiza el impacto potencial de las estrategias de seguridad contra incendios en una edificación, desarrollado por la NFPA. Este árbol puede servir como una guía para establecer jerarquías en cuanto a los componentes de una estrategia de seguridad contra incendios.

Las características de seguridad contra incendio, tales como el tipo de construcción, combustibilidad del material contenido, dispositivos de protección y características de los ocupantes, han sido tradicionalmente consideradas como independientes las unas de las otras. Esto puede llevar, cuando las características no están coordinadas, a una innecesaria duplicidad de la protección, o por otra parte, a la existencia de vacíos en protección o a la carencia de redundancias deseables, como lo mencionaba anteriormente es un trabajo de conjunto.

La ventaja específica del ADSI es su sistemática aproximación a la seguridad contra incendios. En lugar de considerar separadamente cada característica de seguridad contra incendios, el diagrama examina todas en conjunto, y demuestra como éstas influyen en la consecución de objetivos y metas de seguridad contra incendios.

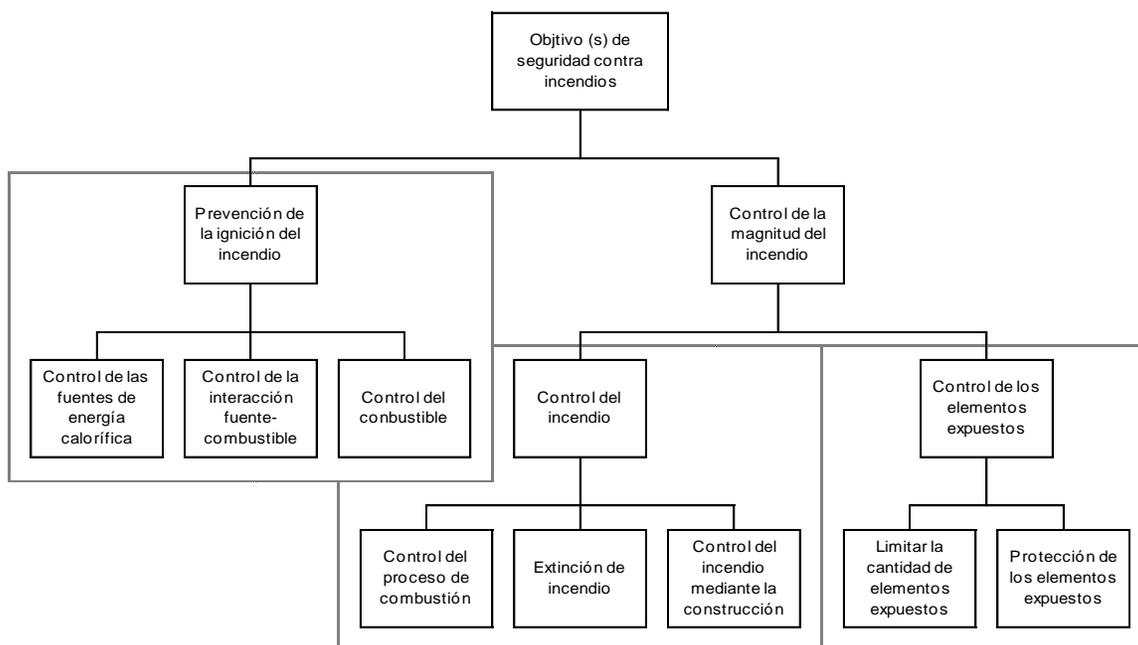


Figura 1.08. Árbol de decisiones para la seguridad contra incendios (NFPA).

La casilla inicial de ADSI esta etiquetada como objetivo (s) de la seguridad contra incendios. Las estrategias para la consecución de los objetivos están divididos en dos categorías: prevención de la ignición y control de la magnitud del incendio, la lógica del árbol es que los objetivos pueden alcanzarse mediante la prevención del inicio del incendio o mediante el control de la magnitud del incendio.

Prevención de la ignición del incendio. Es una rama del árbol que incluye las medidas más representativas de un código o manual de prevención de incendios. Las medidas deben ser revisadas continuamente para asegurar su eficacia, la responsabilidad, por lo tanto es más del propietario que del proyectista. Esta casilla se ramifica en control de las fuentes de energía calorífica, control de la interacción entre la fuente y el combustible, control del combustible, es importante destacar que cualquiera de las tres estrategias, si se llevan a cabo en su totalidad, es suficiente para prevenir la ignición pero el uso de más de una de ellas mejorara las posibilidades de prevención.

Control de la magnitud del incendio. Esta parte del árbol tiene dos ramas principales: control del incendio y control de los elementos expuestos. Esta es la aproximación básica al control de pérdidas.

Control del incendio. Los objetivos para esta estrategia, son reducir los riesgos asociados con el crecimiento y la propagación del incendio, de ese modo reducir la magnitud del incendio. Las propuestas para reducir el incendio son las siguientes:

- Control de la calidad de producción de humo y calor mediante la modificación del combustible o el entorno,
- Control del proceso de combustión mediante extinción manual o automática,
- Control de la propagación del incendio mediante disposiciones constructivas y elementos de edificación que puedan controlar el incendio o confinamiento, o ambos.

Control de elementos expuestos. Esto significa, coordinar las medidas que implican todos o cualquiera de los elementos especificados en los objetivos de seguridad contra incendio (personas, propiedades, actividades y otras consideraciones). Esta rama puede alcanzarse, por un lado, limitando el número de individuos y cantidad de propiedad que están expuestos, protegiendo a todas las personas y propiedades sujetas a exposición. En el caso de la propiedad o personas inmovilizadas, como en el caso de un hospital con pacientes no ambulatorios, la forma más habitual de proteger los elementos expuestos es protegiendo el espacio ocupado de la exposición al incendio⁴⁸.

1.1.3.5 Métodos de evaluación del riesgo de incendio en edificaciones

El interés que en un intento por reducir los siniestros, despierta la evaluación del riesgo de incendio, ha motivado a la creación de numerosas metodologías para tal fin. Por norma general, y aunque cada procedimiento se centra en uno de los múltiples factores implicados en la valoración, todas coinciden en evaluar exclusivamente la magnitud de las consecuencias derivadas del incendio, sin considerar la probabilidad de inicio del incendio.

Entre los métodos más empleados en la evaluación de riesgo de incendio y sus posibles aplicaciones destacan los siguientes:

MÉTODO	AUTOR	AÑO	PAÍS
Intrínseco	M.I.N.E.R	1981	España
Meseri	MAPFRE	1978	España
G. Purt	G. Purt	1971	Alemania
Gretener	M. Gretener	1965	Suiza
E.R.I.C	Sarrat y Cruzel	1977	Francia
F.R.A.M.E	E. de Smet	1988	Bélgica

1.1.3.6 Grado de riesgo en las edificaciones

Con base en el artículo 90 del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, las edificaciones se clasifican en función al grado de riesgo de incendio, de acuerdo a sus dimensiones, uso y ocupación conforme lo que establecen las siguientes Tablas:

CONCEPTO	GRADO DE RIESGO PARA EDIFICACIONES CON VIVIENDA		
	BAJO	MEDIO	ALTO
Edificaciones con uso exclusivo de vivienda	Hasta seis niveles	Más de seis y hasta diez niveles	Más de diez niveles
Usos mixtos	De acuerdo al riesgo del uso no habitacional		

TABLA 1.07. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE RIESGO PARA EDIFICACIONES NO HABITACIONALES⁴⁹			
CONCEPTO	GRADO DE RIESGO		
	BAJO	MEDIO	ALTO
Altura de la edificación, en metros	Hasta 25	No aplica	Mayor a 25
Número total de personas que ocupan el local, incluyendo trabajadores y visitantes	Menor de 15	Entre 15 y 250	Mayor de 250
Superficie construida, en metros cuadrados	Menor de 300	Entre 300 y 3000	Mayor de 3000
Inventario de gases inflamables, en litros (en fase líquida)	Menor de 500	Entre 500 y 3000	Mayor de 3000
Inventario de líquidos inflamables, en litros	Menor de 250	Entre 250 y 1000	Mayor de 1000
Inventario de líquidos combustibles, en litros	Menor de 500	Entre 500 y 2000	Mayor de 2000
Inventario de sólidos combustibles, en kilogramos	Menor de 1000	Entre 1000 y 5000	Mayor de 5000
Inventario de materiales pirofóricos y explosivos	No tiene	No aplica	Cualquier cantidad

1.1.3.6.1 *Determinación del grado de riesgo.* La clasificación para un inmueble se determinará por el grado de riesgo de incendio más alto que se tenga en cualquiera de los edificios, áreas o zonas que existan en un mismo predio. En caso de que un inmueble presente zonas con diversos grados de riesgo, los dispositivos o medidas de previsión y control deben aplicarse en cada zona de acuerdo a sus características constructivas y al elemento que genera el riesgo.

Las edificaciones que tengan una zona clasificada con grado de riesgo alto, ésta se debe aislar de las demás zonas con riesgo medio o bajo en el mismo inmueble y con la colindancia. De la misma manera se debe aislar las zonas o áreas de grado de riesgo medio de las demás áreas con riesgo bajo y las colindancias. En caso de no existir este aislamiento, los dispositivos y medidas de control se deben aplicar de acuerdo al grado de riesgo más alto que se presente en toda la zona. En cada inmueble se delimitará físicamente cada una de las áreas o zonas con características similares para los efectos de la propagación de fuego y calor, conforme a lo que se determina en las normas técnicas complementarias, de acuerdo a la separación entre edificios, las características de las losas entre los niveles de construcción o las áreas delimitadas por muros y puertas cortafuego.

Para el cálculo de metros cuadrados, alturas, número de ocupantes en inmuebles con varios cuerpos, estos parámetros se aplicarán por edificio. En cuanto al número de personas que ocupan el lugar, se debe tomar en cuenta a la máxima población fija probable más la flotante en cada área

o zona físicamente delimitada para la propagación de fuego. Los inventarios se considerarán asimismo por zona físicamente delimitada para la propagación de los efectos de explosión, fuego y calor.

La clasificación de riesgos, según el análisis para determinar los riesgos correspondientes y adecuados se agrupan de la siguiente manera:

- De riesgo menor
- De riesgo mayor

El criterio para determinar el grado de riesgo de incendio estará definido de acuerdo a lo siguiente:

Riesgo menor:	de 1111 a 2232
Riesgo mayor:	de 2233 a 6455

Los dígitos que forman las cifras arriba enlistadas obedecen a factores determinantes para la posibilidad de un incendio, y son:

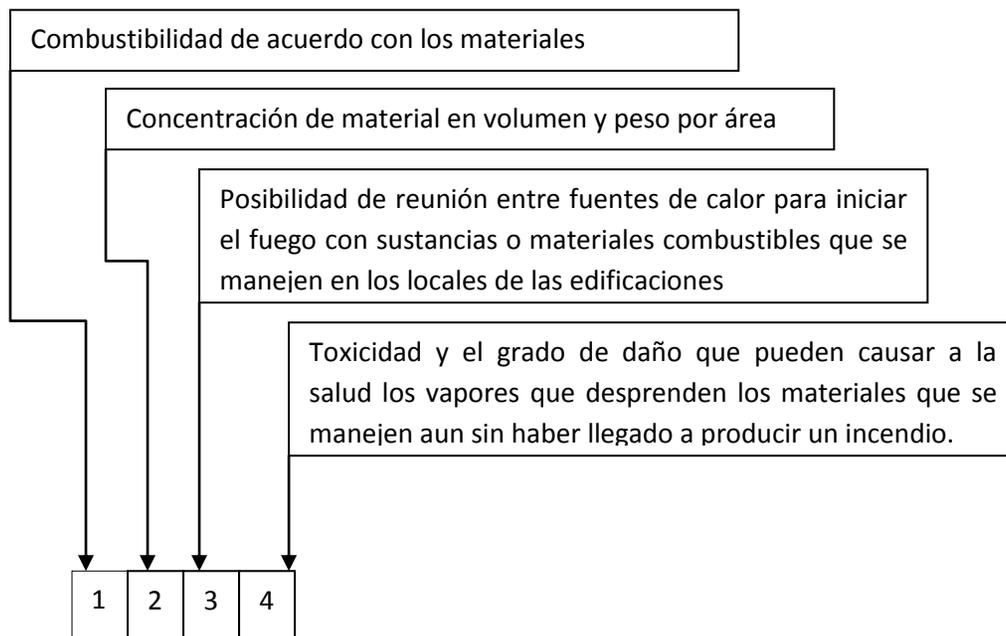


Figura 1.09. Factores para determinar el grado de riesgo de incendio (Reglamento de Construcción del DF, comentado).

1.1.3.7 Comportamiento al fuego de los materiales en la edificación

El comportamiento al fuego de los materiales se divide en dos grandes grupos:

- La resistencia al fuego, define el tiempo en que un producto o estructura fabricado en un material determinado, puede permanecer sometido al fuego mientras realiza su función⁵⁰.
- La reacción al fuego, define la capacidad del material a quemarse y alimentar el incendio⁵¹.

1.1.3.7.1 Resistencia al fuego. Dentro de la protección de un edificio el componente más importante de la protección pasiva es la resistencia al fuego, ya que se diseña para prevenir la extensión del fuego y para evitar la falla del edificio.

La resistencia al fuego se aplica a materiales que sometidos a la acción de una curva tiempo temperatura normalizada, mantienen sus características estructurales (puede decirse que no fallan). Estas características estructurales son: capacidad portante, aislamiento de la temperatura y no emisión de gases inflamables.

Los elementos constructivos, sus acabados y accesorios en las edificaciones, deben resistir al fuego directo sin llegar al colapso y sin producir flama o gases tóxicos o explosivos, a una temperatura mínima de 1200° K (927° C) durante el lapso mínimo que establece la Norma Oficial Mexicana NMX-C-307, Industria de la Construcción- edificaciones-componentes-resistencia al fuego-determinación.

Para efecto de prevención de incendios en la edificación la resistencia mínima al fuego de los elementos constructivos, acabados y accesorios debe estar de acuerdo con la siguiente Tabla 1.08.

1.1.3.7.2 Reacción al fuego. Los parámetros que se emplean para definir la reacción al fuego son: la facilidad de encendido, la velocidad de propagación superficial, la cantidad de calor desprendido, la emisión de gases y humos.

Empleando materiales poliméricos, la clasificación se obtiene en base al producto terminado.

Una de las preocupaciones principales de los arquitectos e Ingenieros que utilizan polímeros en la Industria de la Edificación es el problema asociado al fuego. Como los materiales poliméricos están compuestos de átomos de carbono, hidrógeno y nitrógeno, son inflamables en distinto grado. Es posible, sin embargo, incorporar aditivos en las formulaciones y alterar su estructura, modificando su comportamiento y creando un material compuesto con mejores propiedades ante el fuego.

El comportamiento inflamable de los materiales progresa pasando por cinco estados diferentes: ignición, desarrollo, extensión, quemado completo y decadencia; el primer estado es la reacción térmica al fuego y comprende la inflamación, extensión de la llama, liberación de calor y producción de humo y gases tóxicos.

TABLA 1.08. RESISTENCIA AL FUEGO DE LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS⁵²			
GRUPO DE ELEMENTOS	RESISTENCIA MINIMA AL FUEGO (EN MINUTOS)		
	EDIFICACIONES DE RIESGO BAJO	EDIFICACIONES DE RIESGO MEDIO	EDIFICACIONES DE RIESGO ALTO
Elementos estructurales (Muros de carga, exteriores o de fachadas; columnas, vigas, travesaños, arcos, entrepisos, cubiertas)	60	120	180
Escaleras y rampas	60	120	180
Puertas cortafuegos de comunicación a escaleras, rampas y elevadores	60	120	180
Puertas de intercomunicación, muros divisorios y cancelas de piso a techo o plafond fijados a la estructura	60	60	120
Plafones y sus sustentación	-	30	30
Recubrimientos a lo largo de rutas de evacuación o en locales donde se concentren más de 50 personas.	60	120	120
Elementos decorativos	-	30	30
Acabados ornamentales, tapicería, cortinajes y elementos textiles incorporados a la edificación	-	30	30
Campanas y hogares de fogones y chimeneas	180	180	180
Ductos de instalaciones de aire acondicionado y los elementos que los sustentan	120	120	120
Divisiones interiores y cancelas que no lleguen al techo	30	30	30
Pisos Falsos para alojar ductos y cableados	60	60	60

1.1.3.7.3 Clasificación de los materiales frente al fuego. Los materiales de construcción se clasifican en incombustibles o combustibles. Estos últimos, a su vez, se subclasifican según su grado de inflamabilidad o de la propagación superficial de llama, según la norma empleada.

Propiedades de los materiales combustibles. Los materiales combustibles presentan algunas características importantes como pueden ser:

Temperatura de inflamación (flash point). Es la temperatura mínima que necesita un combustible para emitir gases inflamables suficientes para alcanzar en su atmosfera el límite inferior de inflamabilidad, a partir del cual, con una fuente de ignición puede producirse una combustión no autosostenida.

Para que se presente esta temperatura es necesario alcanzar primero la temperatura de vaporización. Esta temperatura de ignición puede ser incluso bajo cero para ciertos líquidos (gasolina), con lo que a temperatura ambiente ya desprenden vapores combustibles. Esta presencia de vapores no significa que exista un incendio.

Temperatura de incendio. Es la temperatura a la cual un material que ya está desprendiendo vapores combustibles y en presencia de una llama exterior, se incendia, desprendiendo en dicha reacción un calor tal que sigue emitiendo vapores combustibles que realimentan el propio incendio, es una combustión autosostenida.

Temperatura de autoignición. Es la temperatura mínima a la que una sustancia combustible es capaz de inflamarse y mantener la combustión en ausencia de una fuente de ignición. Llegar a esta temperatura es altamente peligroso ya que sin previo aviso se puede tener una zona en llamas, con el riesgo que ello representa. Tenemos dos variantes en este tipo de fenómeno que son el flashover (deflagración) y el backdraft.

Flashover. Dentro de un espacio, el fuego puede llegar a un estado en el que la radiación térmica total desprendida por el fuego, los gases calientes y las superficies calientes (paredes y techo), causen la combustión de todas las superficies combustibles expuestas dentro del mismo. Esta repentina y mantenida transición de un fuego en crecimiento a un fuego totalmente desarrollado es un Flashover.

La definición de un Flashover sería: cambio súbito a un estado de combustión generalizada en la superficie de los materiales combustibles en un recinto.

Backdraft: La ventilación limitada puede llevar al fuego en un recinto, a producir gases de fuego que contienen significativas porciones de productos de combustión parcial y productos no quemados de pirólisis; si estos se acumulan, cuando se da acceso al aire al compartimento, puede llevar a una repentina deflagración. Esta deflagración producida en el recinto se puede trasladar al

exterior también. La definición de un Backdraft sería: La rápida o explosiva combustión de gases calentados que ocurre cuando el oxígeno es introducido en un edificio que no ha sido adecuadamente ventilado y en el que se ha reducido el suministro de oxígeno debido al fuego.

Límites de inflamabilidad. Para que se produzca un incendio se deben mezclar el comburente y la fase gaseosa del combustible, dicha mezcla presentara distintas concentraciones que determinarán el límite inferior de inflamabilidad y límite superior de inflamabilidad. Entre ambas concentraciones es posible la inflamación de la mezcla.

Límite inferior de inflamabilidad (LII). Concentración de gas o vapor combustible en el aire por debajo de la cual no se produce la combustión.

Límite superior de inflamabilidad (LSI). Concentración de gas o vapor combustible en el aire por encima de la cual no se produce la combustión.

Los límites de inflamabilidad varían en función de la temperatura. A mayor temperatura, el límite inferior de inflamabilidad desciende y el límite superior de inflamabilidad aumenta.

Catalizadores e inhibidores

-Catalizador. Es una sustancia cuya presencia, aún en pequeña cantidad, incrementa fuertemente la velocidad de una reacción.

-Inhibidor o estabilizador. Es un producto químico que puede agregarse en pequeña cantidad a una materia inestable para impedir una reacción vigorosa.

Potencial calorífico. La duración y las características de los incendios dependen de muchos factores, entre los más importantes se encuentran en el potencial calorífico de los materiales en el inmueble, y se puede definir como la cantidad de calor que puede emitir un combustible por unidad de masa, al sufrir un proceso de combustión completo.

Reactividad o inestabilidad. Es la posibilidad que tiene una sustancia para liberar energía.

Calor específico. Indica la cantidad de calor que absorbe al aumentar su temperatura. Es la cantidad de energía térmica necesaria para aumentar un grado de temperatura la unidad de masa de una sustancia.

Las cifras de calor específico tienen importancia para la protección contra incendios, pues indican la cantidad relativa de calor necesaria para elevar las temperaturas de ciertos materiales a

un punto peligroso, o la cantidad de calor que debe suprimirse para enfriar una sustancia caliente y ponerla a una temperatura de seguridad.

El calor específico del agua es más alto que el de otras sustancias, ese es el motivo de la eficacia del agua como agente extintor.

Calor latente. Cantidad de calor absorbido por una sustancia al pasar entre las fases líquida y gaseosa (calor latente de vaporización) o entre las fases sólida y líquida (calor latente de fusión). El calor latente de las sustancias comunes es muy inferior a la del agua es otro de los motivos de su eficacia como agente extintor.

Nuestro país no cuenta con un documento en el que se clasifique a los productos de la construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego, sin embargo, otros países ya se cuenta con esta clasificación. Por ejemplo en la unión europea con el objetivo básico de unificar criterios y facilitar el libre mercado entre los estados miembros de la Unión, se crearon las Euroclases, que se concreta en las siguientes normas armonizadas europeas:

UNE-EN 13501-1:2002. Clasificación de la reacción al fuego de los materiales de construcción para los materiales.

UNE-EN 13501-2:2002. Clasificación de resistencia al fuego de elementos de construcción, excepto cubiertas y sistemas y servicios de ventilación para los elementos y productos de la construcción.

Clasificación europea de reacción al fuego de los materiales según la norma UNE-EN 13501-1:2002. Euroclases. Las nuevas son A1, A2, B, C, D, E, F que se corresponden conceptualmente con las siguientes definiciones:

A1: No Combustible. Sin contribución en grado máximo al fuego

A2: No Combustible. Sin contribución en grado menor al fuego

B: Combustible. Contribución muy limitada al fuego

C: Combustible. Contribución limitada al fuego

D: Combustible. Contribución media al fuego

E: Combustible. Contribución alta al fuego

F: Sin clasificar

Asimismo, en los ensayos también cabe considerar las clasificaciones adicionales siguientes, que son de carácter obligatorio en la mayoría de clases a pesar de que alguna de ellas pueda quedar exenta de clasificación adicional (Tabla 1.09). Los conceptos a considerar son:

- Opacidad de los humos, s (smoke) con denominación s1, s2, s3, para baja, media o alta opacidad de humos (incorpora los conceptos de velocidad de propagación y producción total de humos).
- Caída de gotas o partículas inflamadas, d (drop) con denominación d0, d1, d2, para nula, media o alta caída de gotas o partículas inflamadas.
- Por último, la clasificación no sólo depende del comportamiento ante el fuego de los materiales, sino también de la forma en que éstos se colocan sobre los soportes ya que los ensayos de un mismo material sobre diferentes aplicaciones finales puede dar distintas clasificaciones.

Consecuentemente, los materiales deben clasificarse según su aplicación final. La clasificación de los materiales para paredes y techos irán sin subíndice, para los suelos llevarán el subíndice FL (floor) y la de los productos lineales para aislamientos de tuberías llevarán el subíndice L (line).

Tabla 1.09. Las Euroclases: UNE EN 13501-1:2002

COMBUSTIBILIDAD	Aplicación final			COMBUSTIBLE	CONTRIBUCIÓN AL FUEGO	
	Paredes techos	Suelos	Productos lineales para aislamiento térmico de tuberías			
Clasificación según: (clasificación principal)	A1	A1FL	A1L	NO	NO	Grado máximo
	A2	A2FL	A2L	NO	NO	Grado menor (duración de la llama ≤20s)
	B	BFL	B L	SI	SI	Muy limitada
	C	CFL	C L	SI	SI	Limitada
	D	DFL	D L	SI	SI	Media
	E	EFL	E L	SI	SI	Alta
	F	FFL	FL	Sin clasificar, sin comportamiento determinado		
Clasificaciones adicionales según:	OPACIDAD DE HUMOS	DE	Cantidad y velocidad de emisión	Baja	s1	Observaciones: Las clases A1, A1FL, y A1L; E, EFL y EL; y F, FFL y FL no se clasifican bajo este concepto.
				Media	s2	
				Alta	s3	
	CAÍDA DE GOTAS O DE PARTÍCULAS INFLAMADAS		Sin caída (UNE-EN 13823:2002) en 600s	d0	Observaciones: Las clases A1, A1FL y A1L, y F, FFL y FL no se clasifican bajo este concepto.	
Sin caída (UNE-EN 13823:2002) durante más 10s			d1			
Ni d0, ni d1 d2			d2			

1.1.3.8 Seguridad contra incendio en la construcción

1.1.3.8.1 Funciones de los participantes en la construcción. La seguridad contra incendio atañe a todos los que intervienen en una obra constructiva, ya sea en la fase de planeación del proyecto o durante la ejecución de las obras.

Algunas de sus funciones podrían ser las siguientes: en la planeación se debe desarrollar un estudio financiero, en particular, establecer un balance entre los gastos en medios de seguridad y el valor del riesgo. En el estudio se debe poner atención de que se evalúe y pondere el riesgo, con objeto de alcanzar la protección a costos óptimos. Por otro lado el proyectista debe pensar en la prevención de incendios teniendo en cuenta los siguientes factores:

- La reglamentación vigente,
- Las posibilidades económicas de su cliente,
- Las consecuencias en caso de siniestro para el propietario como para los vecinos posibles afectados,
- El criterio de las compañías de seguros al fijar las primas,
- El contratista debe ejecutar los trabajos de acuerdo con las normas de construcción y las que se definen en los pliegos de condiciones vigentes. Asimismo, durante las obras debe realizar los ensayos que le permitan comprobar el buen funcionamiento de las instalaciones,
- Las dependencias facultadas para expedir licencias y permisos de obra, deben inspeccionar con atención si se han complementado todos los requisitos reglamentarios,
- Otro colaborador es la ingeniería de estudios de seguridad. Que tiene como especialidad las técnicas de prevención que permite evitar posibles errores y una mejor coordinación de los trabajos.

1.2 POLÍMEROS EN LA EDIFICACIÓN

El tipo de vida actual no sería posible sin los plásticos. Los plásticos satisfacen las demandas de la sociedad, facilitando la producción de muchos artículos de forma accesible y versátil. Este tipo de material se utiliza en casi todo lo que usamos: envases, componentes ligeros para automóviles y aviones, en mobiliario resistente, en teléfonos móviles, en materiales de construcción, juguetes, artículos de uso médico e incluso para las tuberías que llevan el agua potable.

Estos son de los materiales más eficientes en cuanto al ahorro de recursos, ahorran energía: ya sea por su ligereza (transporte), por sus propiedades de protección al evitar las pérdidas debidas al deterioro de otros artículos (envases) o por sus propiedades aislantes que ahorran energía que se necesitaría para la calefacción o para el aire acondicionado de las edificaciones. Los plásticos también juegan un papel importante en el desarrollo de fuentes de energía renovables.

Es probable que no haya ningún otro grupo de compuestos sintéticos más importantes en la vida moderna que los polímeros sintéticos. El consumo de materiales poliméricos en la historia ha ido en aumento de alrededor de 1.5 millones de toneladas, en 1950 a un total de producción de plástico de 260 millones de toneladas en el 2007, un aumento cercano al 9 por ciento anual desde 1950⁵³.

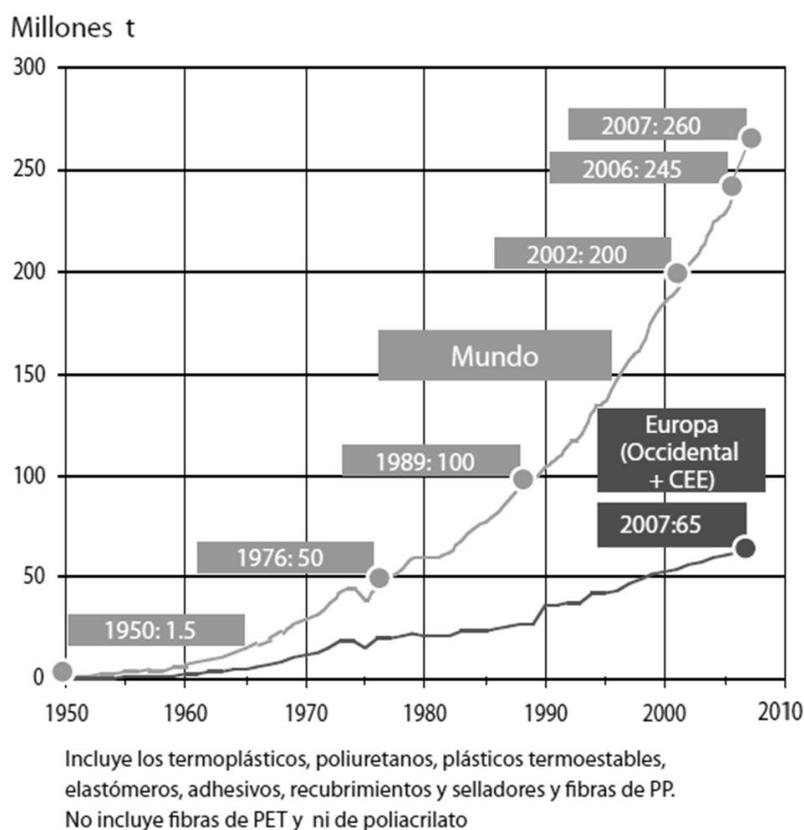


Figura 1.10. Producción mundial de de plásticos 1950-2007 (Plastics Europe).

Europa representa el 25 por ciento de la producción global de plástico, con cerca de 65 millones de toneladas al año, por encima de NAFTA con una producción de 23 por ciento.

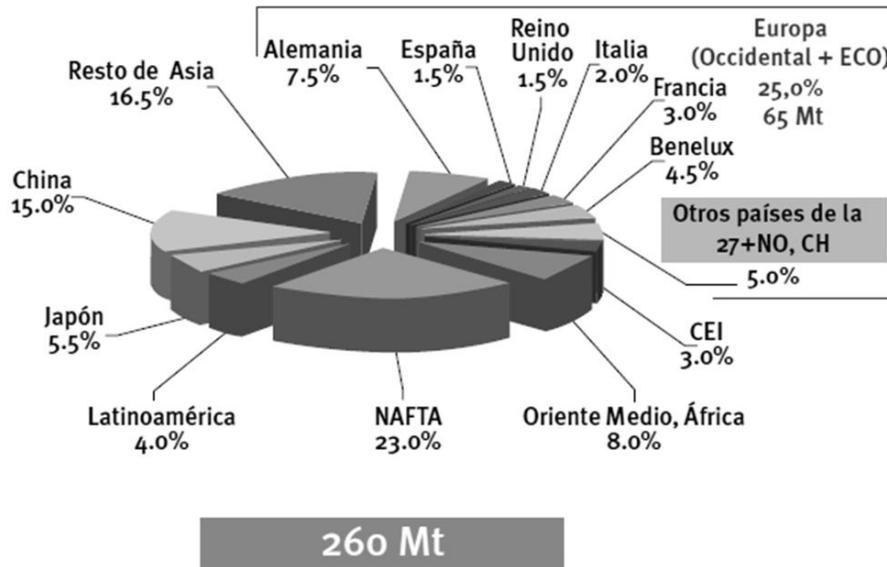


Figura 1.11. Producción de plástico en el mundo 2007, (Plastics Europe)

Existen unos veinte grupos distintos de plásticos, cada uno de ellos disponible en muchos grados, para así ofrecer la selección más adecuada para cada aplicación específica. Existen cinco familias de plásticos de alto volumen. Se trata del polietileno, incluido el de baja densidad (PEBD), el lineal de baja densidad (PELBD), y el de alta densidad (PEAD), el polipropileno (PP), el policloruro de vinilo (PVC), el poliestireno (PS y PSE expandido) y el polietileno tereftalato (PET). Juntas, estas cinco grandes familias suponen aproximadamente el 75% de la demanda total de plásticos de Europa. En 2007, todas ellas experimentaron un aumento en la demanda de entre un 0,5 y 7,5% - con un promedio del 3%.

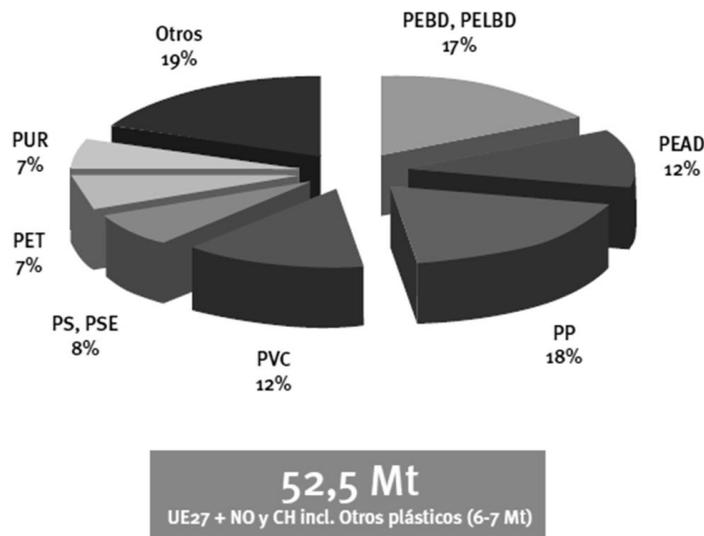


Figura 1.12. Demanda por polímero, (Plastics Europe).

Tan solo en Europa un 21 por ciento del total de la producción de polímeros es destinado a la Industria de la Construcción, siendo la industria del empaquetamiento el mayor consumidor de este producto como se muestra en la siguiente Figura:

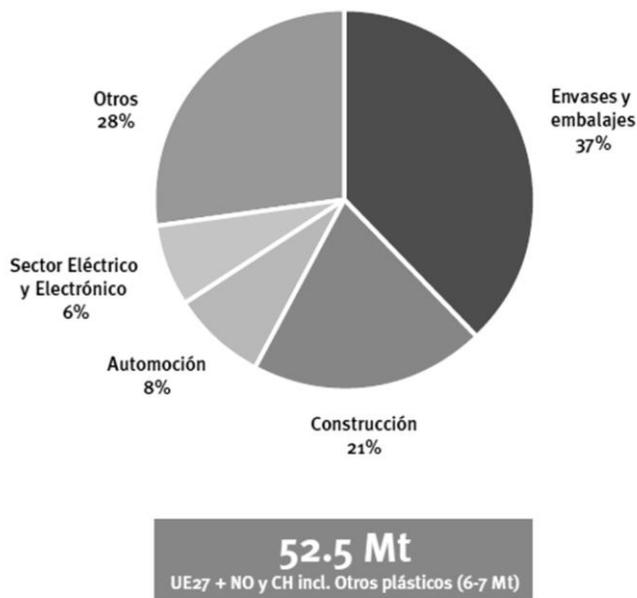


Figura 1.13. Demanda por aplicación (Plastics Europe).

1.2.1 Química de los Polímeros

Los polímeros, abarcan materiales tan diversos como los plásticos, hule o el caucho y los adhesivos. Los polímeros comerciales o estándar son materiales ligeros, resistentes a la corrosión, de baja resistencia y rigidez, no son adecuados para uso a temperaturas altas. Sin embargo son relativamente económicos y fácilmente conformables en una diversa cantidad de formas. Los polímeros ingenieriles están diseñados para dar una mejor resistencia a cierta especificación o mejor rendimiento a temperaturas elevadas, estos últimos se producen en cantidades relativamente pequeñas y son costosos.

1.2.1.1 Definición y clasificación

Un polímero es una molécula grande la cual se forma uniendo elementos repetitivos entre sí, pequeñas moléculas llamadas monómeros. Al proceso de unirlos se le llama polimerización. A diferencia de las moléculas orgánicas pequeñas, las cuales son interesantes por sus propiedades

químicas, estas moléculas gigantes, cuyas masa moleculares van de miles a millones, son interesantes por sus propiedades físicas, que las hacen útiles en la vida cotidiana⁵⁴.

Se llama grado de polimerización al número de veces que se repite el monómero para formar la macromolécula, en valor promedio. Para grados de polimerización muy bajos, se obtienen líquidos a temperatura ambiente, al aumentar el GP el producto será normalmente sólido a temperatura ambiente, aumentando progresivamente su temperatura de fusión, hasta llegar a tamaños donde se estabiliza este valor, característico para cada polímero.

Existen diversas formas de clasificar a los polímeros por el tipo de monómero, por las técnicas de preparación y proceso, por su estructura, por sus propiedades físicas, por el uso que se les da. La clasificación de los polímeros debido a su comportamiento térmico es una de las más utilizadas, en ella se clasifican tres tipos: los termoplásticos, elastómeros y termoestables.

Termoplásticos. Se caracterizan por tener una estructura de largas moléculas lineales o ramificadas, unidas entre sí sólo por enlaces secundarios, este tipo de enlaces justifican la mayor parte de las propiedades de esta clase de polímeros, al calentar el material estos enlaces se debilitan, permitiendo a las macromoléculas deslizarse unas sobre otras, dando lugar a fenómenos de fluencia y de flujo en fundido. Cuando el material se enfría conserva su nueva forma.



Figura 1.14. Estructura polímeros termoplásticos.

Elastómeros. Con base en el concepto anterior, si se requiriese bloquear el deslizamiento de una macromolécula sobre otras, es necesario limitar la fluencia, una forma de poderlo lograr es a partir de anclajes químicos mediante enlaces primarios puntuales entre moléculas, partiendo de que el material inicial debe tener puntos reactivos en donde se puedan realizar los anclajes. Si los anclajes no son muchos la molécula puede aún cambiar apreciablemente su geometría al someterla a deformación mecánica, recuperando su geometría original al eliminar el esfuerzo.

Termoestables. Son materiales amorfos, que tienen una estructura de malla tridimensional, existiendo numerosos enlaces secundarios de unos segmentos de cadena a otros. Haciendo a estos materiales mantener su geometría a pesar del aumento de temperatura, siempre mantiene su forma. No se ablandan una vez que han sido moldeados.



Figura 1.15. Estructura polímeros termoestables.

1.2.1.2 Síntesis de polímeros

Los polímeros sintéticos provienen mayoritariamente del petróleo. Aproximadamente un cuatro por ciento de la producción mundial de petróleo se convierte en plástico⁵⁵. Después de un proceso de cracking y reforming, se tienen moléculas simples, como etileno, benceno, entre otras, a partir de las que comenzará la síntesis del polímero.

La síntesis de cualquier polímero, con una cantidad controlada, es un proceso muy complejo y es a la petroquímica a la que se le asocia la producción de los diversos materiales plásticos. Esta industria suministrará material acabado susceptible al posterior moldeo por fusión-enfriamiento, en el caso de termoplásticos o líquidos y polvos reactivos, en el caso de termoestables, a falta de la reacción final de entrecruzamiento.

Los polímeros sintéticos pueden dividirse en dos clases principales, dependiendo de su método de preparación⁵⁶:

- *Los polímeros de crecimiento en cadena, llamados también polímeros de adición* se fabrican con reacciones en cadena, la adición de monómeros al extremo de una cadena en crecimiento, el extremo de la cadena es reactivo ya que es un radical, un catión o un anión, formando cadenas que pueden tener miles de elementos moleculares en su longitud.
- *Los polímeros de crecimiento en etapas o de condensación* son producidos cuando se unen dos o más tipos de moléculas mediante una reacción química que en la mayoría de los casos, se elimina una pequeña molécula, que suele ser agua o un alcohol. A diferencia de la polimerización por adición, que se necesita que las moléculas individuales se adicionen al extremo de una cadena en crecimiento, la polimerización de condensación permite combinar dos moléculas reactivas distintas.

1.2.1.3 Comportamiento térmico

Existen características térmicas de los materiales como lo son a expansión térmica, la conductividad térmica y el ablandamiento por efecto del calor.

En general los plásticos tienen un elevado coeficiente de expansión térmica lineal, que es del orden de $50 \times 10^{-6}/\text{plg}/\text{plg}/^{\circ}\text{F}$ ($90 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) en contraste con los metales 5 a $40 \times 10^{-6}/\text{plg}/\text{plg}/^{\circ}\text{F}$ (10 - $70 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) y los cerámicos menores a $5 \times 10^{-6}/\text{plg}/\text{plg}/^{\circ}\text{F}$ ($<9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$). Estas diferencias se presentan debido a que los materiales con fuertes enlaces requieren un gran suministro de energía térmica para expandir su estructura, al contrario de lo que ocurre en los materiales con enlaces débiles.

La conductividad térmica en los plásticos es comúnmente baja debido a la ausencia de electrones libres para transportar energía a través del gradiente de temperatura. La mayoría de los polímeros son amorfos, con estructuras internas irregulares, y por lo que el mecanismo atómico de transferencia de energía por coordinación de vibraciones atómicas es ineficaz, las vibraciones se transmiten mejor a través de una estructura bien ordenada.

Como se mencionó en párrafos anteriores muchos de los plásticos son termoplásticos, conscientes de que estos plásticos se ablandan a altas temperaturas se toma como una ventaja en los procesos de extrusión, moldeo por inyección, etc. Sin embargo esto afecta su comportamiento de servicio debido a que establece un límite superior a las temperaturas tolerables de uso.

Todos los polímeros termoplásticos y termoestables, experimentan a una cierta temperatura de transición vítrea T_g , una notable disminución de su módulo elástico. Este cambio va asociado a una transformación interna en estado sólido, que se manifiesta en un cambio en su capacidad calorífica, igualmente esta temperatura marca un cambio en el coeficiente de expansión térmico. Este fenómeno está asociado a movimientos colectivos de las zonas amorfas del polímero. Si se visualiza a la macromolécula del polímero como un conjunto de barras articuladas, que pueden tomar distintas geometrías, siempre manteniendo la distancia entre los extremos. A bajas temperaturas, la inercia cinética de los átomos es insuficiente para provocar los movimientos colectivos, y el polímero se comporta de forma rígida, inmovilizado. Al alcanzarse la T_g , el polímero puede moverse entre varias geometrías posibles, lo que le hace más elástico, y a ocupar un mayor volumen. Estos cambios conformacionales sólo pueden producirse en la zona amorfa del polímero, ya que en la zona cristalina, si la hubiera, los segmentos de cadena adoptarían una posición precisa unos respecto de otros, impidiendo cualquier cambio conformacional. La disgregación de estas zonas cristalinas, cuando existen, se produce a la temperatura de fusión T_f cuando la energía de

agitación térmica sobrepasa a la energía de los enlaces secundarios entre cadenas, colocados a una distancia definida por los parámetros del cristal.

La T_f siempre es superior a la T_g , ya que la energía requerida para la disgregación total del cristal es mayor que la que se precisa para provocar un cambio conformacional de un segmento de cadena de la zona amorfa, mucho menos restringido en sus movimientos por las moléculas vecinas que los segmentos en la zona cristalina.

Si continua aumentando la temperatura, se llega a la temperatura de descomposición T_d , cuando la agitación térmica rompe los enlaces primarios, degradando el polímero de una manera irreversible; a diferencia de las fuerzas intermoleculares los enlaces primarios no son regenerables.

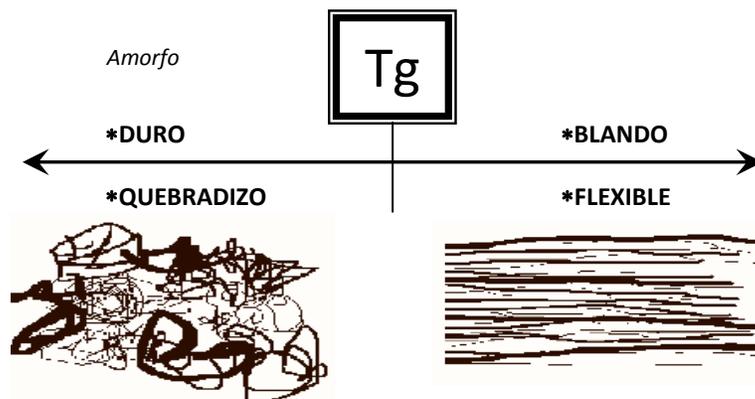


Figura 1.16. Comportamiento de un polímero debajo y sobre la T_g .

Los aspectos estructurales que aumentan las temperaturas de transición térmica son los siguientes:

- Sustituyentes laterales voluminosos, que por dificultar los movimientos conformacionales aumentan mucho la T_g .
- Atracciones intermoleculares fuertes.
- Esqueleto estructural rígido. Los anillos bencénicos en la cadena principal tienen un gran efecto para aumentar la T_g y la temperatura de descomposición.
- En el caso de los polímeros termoestables, al disminuir la longitud entre puntos de reticulación, aumenta la T_g . si el polímero no estuviera totalmente reticulado, su T_g será inferior a la máxima que puede alcanzar, de acuerdo con su estructura química.

- Tanto en los polímeros termoplásticos como en los termoestables, la humedad absorbida por el polímero disminuye considerablemente su T_g . Los polímeros con abundancia de grupo $-OH$ en su estructura, como las poliamidas o las resinas epoxídicas, presentan una mayor absorción de agua, rebajando su T_g aproximadamente unos $100^\circ C$ en condiciones de saturación de humedad

La gran mayoría de los polímeros se descomponen entre los 300 y $400^\circ C$, liberando fragmentos de molécula hidrocarbonados; los polímeros son materiales combustibles⁵⁷.

1.2.1.4 Comportamiento mecánico

El comportamiento mecánico de los polímeros es complicado y sus características mecánicas son inferiores a la de los metales.

Como para el resto de los materiales, el ensayo de compresión proporciona una gráfica tensión-deformación. Pero su comportamiento cambia significativamente con la temperatura de ensayo, desde un comportamiento frágil y puramente elástico, con alargamientos a rotura, a un comportamiento dúctil, con mucha deformación irreversible (plasticidad) y alargamientos del 100 por ciento o más. La T_g de cada polímero marca la frontera entre uno y otro comportamiento. La T_g va acompañada de una notable disminución del módulo elástico.

Si una fuerza se aplica de manera constante durante un periodo de tiempo largo, se observará una deformación en aumento, de manera irreversible. Este fenómeno de fluencia tiene lugar en todos los materiales, pero en los plásticos es apreciable incluso a temperatura ambiente, lo que exige tenerlo siempre a consideración.

En los termoplásticos amorfos, la fluencia a temperaturas superiores a su transición vítrea es tan exagerada que imposibilita su uso en esas condiciones. En los termoplásticos, los segmentos de macromolécula que están dentro de la zona cristalina tienen más impedido su movimiento, lo que restringe la fluencia. Esto permite utilizarlos indistintamente por encima o por debajo de su T_g , aunque serán más flexibles por encima de su temperatura vítrea.

Los plásticos termoestables tienen su fluencia restringida por los enlaces primarios de reticulación. La alta densidad de reticulación les confiere un carácter frágil, con alargamientos a la ruptura inferiores al 10 por ciento. Suelen utilizarse por debajo de su T_g .

Los elastómeros se caracterizan por su capacidad de deformación elástica. Este alargamiento elástico, único entre los materiales, se basa en la posibilidad de múltiples cambios

conformacionales en la macromolécula, que cambia de un ovillo desordenado, cuando está sin sollicitación externa, a una línea estirada bajo carga, pero que recuerda su forma primitiva, por ser la de mínima ordenación.

Así pues, la mayoría de las propiedades mecánicas de los polímeros son sensibles a la rapidez de deformación, la temperatura, la naturaleza química del ambiente que los rodea (presencia de agua, oxígeno, solventes, etc.).

Existen tres tipos de tendencias típicas de curvas esfuerzo deformación unitaria en los materiales poliméricos:

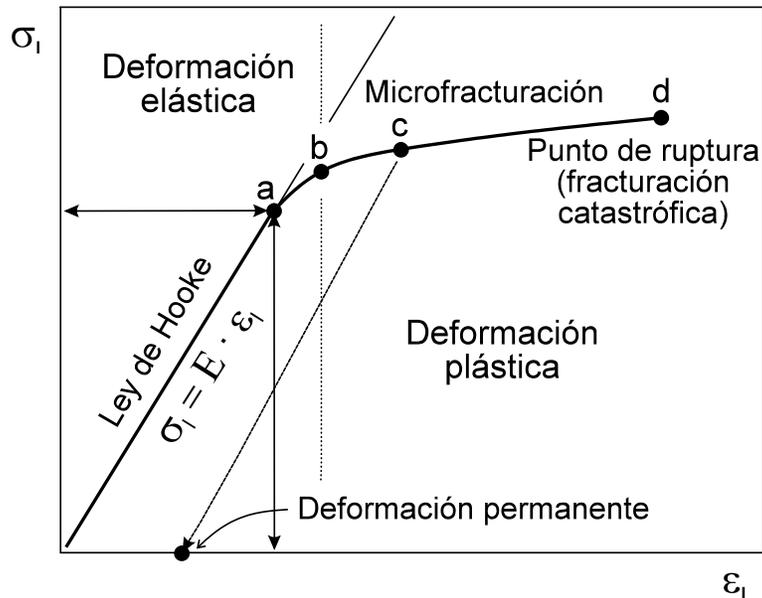
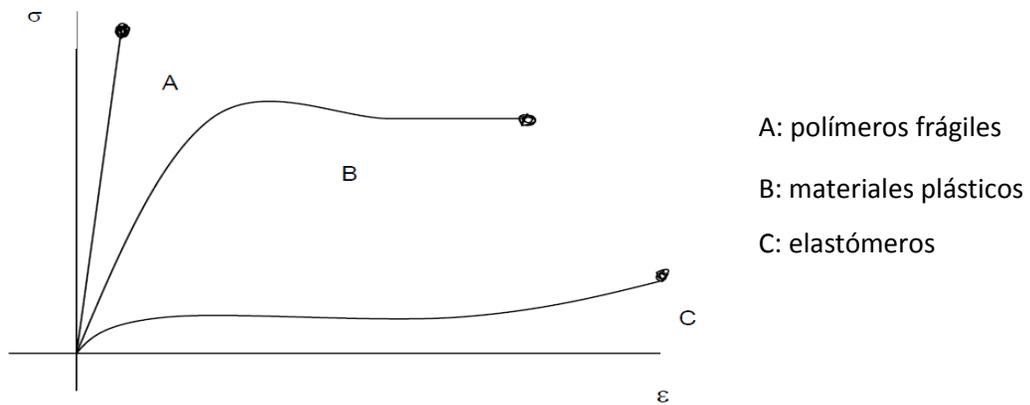


Figura 1.17. Curva esfuerzo-deformación para compresión⁵⁶.

1.2.1.5 Degradación térmica de los polímeros

La degradación térmica de los polímeros se puede llevar a cabo por un proceso de oxidación o por la acción del calor. El proceso de degradación térmica de los polímeros involucra una gran cantidad de reacciones químicas, generando nuevos compuestos⁵⁸. Las principales reacciones que se presentan son las siguientes:

1.2.1.5.1 Ruptura de las cadenas al azar. En esta reacción las cadenas del polímero se rompen en puntos al azar generando monómeros y oligómeros.

1.2.1.5.2 Ruptura de la terminación de la cadena. Reacción en la cual las unidades de monómeros son desprendidas del final o del inicio de la cadena de forma sucesiva (proceso inverso a la polimerización en cadena).

1.2.1.5.3 Separación de las moléculas o grupos de moléculas que no son parte de la cadena principal del polímero. La separación de estas moléculas involucra principalmente dos tipos de reacciones: eliminación y ciclización. Por eliminación se obtienen compuestos lo suficientemente pequeños para ser volátiles, y por ciclización, dos moléculas adyacentes reaccionan entre ellas para formar estructuras cíclicas.

1.2.1.5.4 Entrecruzamiento. El entrecruzamiento ocurre cuando se crean enlaces entre cadenas adyacentes; generalmente esta reacción se lleva a cabo después de la ruptura de las cadenas. El entrecruzamiento y la ciclización de las moléculas, son procesos muy importantes en la formación de residuos de carbono ya que se generan estructuras más estables y por lo tanto menos volátiles.

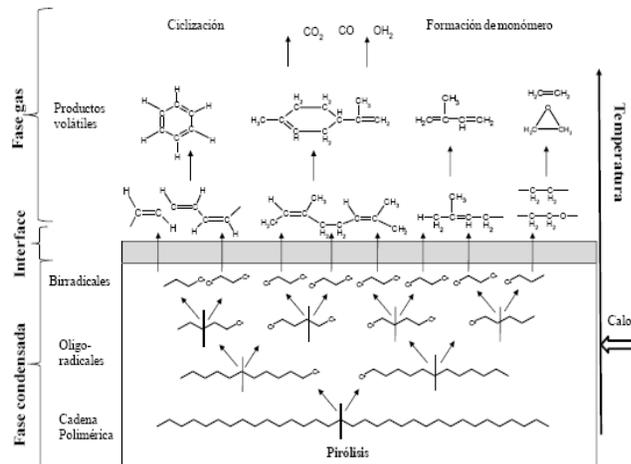


Figura 1.18. Reacciones químicas durante la descomposición de un polímero⁵⁸.

1.2.1.6 Proceso de combustión

La combustión de los materiales poliméricos es un proceso complejo que involucra al mismo tiempo diversos procesos, los cuales se pueden dividir en físicos y químicos. Estos procesos se llevan a cabo en tres fases: gas, interfase gas-líquido y fase condensada⁵⁹.

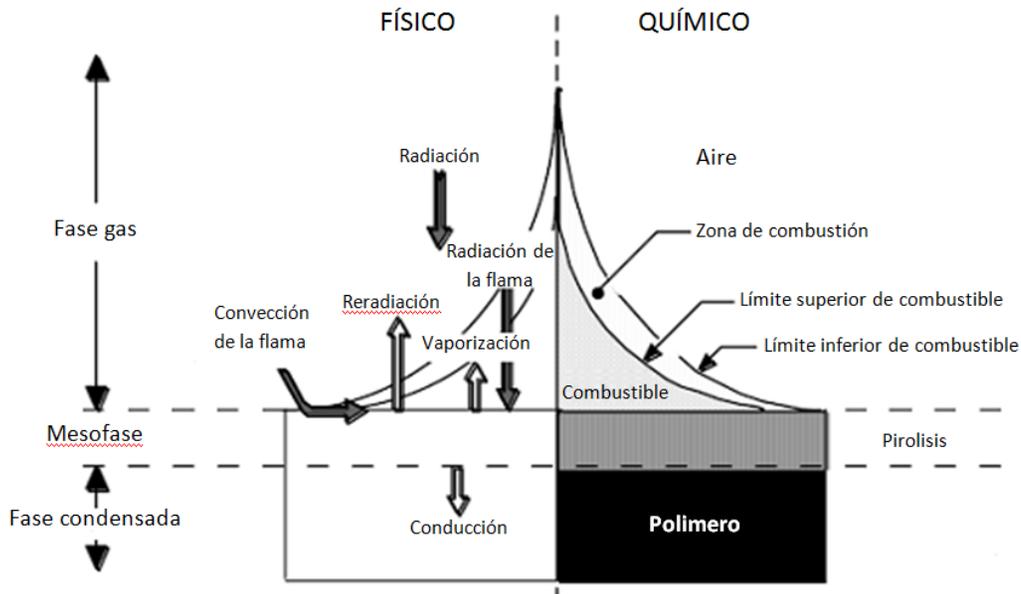


Figura 1.19. Proceso físico y químico de la combustión de polímeros⁵⁹.

El proceso físico de la combustión de los materiales poliméricos se muestra del lado izquierdo de la Figura anterior, el cual involucra los procesos de:

- Transporte de energía por radiación y convección entre la fase gas y la mesofase,
- Pérdida de energía de la mesofase por transferencia de masa (evaporación de productos volátiles),
- Conducción en la fase sólida,

El proceso químico se muestra del lado derecho de la Figura, el cual incluye:

- La degradación térmica del polímero que se lleva a cabo en la mesofase,
- Mezcla de productos volátiles con el aire,
- La ignición de la mezcla combustible en la fase gas.

La fase condensada está formada por polímero en estado sólido y líquido (polímero fundido). La tasa con la cual el calor es transportado y almacenado en la fase condensada es de fundamental

importancia porque este proceso determina el tiempo de ignición y la tasa de combustión del polímero. La mesofase es la interfase entre la fase gas y la fase condensada durante la combustión; la degradación térmica que genera los compuestos volátiles combustibles se lleva a cabo en la mesofase, también conocida como zona de pirólisis. El fenómeno que permite la ignición y la liberación de calor ocurre en la fase gas⁶⁰.

TABLA 1.10. ALGUNOS DE LOS PLÁSTICOS USADOS COMÚNMENTE EN LA CONSTRUCCIÓN

APLICACIONES	PLÁSTICOS UTILIZADOS
Acristalamiento	Acrílicos, PMMA con un componente de elastómero acrílico, policarbonato PC, vidrio reforzado con plástico (GRP)
Techos	PVC, CPE, PVDC, PC, EPDM, PSE, SBS copolimero.
Revestimiento	GRP, PVC, foamen unplasticised PVC (PVC-U), ABS como una mezcla de ABS/acrylic/PVDF.
Techos falsos	Acrílico, GRP, PS, PC.
Paredes y paneles de pared	GRP, PP, PVC, PVC (con acrílico o PC), PSE.
Tapiz	PVC
Marcos de ventanas y puertas	PVC, ABS
Selladores, juntas y adhesivos	PU, elastómeros termoplásticos, silicones.
Pinturas	PU, acrílicos,
Espumas aislantes no estructurales	Espumas de: PU, EPS, EPE, fenólicos, furanos, PVC, PIR, UF, PS.
Espumas aislantes de ruido, vibraciones sísmicas	Laminados de caucho (en su mayoría naturales/cloropreno), PPO, espumas UF, espumas de celdas abiertas de PU, PIR, PS.
Aislantes eléctricos (cables y conductos)	PVC, poliolefinas (PE, PP)
Espumas ingenieriles estructurales, paneles sandwich (SWP)	Espumas de: PIR, poliolefinas (PE, PP) PPO modificado, PC, ABS, PU.
Películas de barrera para la fachada del edificio	Poliolefinas (PE, PP) PVC, poliolefinas alifáticas, PET.
Plomería (tuberías de agua caliente y fría, drenaje, distribución de gas y sistema de calefacción por suelo radiante)	PVC, CPVC, MOPVC, PE-HD y LD, ABS, PP, GRP, PB,
Pisos	PVC y sus copolímeros, epoxy, PU
Como aditivo para el concreto y refuerzo para el concreto.	Concreto modificado con polímeros PMC, concreto polimerico PC, polímero impregnado de concreto (PIC), fibras reforzadas de plástico (FRP)
Aditivos para el asfalto y el concreto	Granulado de caucho
Sustitutos de madera	Desecho de PET, HDPE, PE (HD/LD) con fibras de madera
Geotextiles, geoceldas, geomembranas, geomatrics, geomallas.	PP, HDPE, PVC, poliésteres, cauchos sintéticos.
Cercas, cubiertas y barandales	PVC
Adaptación y rehabilitación	Sistemas de fibra reforzada termoestable

1.2.1.7 Aplicación de polímeros en la construcción

El empleo de los polímeros en este campo ha aumentado en los últimos años, gracias a que los Ingenieros, Arquitectos y especialistas del sector empezaron a adquirir conocimientos de las ventajas que brindan estos materiales, hoy en día nos podemos beneficiar de múltiples y diferentes aplicaciones en la construcción y equipamiento de una vivienda y resto de obras públicas. Los plásticos son utilizados en la Industria de la Construcción debido a:

- Proporcionan soluciones duraderas y resistentes,
- Son fuertes, resistentes a la corrosión y con características adecuadas de aislamiento (agua, temperatura, ruido y vibración),
- Son ligeros, su ensamble, transportación, almacenamiento e instalación fácil,
- Son higiénicos,
- Su relación costo beneficio es buena.

Existe una gran variedad de polímeros usados en la construcción como son el PVC, PSE, PS, PEAD, PELBD, PP, PC, PET y PU (Tabla 1.10).

1.2.2 Espumas de Poliuretano

Las espumas de poliuretano se pueden clasificar en rígidas o flexibles. Las espumas rígidas de poliuretano como materiales dentro de la construcción se caracterizan ante todo por su capacidad como aislante térmico⁶¹. Es un material termoestable por su estructura química.

Para la fabricación de la espuma rígida de poliuretano son necesarios dos componentes principales, un polioliol y un poliisocianato, y en su caso, auxiliares como: espumantes, catalizadores, tenso activos, antioxidantes, colorantes e ignífugantes.

Durante la reacción de poliadición se libera una considerable cantidad de calor, que en parte, se utiliza para vaporizar los líquidos contenidos. Lo que conlleva a que la mezcla reaccionante se expanda hasta convertirse en una espuma⁶².

1.2.2.1 Materias primas

1.2.2.1.1 *Poliolios*. Son líquidos viscosos, cuya característica química principal son los grupos hidroxilo (constituidos por oxígeno e hidrógeno, -OH). Estos grupos reaccionan con los grupos isocianato del poliisocianato dando lugar a grupos uretano.

- Poliéterpoliols. Se obtienen de la reacción de alcoholes polihidroxilados o de aminas con óxidos de alqueno.
- Poliésterpoliols. Se obtienen por reacción de ácidos carboxílicos polivalentes con glicoles, glicerina o polialcoholes similares. Se obtienen poliols con estructura ester.

Para la utilización de poliéterpoliols y poliésterpoliols no hay regla de validez universal; a menudo se combinan, dependiendo de las exigencias a cumplir en cada caso.

Para alcanzar la resistencia a la llama que se exige de la espuma se recomienda a menudo el uso simultáneo de poliésterpoliols aromáticos.

Cuando se elige un poliols, aparte de conocer su naturaleza química, es necesario disponer de su índice de hidroxilo (índice OH), de su viscosidad y de su contenido de agua.

1.2.2.1.2 *Poliisocianatos*. Se entiende por isocianatos aquellos compuestos químicos que están provistos de grupos funcionales isocianato (nitrógeno, carbono y oxígeno, NCO-). Para la fabricación de espumas PUR se emplean casi exclusivamente los isocianatos basados en el MDI (diisocianato de metilendifenileno, o diisocianato de difenilmetano).

El MDI es rigurosamente difuncional, es decir, posee sólo dos grupos NCO, en cambio los componentes PMDI (polimetil disocianato) de peso molecular más alto pueden poseer tres o más grupos NCO.

Los poliisocianatos de MDI utilizados para la fabricación de espuma rígida de PUR son líquidos viscosos de color entre parduzco y marrón oscuro, caracterizándose por su contenido en NCO, viscosidad y acidez.

1.2.2.1.3 *Espumantes*. Durante la reacción de isocianato y agua, se forma dióxido de carbono que actúa como espumante. La expansión se logra a partir de un espumante físico o químico, que consiste en un líquido de bajo punto de ebullición que se evapora por el calor liberado en la misma reacción. Debe ser soluble en los componentes de la reacción y en la mezcla debe permanecer dentro de las celdas de la espuma, poseer una conductividad térmica baja y no plastificar el poliuretano. Otra característica primordial es el ser inocuo desde el punto de vista

toxicológico y de conservación del medio ambiente. Y es en la utilización de los espumantes donde en los últimos años se ha centrado mucha de la investigación, ya que el hidrocarburo fluoroclorado CFC 11 (monofluortriclorometano) que se utilizó durante un largo lapso de tiempo cumplía con todos los requisitos funcionales de un espumante, pero su utilización era perjudicial para el medio ambiente, ya que es causante de la destrucción de la capa de ozono, por lo tanto, favorece el efecto invernadero (calentamiento global). Por lo que en 1987 en el Acuerdo de Montreal se obligó a prescindir de él⁶³.

TABLA 1.11. EJEMPLO DE AGENTES ESPUMANTES ⁴	
TIPO	EJEMPLOS
Químicos	Agua Compuestos orgánicos enolizables Acido Bórico
Físicos	Clorofluorocarbono (CFC) Hidroclorofluorocarbono (HCFC) Hidrofluorocarbono (HFC) Perfluorocarbonos (PFC) Hydrofluorocarbons ethers (HFE) CO2 liquido C5-hidrocarbonos Azeótropos

Actualmente en lugar del CFC 11 se utilizan hidrocarburos, hidrocarburos hidrógeno-fluoroclorados e hidrocarburos hidrógeno-fluorados, estos no son sustitutos perfectos del CFC 11 ya que para alcanzar el nivel deseado de propiedades exigido de las espumas se debe adaptar a los polioles y aditivos.

1.2.2.1.4 *Catalizadores.* Los polioles y poliisocianatos reaccionan entre sí a una velocidad determinada, para acelerar o aminorar la reacción se añaden activadores o estabilizadores a la mezcla reaccionante. Dicha acción se utiliza para regular según las exigencias planteadas de reacción y de la espumación.

Los activadores. La mayoría de los polioles y poliisocianatos reaccionan entre si a temperatura ambiente a una velocidad moderada. Para acelerar la velocidad de reacción es necesario añadir activadores a la mezcla reaccionante, las cuales suelen ser aminas terciarias, compuestos de estaño o sales alcalinas de ácidos carboxílicos.

1.2.2.1.5 Tenso activos o estabilizadores. La espuma formada por el hinchante evaporado es inestable en muchos de los casos, por lo que es necesaria la adición de estos para darle estabilidad durante el proceso de reacción. Como estabilizadores de la espuma se utilizan casi exclusivamente los compuestos orgánicos de silicio que despliegan una acción tenso activa pero actúan también como emulsionantes. Son estos los que regulan la estructura de la espuma, dándoles la característica de celdas abiertas o cerradas y su tamaño, parte influyente en las propiedades de la espuma final.

1.2.2.1.6 *Retardantes de fuego*. Los poliuretanos son compuestos orgánicos y, como tales, susceptibles de combustión. Para retrasar su encendido y evitar la propagación de la llama se requiere que tengan una estructura química adecuada y se les añadan componentes ignífugos⁶⁴.

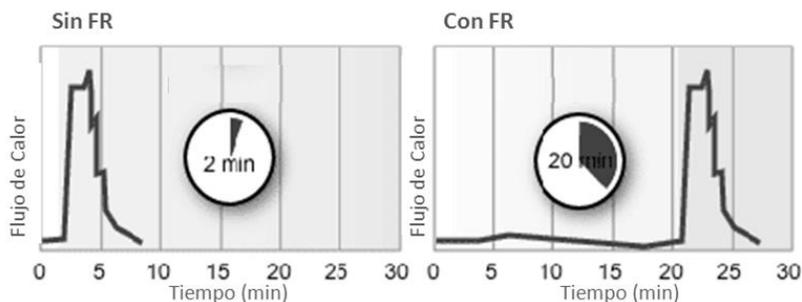


Figura 1.20. Efectos de un Retardante de Fuego (www.specialchem4polymers.com).

El principio de los retardantes de fuego es detener el ciclo de combustión. Como se explicó anteriormente, en el mecanismo de combustión de los polímeros, los principios de la retardancia de fuego son:

- Mediante la adición de agentes que generen carbón, es decir, reductores que puedan reducir la generación de gases combustibles.
- Añadiendo eliminadores de radicales libres (radical scavengers), tales como compuestos de cloro o bromo, porque la reacción de combustión es una reacción por radicales libres.
- Mediante la adición de compuestos hidratados como la alúmina trihidratada para reducir el poder calorífico de la combustión (desprende agua cuando se calienta).
- Mediante la incorporación de enlaces térmicamente estables, como los vínculos (linkages) isocianurato para reducir la descomposición térmica.

TABLA 1.12. RETARDANTES DE FUEGO⁴

TIPO	EJEMPLOS
Líquidos	Fosfato Fosfanato Fosfinatos Fosfito Oxido de fosfito Fosfina
Retardante de fuego	Orgánicos Tetrabromobisfenol A bis Melanina Guanidina Oxido pentabromodifenil Inorgánicos Alumina trihidratada Polifosfato de amonio Sulfato de amonio Acido bórico Borato de sodio Fosforo rojo Hidróxido de magnesio Carbonato de calcio Arcilla Mica

En la actualidad los materiales nanocompuestos, han sido objeto de diversos estudios, debido a que se han encontrado grandes ventajas frente a los retardantes de fuego aplicados anteriormente^{65,66,67,68}.

1.2.2.1.7 Medidas de seguridad para manipulación de materias primas del PU. Por motivos de seguridad, cuando se manipulan materias primas químicas como las del PU tienen que adoptarse todas las medidas de protección indicadas en las hojas de datos de seguridad y hojas técnicas de los productos.

El MDI, monomérico y polimérico, están clasificados como sustancias peligrosas y de etiquetado obligatorio, teniendo que manipularse con precaución. Para el manejo del MDI se ha fijado un valor límite de la concentración máxima admisible en el lugar de trabajo de este producto en forma de gas, vapor o sólido en suspensión, el valor límite umbral TWA=0.005 ppm. El grado del posible peligro dependerá ante todo de la cantidad de los vapores de isocianato que se desprenden durante la transformación. Se debe trabajar siempre con un extractor de aire y se debe mantener bien ventilada el área de trabajo.

Los vapores del MDI irritan los ojos y las mucosas de la nariz, garganta y pulmones, pudiendo provocar reacciones de hipersensibilidad, por lo tanto, debe evitarse la inhalación.

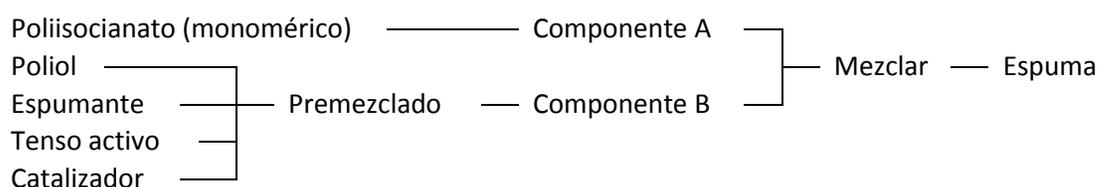
Durante la manipulación de estos productos se debe utilizar equipo de respiración autónomo o mascarilla con filtros orgánicos, gafas de seguridad, guantes impermeables y ropa, o en su caso bata adecuada. En la hoja de datos de seguridad del producto se detallan las instrucciones técnicas y de manipulación.

Las medidas y reglas mencionadas deben seguirse en general para la fabricación de espuma rígida de PUR⁶⁹.

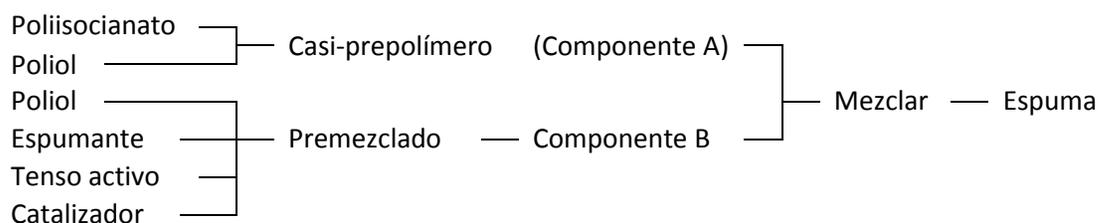
1.2.2.2 Generalidades de la preparación, espuma PUR

Los sistemas de formación de espuma se pueden dividir en tres sistemas: el sistema de un solo paso, el sistema con un cuasi-prepolímero y el sistema de prepolímero completo.

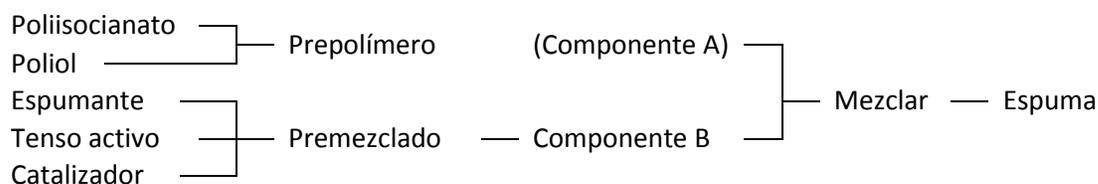
Sistema de un paso



Cuasi-prepolímero



Prepolímero completo



1.2.2.3 Procedimiento de fabricación de la espuma PUR

Existen distintos métodos de fabricación de la espuma PUR: mezclado manual, fabricación de espuma rígida con máquinas, fabricación de espumas de PUR con capas de cobertura (planchas aislantes, elementos tipos sándwich) y aplicada en la obra (aspersión).

1.2.2.4 Aplicación en la edificación

La mejora del aislamiento térmico de un edificio puede suponer ahorros energéticos, económicos y de emisiones de CO₂ del 30% en el consumo de calefacción y aire acondicionado, por disminución de las pérdidas.

Por estas razones, recientemente, la vivienda constituye un sector clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) causantes del calentamiento global. Hoy en día, sus emisiones directas de GEI alcanzan 3% del total, pero sumadas a las emisiones indirectas producto del consumo de electricidad, la participación de la vivienda ronda el 8% del total nacional. Por ello, es necesario integrar en las políticas de vivienda programas e instrumentos capaces de moderar y abatir las emisiones directas e indirectas, y al mismo tiempo, aprovechar las oportunidades que ofrecen los mercados internacionales de carbono en plena expansión.

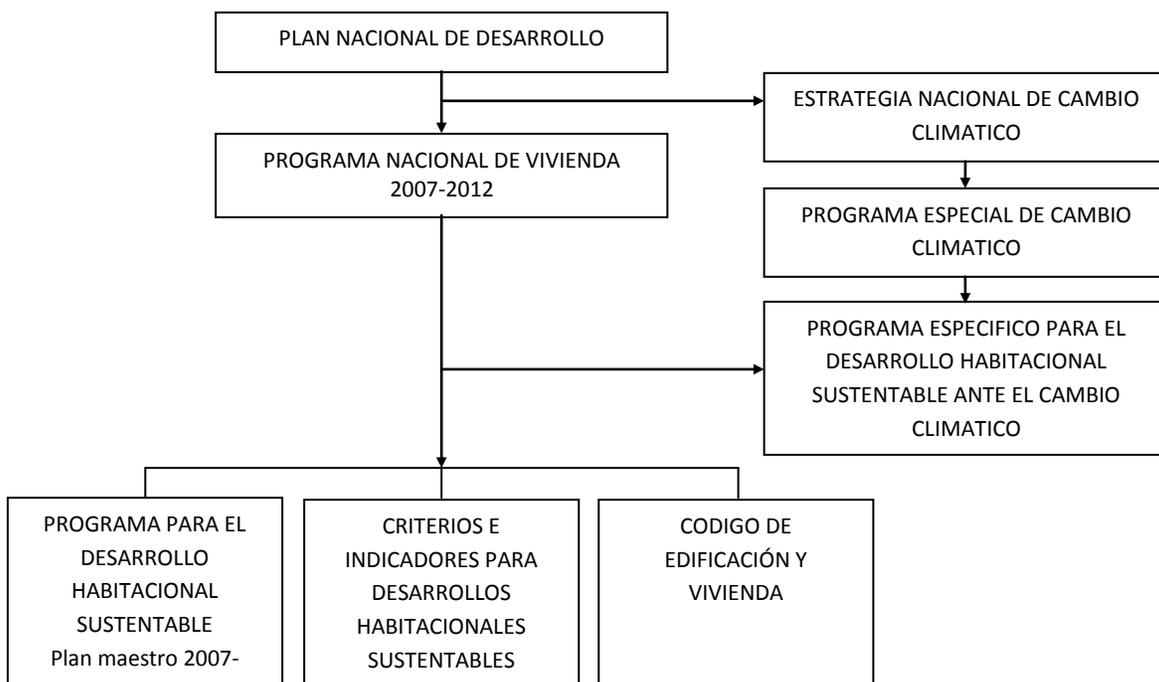


Figura 1.21. Edificación sustentable en México (CONAVI).

El Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012, integra la visión México 2030 que expresa una voluntad colectiva de cambio, que es factible y cuyo propósito es alcanzar el desarrollo humano sustentable. Por tanto, en él, se imprime un enfoque de largo plazo a los objetivos nacionales, las estrategias generales y las prioridades de desarrollo⁷⁰.

Para hacer realidad la Visión México 2030 y atender las prioridades nacionales, el Plan Nacional de Desarrollo propone, entre otros objetivos, el de asegurar la sustentabilidad ambiental mediante la participación responsable de los mexicanos en el cuidado, la protección, la preservación y el aprovechamiento racional de la riqueza natural del país, logrando así afianzar el desarrollo económico y social sin comprometer el patrimonio natural y la calidad de vida de las generaciones futuras.

Por otro lado, la Ley de Vivienda expedida en junio de 2006 establece el sistema de distribución de competencias en materia de vivienda, así como los instrumentos más importantes a ser incluidos en las políticas sectoriales. Además, define algunos criterios básicos para imprimir una dimensión de sustentabilidad en el desarrollo de la vivienda promovida por entidades de gobierno. De manera relevante a este programa, la Ley de Vivienda apunta que la política nacional de vivienda deberá considerar el respeto al entorno ecológico y la preservación y el uso eficiente de los recursos naturales. Igualmente, postula que debe propiciarse que las acciones de vivienda constituyan un factor de sustentabilidad ambiental, ordenación territorial y desarrollo urbano.

Asimismo, la ley le atribuye a la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) facultades en materia de coordinación, promoción e instrumentación de política, a través de la Política Nacional de Vivienda.

Por ello la CONAVI, con el objetivo de lograr avances rápidos en la edificación de Desarrollos Habitacionales Sustentables, en una primera etapa, desarrolló los criterios e indicadores para evaluar este tipo de edificaciones que atienden los rubros relacionados con el uso del suelo, su ubicación y sus características, la energía, el agua y los residuos sólidos⁷¹.

Como se muestra en la Tabla 1.13, anterior, la utilización de materiales térmicos es una propuesta a evaluar, dentro del criterio de uso eficiente de energía.

TABLA 1.13. PONDERACIÓN DE CRITERIOS REGIONALES Y GENERALES ⁷¹		
CRITERIO	REGIONAL / GENERAL	VALOR
A. Ubicación, densificación del suelo, verticalidad y servicios		
I. Integralidad y proximidad a mancha urbana	R	15
II. Conectividad y movilidad	R	4
III. Infraestructura	R	3
IV. Uso de Suelo y densidad habitacional	R	8
	Suma	30
B. Uso eficiente de la energía		
I. Gas	R	2
II. Energía eléctrica	R	4
III. Envoltente térmica	R	4
IV. Sistemas pasivos	-	-
Diseño urbano	R	5
Diseño arquitectónico	R	6
	Suma	21
C. Uso eficiente del agua		
I. Disponibilidad de agua en el conjunto	G	5
II. Suministro de agua en la vivienda	G	3
III. Agua residual	G	6
IV. Agua pluvial	G	5
V. Servicio post venta	G	1
	Suma	20
D. Manejo adecuado de residuos sólidos		
I. En el proceso de la construcción		
Manejo de residuos en la construcción	G	3
II. En la vivienda	G	1
III. Del conjunto	G	3
IV. Áreas verdes	G	1
V. Servicio post venta	G	1
	Suma	9
	Total	80

La espuma rígida de PU es un material plástico de composición celular empleado como aislante térmico, acústico e impermeabilizante, propuesto como envoltente térmica. Sus características conferidas por la estructura celular cerrada y su innovadora tecnología de fabricación lo han puesto a la cabeza de los productos que colaboran en el ahorro de energía a través del aislamiento térmico. Destacan tres grupos de aplicaciones del poliuretano rígido por su campo de aplicación:

- Proyección “in situ”, proyección,
- Planchas conformadas,
- Paneles sándwich prefabricados.

Y destaca entre los aislantes térmicos por su:

- Elevada capacidad aislante,
- Durabilidad.

TABLA 1.14. CRITERIOS DE ÁMBITO GENERAL, USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA⁷¹

CRITERIO	VALOR	EVIDENCIA
I. Gas		2
I.1 Calentador de gas tipo instantáneo (de paso) para agua, debe cumplir con la NOM-003-ENER-2000	1	Certificado de cumplimiento
I.2 Calentador solar que cumple con el protocolo propuesto por CONAE	1	Evidencia de cumplimiento con pruebas, certificado o dictamen.
II. Energía eléctrica		4
II.1 Lámpara fluorescente compacta autobalastada 20 W, con sello FIDE	1	Certificado de cumplimiento
II.2 Luminario de uso interior para lámpara fluorescente compacta o circular de mínimo 20W tipo pin, con sello FIDE.	0.5	Certificado de cumplimiento
II.3 Luminario de uso exterior para lámpara fluorescente compacta o circular de mínimo 13W tipo pin, con sello FIDE	0.5	Certificado de cumplimiento
II.4 Equipo de acondicionamiento de aire eficiencia con sello FIDE	2	Certificado de cumplimiento
III. Envoltente térmica		4
III.1 Aislamiento térmico para techo (utilización de materiales con sello FIDE)	2	Certificado de cumplimiento
III.2 Aislamiento térmico para muro de mayor insolación (utilización de materiales con sello FIDE)	2	Certificado de cumplimiento

El aislamiento térmico es la piedra angular de la edificación sostenible. Su empleo de forma óptima garantiza el equilibrio entre los beneficios sociales, económicos y medioambientales minimizando los diversos costos durante la vida útil de los edificios.

El aislamiento de fachadas, cubiertas y suelos reduce las pérdidas de energía debidas a la diferencia de temperatura entre recintos independientemente de que la fuente de energía sea renovable o no.

La diversa climatología de nuestro país y las distintas tipologías constructivas asociadas ofrecen un gran número de posibilidades de aislar los edificios para que ahorren energía y disminuyan las emisiones de CO₂.

El concepto de aislamiento térmico está asociado a la capacidad de control de transmisión de calor cuando se requiera que no exceda ciertos límites.

Un producto aislante térmico es un material que reduce la transmisión de calor a través de la estructura sobre la que se instala. Los límites numéricos sólo pueden definirse cuando la aplicación específica se ha definido. En algunos casos, la función del aislamiento térmico es desarrollada por un material o sistema diseñado para funciones completamente diferentes. Por ejemplo, un muro de carga en un edificio puede cumplir los requerimientos aislantes. En otros casos, el sistema

mismo no es adecuado y un material adicional es necesario para satisfacer los requerimientos relativos a la transmisión de calor.

Sin embargo la conductividad térmica de los materiales convencionales es con frecuencia considerable, lo que favorece el intercambio de calor entre el interior de la edificación y el medio ambiente.

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD (BTU-in)h-ft²-F
Aire	0.2
Aluminio	1400.0
Ladrillo	5.0
Mármol	20.6
Lana mineral	0.33

Una forma de representar la conductividad térmica en un material es por medio del coeficiente de transferencia de calor (K), el cual, a diferencia de la conductividad térmica, no depende del espesor de material. Para propósitos de simplificación de cálculo de flujo de calor a través de una superficie se ha establecido un valor R. El valor R es inversamente proporcional a la conductividad (k) y directamente proporcional al espesor del material (t). En términos unitarios, el valor R se mide por unidad de área (ft² o m²), por unidad de temperatura absoluta (grados Kelvin o Celsius) entre flujo de calor (BTU/h o Watts).

TIPO DE AISLAMIENTO	DENSIDAD APARENTE	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA A 25 °C DE TEMPERATURA MEDIA		RESISTENCIA TÉRMICA A 1''(2.5 CM) DE ESPESOR	
		W/m °C	k BTU in/ft² h °F	RSI °C m²/W	R ft² h °F/ BTU
Espuma elastomérica	60	0.039	0.270	0.65	3.7
Fibra de vidrio	19 a 30	0.040	0.277	0.64	3.6
Fibra mineral	30 a 50	0.037	0.257	0.69	3.9
Poliestireno expandido	15	0.037	0.257	0.69	3.9
Poliestireno extruido	33	0.029	0.201	0.88	5.0
Poliuretano conformado(PU)	32	0.026	0.180	0.98	5.5

Con este parámetro se puede establecer, por unidad de área la envolvente de una construcción (pared, ventana o techo), el efecto de aislamiento térmico es directamente proporcional al diferencial de temperatura (ΔT). En la Tabla 1.16 se ilustran opciones tecnológicas de aislamiento térmico⁷³.

Una vez establecida a qué zona climática pertenece la localidad donde se ubica el espacio construido que se está analizando se puede definir el Valor R sugerido. Para la “International Energy Conservation Code” se definen valores distintos dependiendo del destino del edificio.

Cabe mencionar, la existencia de la Norma Oficial Mexicana 018 ENER 1997, que tiene por objeto establecer las características y métodos de prueba que deben cumplir los materiales, productos, componentes y elementos termoaislantes, para techos, plafones y muros de las edificaciones.

La experiencia que se ha tenido en Mexicali, Baja California para varias decenas de miles de hogares demuestra que una vivienda con aislamiento puede reducir 30% o más en su consumo de energía. Esto, por supuesto, depende de las características de la vivienda y de las condiciones climáticas de la localidad y puede ser evaluado con relativa precisión con simulaciones en computadora.

1.2.2.4.7 Aplicaciones^{74,75,76,77}

Aplicaciones con proyección de espuma de PUR

Techo plano. Proyección de espuma de poliuretano y protección con elastómero. Una vez limpio el espacio, se procede a proyectar espuma de PUR siguiendo las especificaciones oportunas, a continuación se aplica una capa de elastómero que protege al aislamiento de radiación UV e incrementa la impermeabilización de la cubierta. Aporta rigidez a la cubierta y continuidad en aislamiento e impermeabilización de techos, eliminando las juntas.

Se necesita espuma de poliuretano; una capa de espesor mínimo de 30 mm. Densidad mínima aplicada de 45 kg/m³ en cubiertas, para garantizar la impermeabilidad y una protección de elastómero de poliuretano; capa PU de espesor variable (1,5-3 mm), densidad 1.000 kg/m³ con coloración. Aporta protección de los rayos UV a la espuma de poliuretano e incrementa la impermeabilidad de la cubierta.

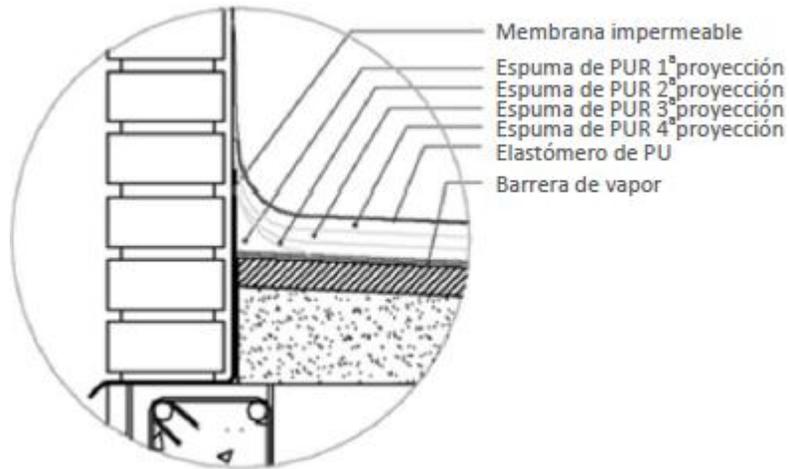


Figura 1.22. Detalle de junta.

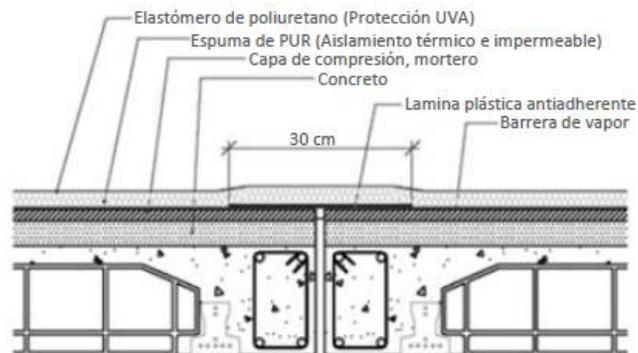
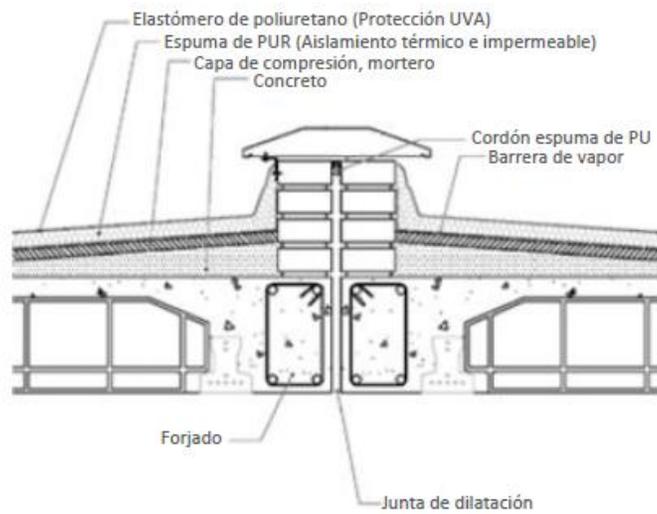


Figura 1.23. Detalle en juntas de dilatación.

Techo inclinado. Proyección de espuma de poliuretano sobre teja y protección con elastómero. El soporte inicial es la cubierta de teja original. Sobre la misma se realiza la proyección de espuma PUR siguiendo las recomendaciones específicas para el tipo de soporte y posteriormente se proyecta el elastómero de PU que protege al aislamiento de radiaciones UV e incrementa la impermeabilización de la cubierta.

Esta forma de tratar térmicamente una techo de teja es sin duda la más sencilla, económica y eficaz, porque no requiere en la práctica de tratamientos previos de soporte, ni de medios auxiliares especiales. Aporta rigidez a la cubierta y continuidad en aislamiento e impermeabilización de cubiertas, eliminando las juntas.

Se aplicara espuma de poliuretano; en una capa de espesor mínimo de 30 mm. Densidad mínima de 45 kg/m^3 para garantizar impermeabilidad y se aplicará también una protección de elastómero de poliuretano; capa de PU de espesor variable.

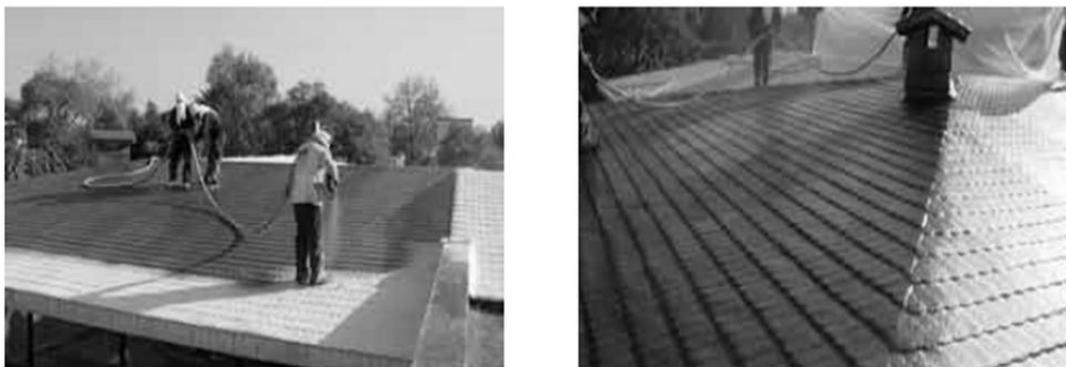


Figura 1.24. Aplicación sobre teja.

Techo inclinado. Proyección de espuma de poliuretano bajo teja. Cuando el bajo techo es accesible se puede realizar esta solución constructiva, que consiste en la proyección de espuma de poliuretano en la superficie inferior del tejado. No se puede considerar esta solución constructiva como de impermeabilización.

La proyección debe llevarse a efecto ejecutándola con un sentido de avance en la dirección de elevación del techo, con el fin de que no penetre la fase líquida entre las tejas, ya que si ello ocurriera, la expansión de la espuma produciría un desplazamiento entre las mismas. Una vez proyectadas así las primeras capas y comprobando que las tejas están unidas con la espuma, se cambia el sentido de la proyección, para conseguir un sellado idóneo de las uniones.

La estabilidad dimensional de la espuma proyectada depende de la densidad de la misma, con este fin se recomienda que la densidad mínima sea de 35 kg/m^3 . Dependiendo del tipo de teja el sellado se conseguirá con diferente espesor de proyección. Con menos de 4 cm no se consigue un sellado adecuado.

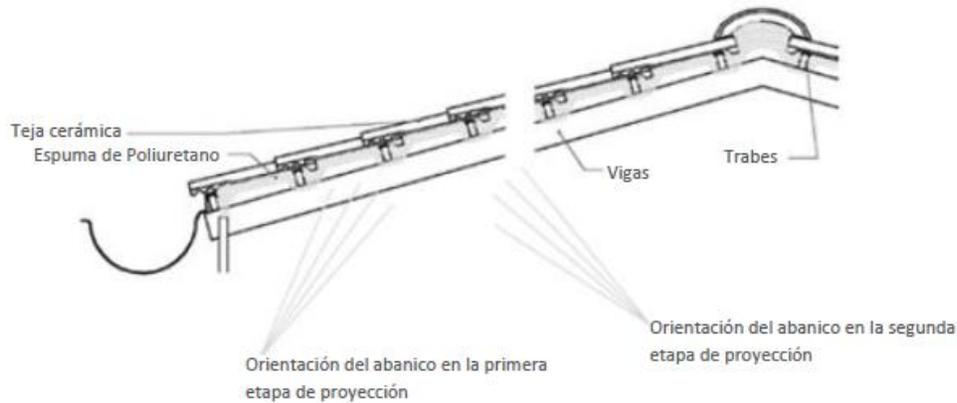


Figura 1.25. Espuma PUR bajo teja.

Fachadas. Aislamiento por el interior. Cuando se van a realizar obras en el interior de la edificación, se debe tener en cuenta el principal condicionante: el espacio útil que se pierde.

En el caso de muros con cámara de aire en que se realiza la demolición del elemento interior de ladrillo, se puede aprovechar el espacio disponible y tratar de forma global los puentes térmicos. La espuma de poliuretano proyectada será una capa de espesor mínimo de 30 mm.

Fachadas. Aislamiento por el exterior. En el caso de una fachada ventilada, se procede inicialmente a la limpieza y acondicionamiento de la fachada que debe soportar el sistema ventilado. Lo habitual es proyectar la espuma de poliuretano una vez se ha fijado el entramado metálico y a continuación colocar las piezas que forman el revestimiento de la fachada.

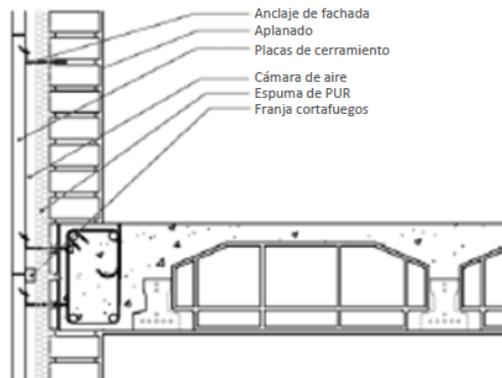


Figura 1.26. Aislamiento por el exterior.

Cuando se descarta cualquier intervención por el exterior y no se desea perder espacio en el interior se valorará la inyección de aislamiento en la cámara, siempre que ésta sea accesible y cumpla con una serie de requisitos que hagan la intervención segura. Este tipo de solución constructiva requiere una atención especial, tanto por la valoración de su idoneidad como por la ejecución. Se debe recurrir a este tipo de solución cuando queden descartadas otras posibilidades de aislamiento.

Si se opta por la misma, conviene asegurar el resultado pretendido, para ello las inyecciones se realizarán a través de taladros espaciados, como máximo 50 cm entre sí, sin que se sitúen sobre la misma línea. La inyección debe comenzar por los taladros situados en la parte inferior, llenando la cámara de abajo a arriba lentamente ya que el material específico para estos casos, de baja densidad y con un periodo de espumación lento, debe saturar el volumen de la cámara sin crear tensiones excesivas en los muros colaterales ya que éstos se pueden llegar a cuartear.

En la elección de este tipo de solución se ha de tener en cuenta que el llenado del volumen de la cámara puede verse entorpecido por elementos distorsionantes internos.

Aplicaciones con planchas conformadas de poliuretano

Techos Planos. No transitables. Los elementos del sistema sobre el soporte serán los siguientes:

- Barrera de vapor adherida al mismo, en el caso que se precise (normalmente se precisa en soportes de concreto o madera). Si la barrera es una lámina bituminosa con armadura de polietileno o de aluminio se deberá adherir al soporte previa imprimación de este.
- Aislamiento térmico en planchas conformadas, ancladas a la barrera de vapor bituminosa mediante la aplicación de fuego sobre la barrera o ancladas mecánicamente. El número de fijaciones vendrá determinado por el tipo de soporte y de la fijación, situación del techo y zona eólica.
- Membrana impermeabilizante, anclada mecánicamente al soporte o adherida. En este caso las planchas de aislamiento irán terminadas en aluminio o velo de vidrio en ambas caras.
- Membrana impermeabilizante adherida, en este caso las planchas de aislamiento serán con terminación superior de velo de vidrio bituminado, para facilitar la adhesión de la membrana.

Techos planos. No transitables con protección pesada.

Sobre el soporte (1) se instalarán las siguientes capas:

- Barrera de vapor adherida (2).
- Capa aislante con planchas de poliuretano (3).
- Membrana impermeabilizante (4).
- Capa antipunzonante y separadora (5).
- Capa de terminación y protección (6).

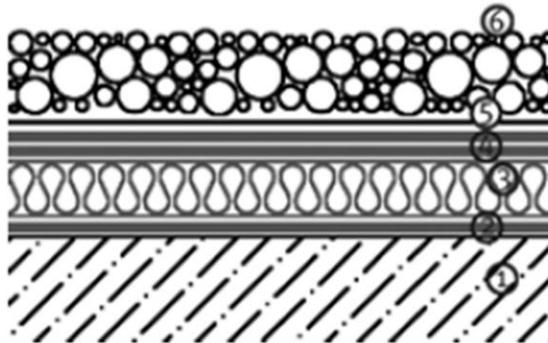


Figura 1.27. Esquema aplicación espuma de PUR en

Techos planos. Transitables con protección pesada.

Sobre el soporte (1) se instalarán las siguientes capas:

- Barrera de vapor adherida (2).
- Capa aislante con planchas de poliuretano conformado (3).
- Membrana impermeabilizante (4).
- Capa antipunzonante y separadora (5).
- Capa de terminación y protección (6).

Las terminaciones más habituales son: losas cerámica y madera (8).

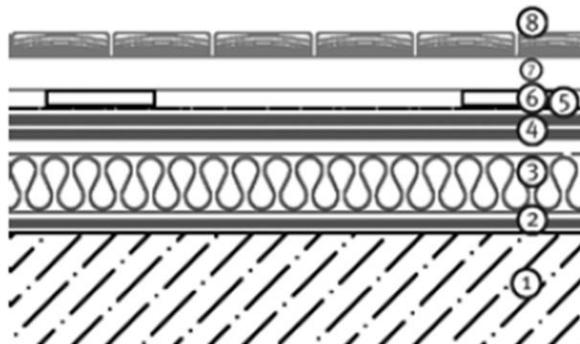


Figura 1.28. Esquema aplicación espuma de PUR en

Techos jardinados

Sobre el soporte (1) se instalarán las siguientes capas:

- Barrera de vapor adherida (2).
- Capa aislante con planchas conformadas de poliuretano (3).
- Membrana impermeabilizante adherida (4).
- Capa drenante y retenedora de agua (5).
- Capa de terminación y protección (6).

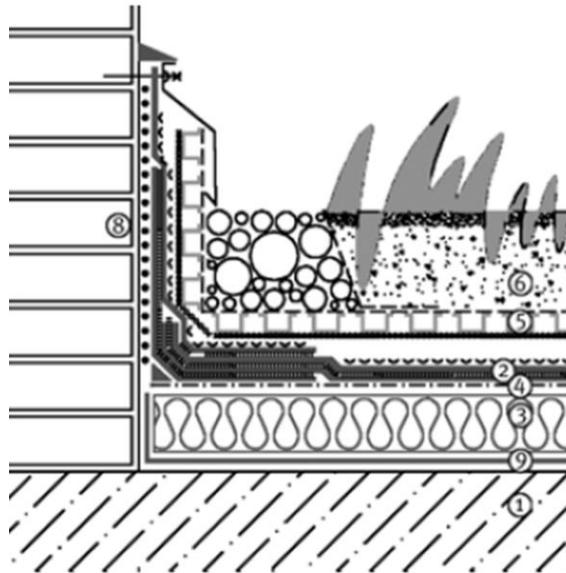


Figura 1.29. Esquema aplicación espuma de PUR en

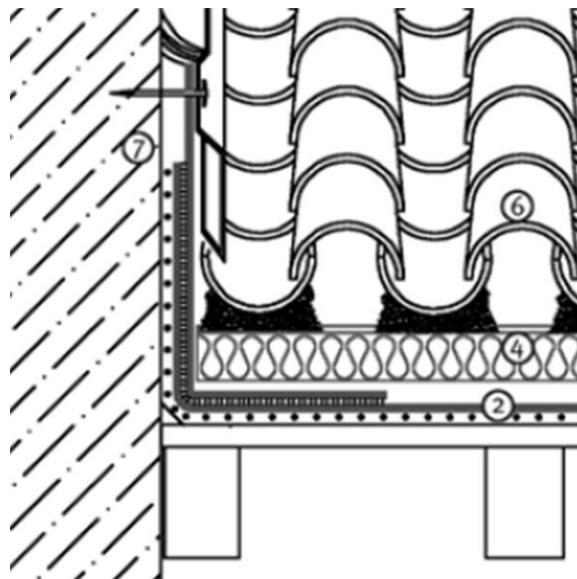


Figura 1.30. Panel de PUR en sistema de tejado

Cubiertas de teja

Sobre el soporte se instalarán las siguientes capas:

- Membrana impermeabilizante autoadhesiva, previa imprimación del soporte.
- Capa aislante con planchas de poliuretano conformado.
- Capa de mortero de cemento armada de espesor mínimo 4 cm.
- Teja .

Muros, aislamiento por el interior. En este caso se aporta aislamiento al espacio interior sin actuar en la fachada, al estar la capa de aislamiento ubicada en el interior nos aportará una rápida consecución de la temperatura requerida.

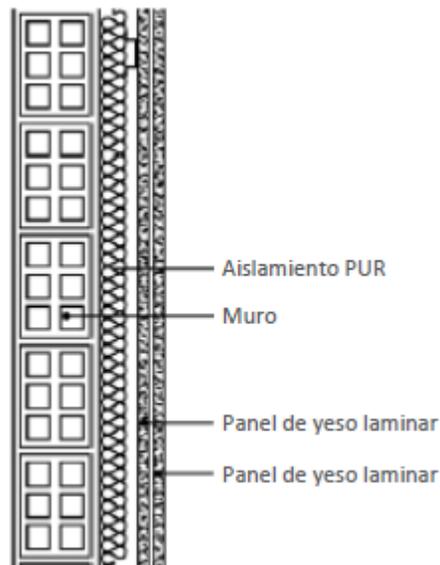


Figura 1.31. Panel de PUR en sistema de tejado

Aislamiento por el exterior. En el caso en que no se pueda instalar en el interior, para no reducir el espacio, afectación de terminaciones, muebles, etc.

Las planchas de poliuretano conformado con terminación de aluminio aportan una excelente conductividad térmica (0,024 W/mK) y aseguran la continuidad del aislamiento gracias a la terminación del canto de las planchas mediante machiembrado.

Suelos y techos uso peatonal privado Las planchas conformadas de poliuretano se colocan al tresbolillo y a testa. Permiten su sellado mediante la cinta adhesiva del sistema.

Aislamiento de suelos por el interior. La capa de concreto superior debe ir armada y tener un espesor mínimo de 4 cm.

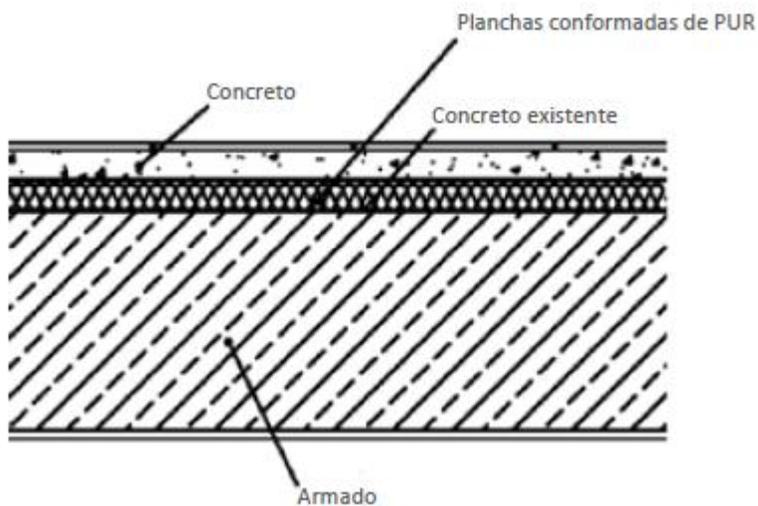


Figura 1.32. Panel de PUR en sistema de piso por

Aislamiento de suelos por el exterior.

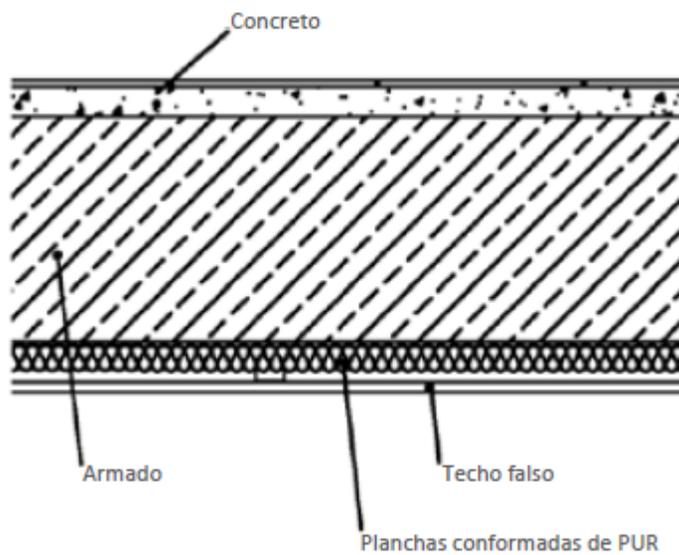


Figura 1.33. Panel de PUR en sistema de piso por exterior.

Aplicaciones con paneles sándwich de PU

Cubierta inclinada. La pendiente mínima admisible para el montaje del panel normalmente es de un 5%, pero se aconseja que la pendiente sea mínimo 7% en caso de realizar solapes transversales.

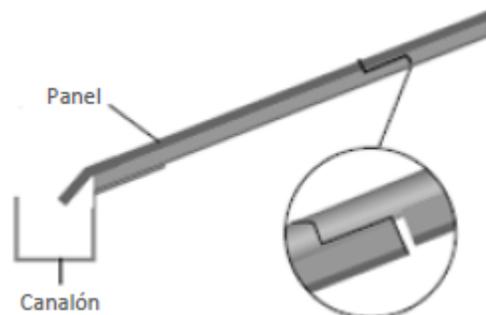
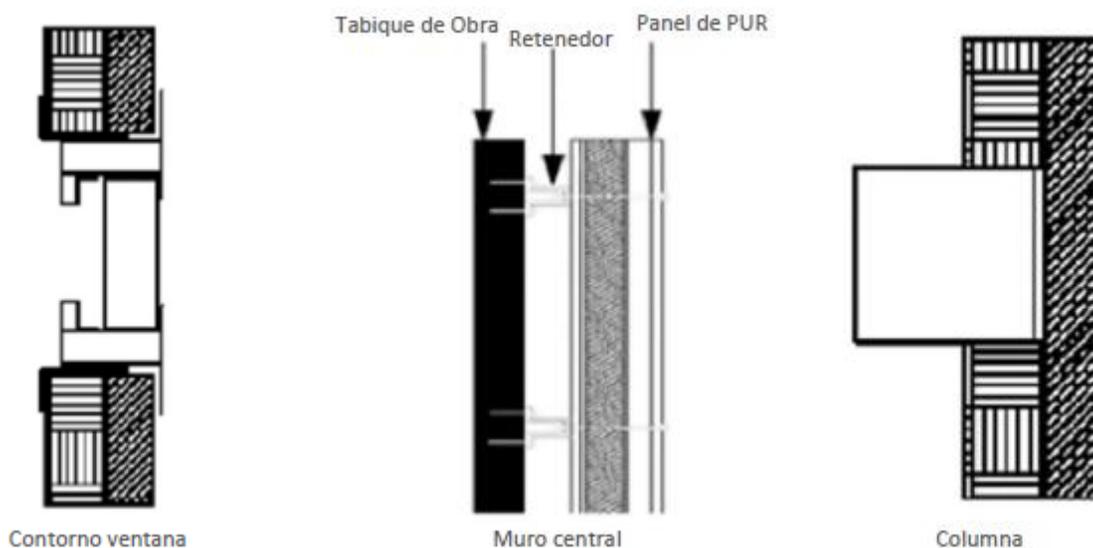
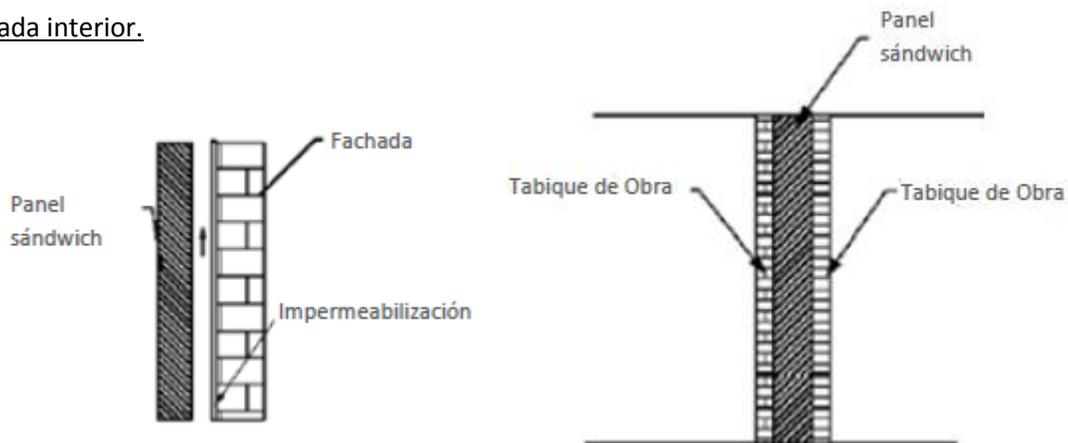


Figura 1.34. Panel de PUR en sistema de tejado

Rehabilitación de fachadas, fachada exterior.



Fachada interior.



1.3 *NANOCOMPUESTOS*

Los materiales nanocompuestos (NC), son aquellos materiales cuyas cargas discretas tienen al menos una de sus dimensiones menor a 100 nm, en esta definición se hace referencia solo al tamaño de la partícula de la carga mineral que se adiciona al material virgen para modificar sus propiedades. Los NC están formados por dos elementos, una matriz y las nano-partículas, entendiendo como matriz al material que se encuentra en mayor cantidad y a la que se desea modificar sus propiedades. Las nano-partículas son adicionadas a la matriz en distintas concentraciones y éstas a su vez dependiendo su estructura se pueden clasificar de distinta forma:

- Isodimensionales o nanopartículas, son de tipo esférico o esferoide y sus tres dimensiones son de escala nanométrica, un ejemplo sería las partículas esféricas de sílica o el sulfato de bario.
- Nanotubos o agujas, son partículas con dos de sus tres dimensiones de escala nanométrica, por ejemplo los nanotubos de carbono y sepiolitas.
- Plaquetas o capas, una de sus tres dimensiones presenta una escala nanométrica, un ejemplo son las arcillas esmectitas.

Los nanocompuestos son un caso extremo de materiales compuestos debido al tamaño tan pequeño de la unidad estructural y a la gran relación superficie volumen, lográndose una alta relación de área superficial de las cargas. Como resultado, las propiedades de los NC son superiores que las producidas con los aditivos convencionales. Además funcionan con concentraciones menores a las utilizadas.

Los nanocompuestos poliméricos, hacen referencia a aquellos materiales compuestos cuya matriz es un polímero. En dichos materiales, que incluyen en su composición arcillas minerales, han logrado mejorar las propiedades mecánicas, en cuanto a resistencia a la flama, al desgaste, mejora de su superficie, en relación a la matriz virgen.

Varias de las investigaciones de NC poliméricos, se han realizado con plaquetas como materiales nanoestructurados. De los cuales, varios se han realizado con arcillas de la familia de los filosilicatos debido a sus características físicas, a lo práctico de su procesamiento y al bajo costo que representan frente a otros materiales nanoestructurados.

Así pues la denominación del material reportado en este estudio sería, nanocompuesto laminar de matriz polimérica, ya que el componente nanoscópico utilizado es la arcilla montmorillonita.

La montmorillonita tiene una estructura laminar sólida bidimensional que posee átomos firmemente ligados entre sí en dos direcciones del espacio formando láminas (planos) y débilmente ligados en la dirección perpendicular a estas láminas. La región de interacción débil, entre las láminas, se conoce normalmente como espacio interlaminar o galería.

Cuando las láminas son eléctricamente neutras, la región interlaminar se encuentra con los iones metálicos hidratados (sin moléculas orgánicas) y las láminas adyacentes están en contacto a través de interacciones del tipo Van der Waals. Moléculas neutras pueden ser incorporadas entre las láminas formando un derivado regularmente intercalado. Esta incorporación puede estar acompañada por una reacción de intercambio de cationes entre la molécula y la lámina.

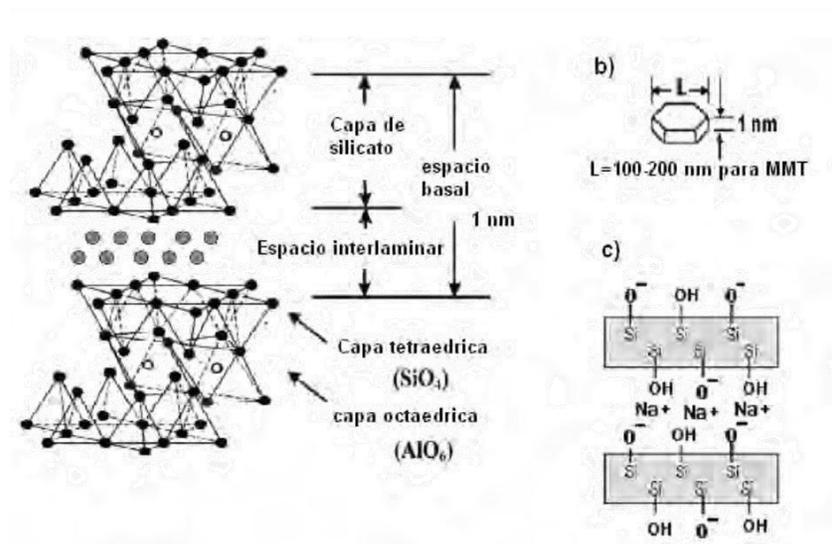


Figura 1.35. Panel de PUR en sistema de tejido

Las distintos cambios en las propiedades por la intercalación de elementos en el espacio interlaminar son muchos y distintos. Cuando se mezcla la arcilla laminar con el polímero, se pueden formar distintas estructuras en relación a su acomodo. Una forma sería la formación de tactoides, que consiste en las láminas aglomeradas de la arcilla sin que se presente una intercalación. Otra forma sería la de intercalación del polímero y la arcilla, en la cual, el espacio interlaminar aumenta. Puede darse el caso en que las laminillas de la arcilla se encuentran dispersas en la matriz polimérica al azar, a este estado se le llama exfoliado.

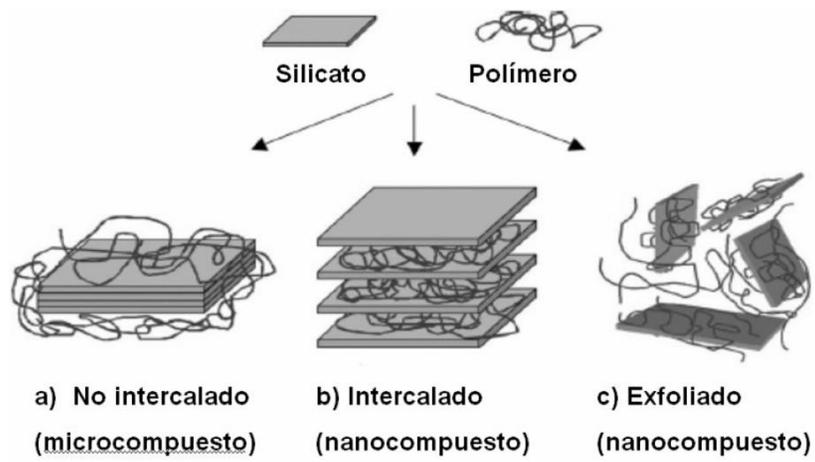


Figura 1.36. Intercalación silicato polímero.

CAPÍTULO DOS

EXPERIMENTACIÓN

2.1 MATERIALES

- Componente "A". Poliéterpoliol de Poliformas Plásticas, S.A. de C.V.
Viscosidad (CPs) 620±50
Densidad aparente (kg/m³) 22-25
% Celdas Cerradas 90-95
- Componente "B". Difenilmetil 4,4-diisocianato (MDI) de Poliformas Plásticas, S.A. de C.V.
Viscosidad (CPs) 200±50
Densidad aparente (kg/m³) 22-25
% Celdas Cerradas 90-95
- Arcilla montmorillonita (MMT), de Nanocor
Silicato de aluminio magnesio calcio hidratado
Fórmula Química (Mg Ca)O Al₂ O₃ Si₅ O₁₀ nH₂O
Estructura cristalina
Dureza: 1-2
Modulo de lámina de arcilla 170-190 Gpa
Espacio interlamilar 12 Å
Capacidad de intercambio catiónico de 135 meq/100g
160 g dan 60g en el tamiz No. 325

2.2 EQUIPO

- Tamizadora Meizer 11, modelo MEINZELII,
- Agitador rápido Caframo, modelo RZR1,
- Cronómetro (con precisión de 1 segundo),
- Termómetros con una precisión de 0,1°C,
- Balanza (precisión 0,1 g),

- Estufa, mca. Fisher Scientific,
- Recirculador mca Ficher Scientific FS220,
- Equipo de protección, mascarilla, gafas y guantes de seguridad,
- Flujometro,
- Extractor de humos,
- Sierra de cinta (para cortar las probetas) con aspiración en el banco, mascarilla con filtro de polvo para la persona que efectúa el aserrado,

2.3 PROCEDIMIENTOS

2.3.1 Preparación de la Espuma PUR pura y con MMT

Para la fabricación de la espuma rígida de poliuretano se mezclan por adición los dos componentes principales, el polioliol y el poliisocianato, y en su caso se adiciona MMT en distintas concentraciones al polioliol antes de mezclarlo con el poliisocianato para formar así el nanocompuesto.

Para lograr resultados óptimos en la fabricación de una espuma rígida de PUR deben cumplirse parámetros determinados (densidad, propiedades mecánicas, etc.), que están normadas.

La espuma al generarse es líquida, viscosa y realiza un movimiento tipo flujo que se traduce en una orientación de las celdillas, con la consecuente variación de las propiedades. La orientación de las celdillas puede reducirse con una densificación de la espuma, es decir, se introduce una cantidad de mezcla reaccionante mayor (sobredosificación) que la necesaria para espumar el molde. La cantidad de mezcla reaccionante se elige de tal modo que la espuma llene el molde antes del tiempo de hilo, solidificación y presente una densidad determinada. La densificación o sobredosificación se traduce en una considerable presión de la espuma, que tiene que absorberse con un material adecuado (en este caso un molde metálico rígido que evita su deformación) hasta que la espuma termina su reticulación, con el fin de mantener las dimensiones deseadas.

La cantidad total de la partida (C_p) o materia prima inicial se calcula tomando en cuenta el volumen (V) del molde a espumar, la densidad aparente media deseada, entre 30 y 40 Kg/m^3 (D_M), de la cantidad residual de mezcla reaccionante que queda en el recipiente (C_R) y de la diferencia de empuje (E) entre la mezcla reaccionante líquida y la espuma acabada (que es igual al peso del aire desplazado, aprox. 1,2 kg/m^3 a 20°C) así como de la pérdida de hinchante P_H ocurrida durante el mezclado y la expansión de la mezcla reaccionante.

$$C_p = V \times D_m + V \times E + C_R + P_H$$

TABLA 2.01. DATOS TEMPORALES DE LA ESPUMA RÍGIDA DE POLIURETANO

DATOS TEMPORALES		TIEMPO
Volumen del molde	V	0,00493763 m ³
Densidad aparente media deseada	D _m	35 kg/m ³
Diferencia de Empuje	E	1,2 kg/m ³
Cantidad residual en mezcladora**	C _R	0,09 kg
Pérdida de hinchante**	P _H	0,005 kg
Cantidad total de la partida	C _p	0,17919221 kg

** Hallada experimentalmente.

Por consiguiente, las cantidades para las siete distintas concentraciones serán:

TABLA 2.02. CONCENTRACIONES DE LAS DISTINTAS MUESTRAS

MUESTRA	CONTENIDO DE ARCILLA		COMPONENTE "A" (g) (POLIETERPOLIOL)	COMPONENTE "B" (g) (DIISOCIANATO)
	(% WT)	(g)		
PU	0	0	100.00	110.00
PU/MMT 2	2.0	4.00	100.00	110.00
PU/MMT 4	4.0	8.00	100.00	110.00
PU/MMT 6	6.0	12.00	100.00	110.00
PU/MMT 8	8.0	16.00	100.00	110.00
PU/MMT 10	10.0	20.00	100.00	110.00
PU/MMT 15	15.00	30.00	100.00	110.00
TOTAL		90.00	700	700

Donde, al componente B se le agregaron 10g debido al residuo que se pierde en el vaso de plástico.

Es necesario determinar experimentalmente los datos de tiempos en el proceso de producción de la espuma:

- El tiempo de mezclado o tiempo de agitación. Indica el tiempo necesario para lograr una mezcla homogénea.
- El tiempo de crema o tiempo de arranque es el tiempo transcurrido desde el inicio del mezclado de los reactivos hasta el inicio visible de la espumación de la mezcla. En muchos casos se aprecia por un evidente cambio de color.
- El tiempo de hilo indica la transición de la mezcla reaccionante del estado líquido a sólido. Equivale al punto de gel. Cuando se llega a este momento se calcula que la reacción ha alcanzado un grado de conversión del 50%. El tiempo de hilo se mide clavando repetidamente un palito de madera en la mezcla reaccionante, ya expandida, y retirándola de nuevo, se observa que el palo de madera arrastra hilos del material. Este tiempo se mide desde el mezclado.
- El tiempo de expansión y el tiempo de ausencia de pegajosidad. Una vez alcanzado el tiempo de hilo, la espuma modera su velocidad de expansión. El tiempo entre el inicio del mezclado y el final de la expansión visualmente apreciable se llama tiempo de expansión. Una vez finalizada la expansión de la espuma, su superficie continúa siendo pegajosa. El momento de ausencia de pegajosidad se determina tocando repetidamente la superficie de la espuma con una varilla de madera (o con el dedo). El tiempo transcurrido desde el inicio del mezclado hasta la ausencia de pegajosidad se llama tiempo de ausencia de pegajosidad.

Los tiempos de reacción dependen de la temperatura de los reactivos, es decir, de la mezcla reaccionante. A medida que aumenta la temperatura, los tiempos de reacción se acortan, por esta razón es que para formar las espumas se mantiene constante la temperatura de los reactivos para las distintas formulaciones.

TABLA 2.03. DATOS TEMPORALES ENCONTRADOS PARA LA ESPUMA RÍGIDA DE POLIURETANO

DATOS TEMPORALES		TIEMPO
El tiempo de mezclado o tiempo de agitación	T1	00:00:10
El tiempo de crema o tiempo de arranque	T2	00:00:35
El tiempo de hilo	T3	00:01:48
El tiempo de expansión y el tiempo de ausencia de pegajosidad	T4	00:03:49

2.3.1.1 Preparación de la arcilla MMT

La MMT se cribó con el tamiz no.325, durante dos horas para quitar impurezas y unificar el tamaño de la arcilla que se utilizaría en la experimentación.

2.3.1.2 Preparación del desmoldante

Se preparó una dispersión de MMT, previamente tamizada, en agua destilada a 10% en peso, con agitación mecánica por 24h a 600 rpm, para posteriormente usarla como desmoldante.

2.3.1.3 Procedimiento de fabricación de la espuma PUR

2.3.1.3.1 Preparación del molde. El molde es un elemento de acero inoxidable. El material fue elegido debido a la temperatura que debe soportar y a la presión por la espumación a la que se somete. Otros materiales no resisten esta presión.

Está constituido por dos partes, como se muestra en la Figura 2.01, en la parte superior, del cuerpo del molde, tiene un pequeño orificio que sirve para desalojar los gases producto de la reacción al formarse la espuma, que se tapa antes de que se derrame la mezcla. Durante la formación de la espuma fue necesario poner cuatro prensas al molde para que éste no sufriera ninguna deformación.

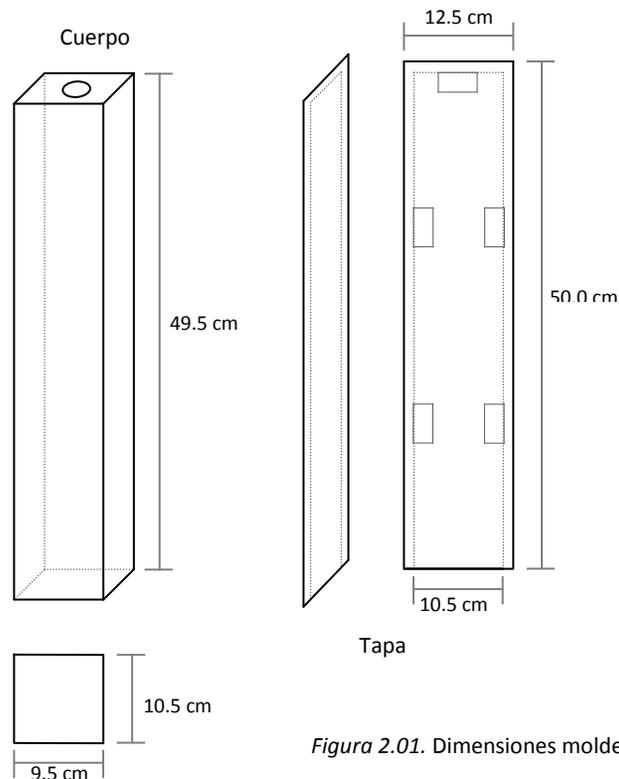


Figura 2.01. Dimensiones molde de acero.

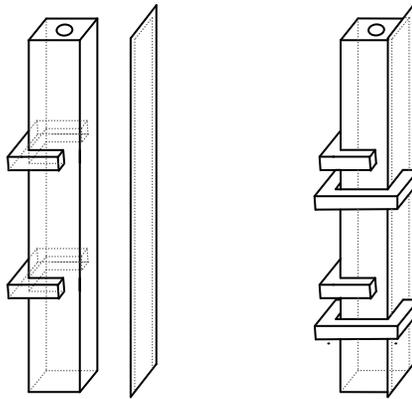


Figura 2.02. Molde de acero con prensas.

Para poder extraer de forma íntegra el elemento del cual se obtendrán las muestras y no alterar su estructura, fue necesario aplicar a las paredes interiores del molde un preparado de arcilla/agua destilada como desmoldante, su aplicación se hace con una brocha tratando de hacer una capa lo más uniforme posible y cubriendo todos los espacios interiores del molde.

La reacción de formación de poliuretanos es exotérmica (desprenden calor). Para mantener la velocidad de reacción en un nivel suficientemente alto, la cantidad de calor de reacción que se pierde a través de la superficie de la espuma debería ser pequeña. El vertido de la mezcla reaccionante sobre el material de la capa de cobertura o el material del molde debe realizarse con poca evacuación de calor. Por esta razón se pre-calentó el molde durante media hora a 50°C en la estufa, esta temperatura se calculó tomando en cuenta que se perdían aproximadamente 20°C en el traslado.

2.3.1.3.2 Preparación del polioli/MMT. Para poder hacer la dispersión de la arcilla MMT en el polioli; se pesa en un vaso de precipitados la cantidad total correspondiente de arcilla y se deshidrata en el horno a 120°C por el tiempo necesario hasta llegar a un peso constante. Se observó que se tiene un 25% de humedad en la arcilla y que el tiempo requerido va de 20 a 44 minutos para las concentraciones de 2 a 15 por ciento, respectivamente.

Posteriormente se pesa la cantidad requerida de arcilla y se le agregan los 100 g de polioli. Se mezcla por agitación mecánica, a baja revolución inicialmente evitando la pérdida de la arcilla, una vez integrada la arcilla con el polioli se aumenta la revolución y se mantiene estable durante quince minutos. Es importante que no queden restos de la mezcla pegados al agitador. Por ello se recomienda levantar el agitador en marcha de la mezcla para despedir por fuerza centrífuga los restos de materia prima que pudiera tener adherida. Posteriormente se somete durante 10 minutos a una agitación por ultrasonido.

2.3.1.3.3 *Obtención de la espuma de poliuretano.* Se pesa un vaso desechable, al que posteriormente se verterán los 110 g de poliisocianato y se hace el registro del peso. Es importante que la temperatura del polioli/MMT y poliisocianato de los vasos, se ajuste a una temperatura de $27^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Para ello se sumerge brevemente el vaso repetidas veces en el recipiente de agua a temperatura constante, al mismo tiempo que se tapa con plástico y agita, evitando que el contenido de los vasos entre en contacto con el agua, en este caso se opto por tapar con plástico.

Al vaso de plástico con la mezcla de polioli/MMT se adiciona la cantidad de poliisocianato que exige la formulación, procedente del segundo vaso de plástico. Se sumerge la varilla del agitador mecánico en la mezcla y se enciende, durante la homogenización deberá aumentarse paulatinamente la velocidad de giro del agitador con el fin de evitar que la mezcla salga despedida fuera del vaso, después se ajusta el giro a 2500 rpm. Al mismo tiempo que se sumerge el agitador se pone en marcha el cronómetro. El tiempo de agitación es de 10s. La mezcla reaccionante debe introducirse en el molde, con ayuda de unas espátulas plásticas, de tal manera que se distribuya uniformemente en el fondo del molde, evitando con esto la sobrelaminación, verificando que no haya cúmulos de aire. El orificio de desaireación de la parte superior del molde se tapa manualmente una vez que la espuma lo alcance, de este modo se evitarán las oclusiones de aire en la espuma.



Figura 2.03. Desarrollo de la espuma de poliuretano.

Posteriormente al vaciado será necesario pesar los dos vasos desechables que contenían los componentes para obtener la cantidad de desperdicio.

A continuación del vaciado de la mezcla se coloca el molde en el horno de forma vertical 40°C por 24 hrs, para que la temperatura de la mezcla reaccionante no varíe después del vertido y no se le extraiga calor del núcleo de la espuma en formación. Posteriormente se saca de la estufa y se deja 12 hrs a temperatura ambiente, antes de desmoldar la espuma se deja otras doce horas fuera del molde previas al corte.

Se decidió estudiar el núcleo de la espuma, es decir se cortaron las orillas que son más densas y que conservan la arcilla producto del desmoldante en su superficie.

2.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

2.4.1 Prueba de Inflamabilidad

Para la realización de esta prueba fue necesario fabricar las piezas, armar y operar el sistema de quemado de acuerdo a las siguientes normas:

2.4.1.1 Diseño de la chimenea y características de las muestras.

Para ambos se utilizó la misma norma ASTM D3014-04a Standard Test Method for Flame Height, Time of Burning, and Loss Mass of Rigid Thermoset Cellular Plastics in a Vertical Position. Proporciona las dimensiones de la chimenea así como las características de los especímenes de prueba que son mínimo seis con dimensiones 254 x 19 x 19 mm, de igual densidad y limpias. Se obtuvieron de la parte central de la probeta general, se quitaron las orillas más densas.

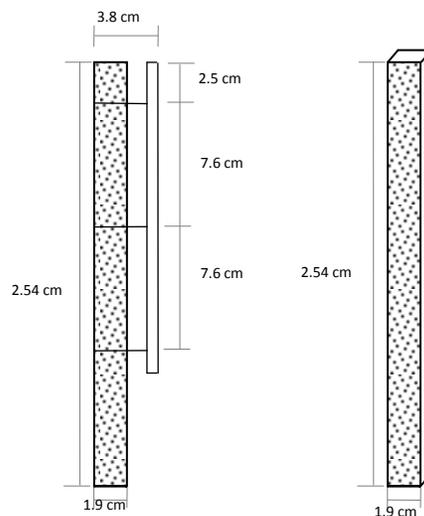


Figura 2.04. Especímenes de prueba.

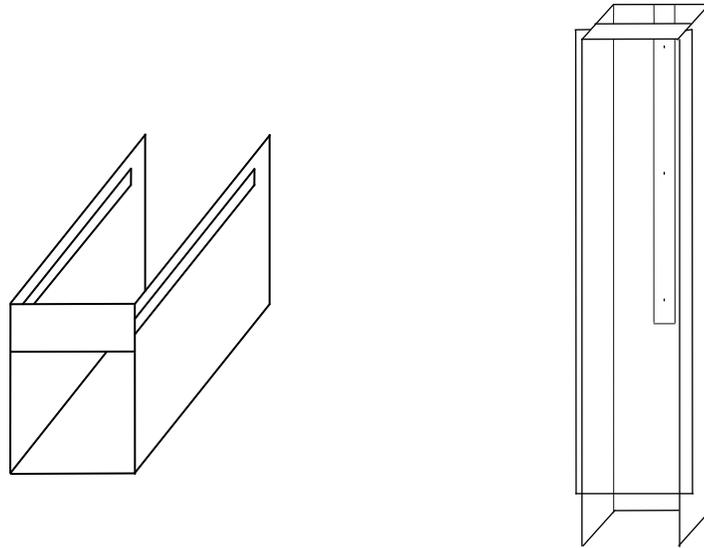


Figura 2.05. Chimenea para pruebas de fuego.

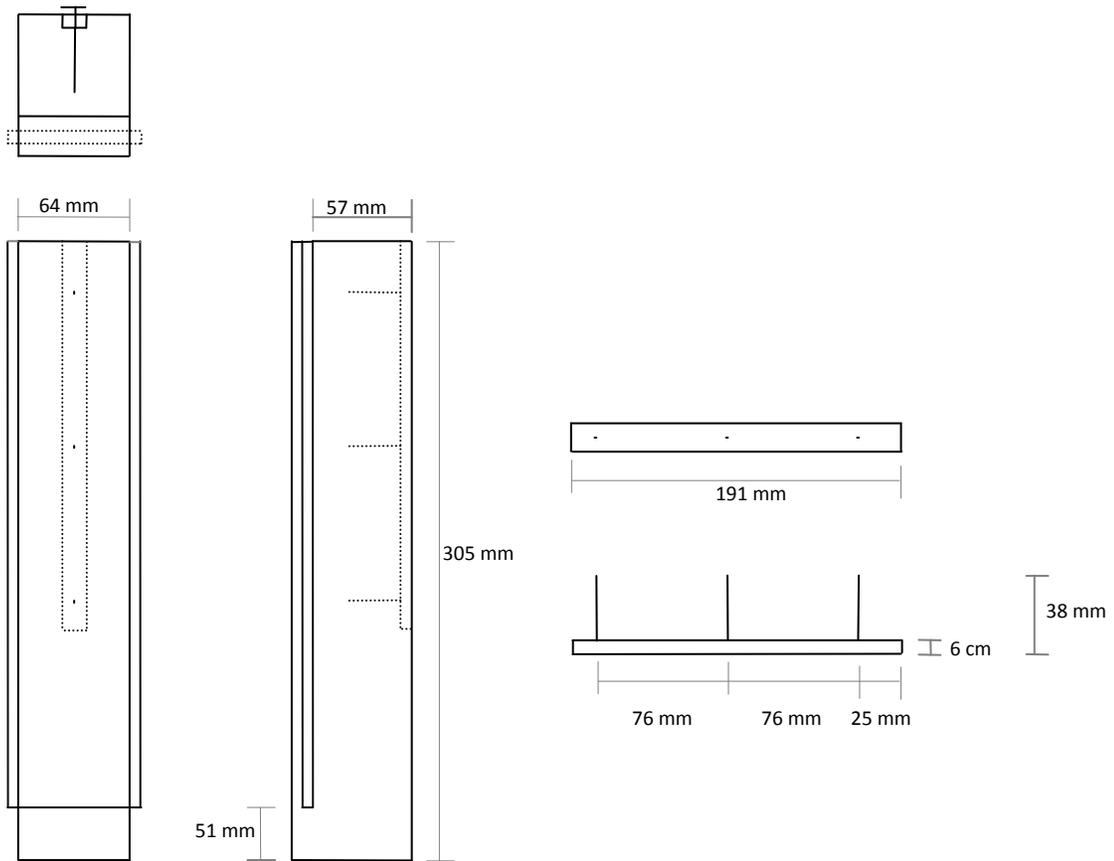


Figura 2.06. Dimensiones chimenea, pruebas de fuego.

2.4.1.2 Determinación de la densidad aparente.

ASTM D1622-98 Standard Test Method for Apparent Density of Rigid Cellular Plastics.

De acuerdo con la norma se necesitan cinco especímenes como mínimo y que no sean mayores a 16.4 cm³. Los especímenes utilizados para determinar la densidad fueron los utilizados para las pruebas mecánicas.

2.4.1.3 Diseño del mechero.

ASTM C for Laboratory Burner Used for Small Scale Burning Tests on Plastics Materials.

En relación a las especificaciones que presenta esta norma fue que se adecuó un mechero presentando las características necesarias.

2.4.1.4 Calibración de la flama.

ASTM D5207-03 Standard Practice for Confirmation of 20mm (50 W) and 125 mm (500W) Test Flames for small- Scale Burning Test on Plastics Materials Significance and Use.

Esta norma sirve para poder determinar las características de la flama en a prueba, calibrar el flujómetro y las llaves de paso del gas.

2.4.1.5 Procedimiento de medición

- Se determinar la densidad del espécimen, según la norma ASTM D1622-98.
- Se obtiene la masa del espécimen a ensayar, M.
- Se mide la masa del soporte del espécimen, S₁.
- Se ajusta la flama del mechero a una distancia de 25 mm del espécimen, con ello la temperatura en la superficie del cono de la flama queda en 960±5°C.
- Se inserta el espécimen en el soporte. Tratando de afectar lo menos posible la estructura de la espuma, siendo cuidadosos en la parte donde se insertan los clavos.
- Se introduce el soporte con la espuma por la parte superior de la chimenea, se alinea verticalmente y se asegura con un gancho.
- Realizados los pasos anteriores se procede a acercar la flama al espécimen, activando al mismo tiempo el cronometro

- Se somete al fuego del mechero durante 10s y se retira el mechero.
- El tiempo se sigue tomando hasta que el fuego en la espuma se sofoque, este será el tiempo T_e .
- Durante el proceso de combustión se tendrá apagada la campana de extracción, pero la ventana se mantendrá cerrada evitando que salga los gases. Después de determinar el tiempo T_e , se deja cinco minutos prendida la extracción de aire.
- Libre de humos tóxicos se retira el soporte con la muestra quemada de la chimenea tratando de afectar lo menos posible el resultado, y se procede a tomar nuevamente su masa, s_2 .
- Posteriormente se determina el porcentaje de masa retenida (PMR) que se calcula con la siguiente ecuación:

$$PMR = \left[\frac{s_2 - s_1}{M} \right] \times 100$$

2.4.2 Prueba Mecánica

La prueba mecánica se hizo haciendo uso de las especificaciones presentadas en la norma ASTM D1621-00 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics. Utilizando la máquina de tensión universal INSTRON W5500 Microtester, con una velocidad de cruceta de 2.95 mm/min, a temperatura ambiente y humedad del 50%. Las dimensiones de los especímenes fueron de 100x100x30 mm, los cuales se mantuvieron en condiciones ambientales durante 24 hrs. El número mínimo requerido en la norma es de cinco especímenes, en este trabajo se ensayaron seis muestras.

2.4.3 Análisis Termogravimétrico(TGA)

El análisis termogravimétrico es una técnica que mide la variación de masa en un compuesto en función de la temperatura. Las variaciones de temperatura no siempre implican un cambio en la masa de la muestra; existen sin embargo cambios térmicos que sí se acompañan de un cambio de masa, como la descomposición, la sublimación, la reducción, la absorción y la vaporización. Este análisis se realizó empleando un TGA 2950 Thermogravimetric Analyzer, TA Instruments, en ambiente de nitrógeno, con un rango de calentamiento de temperatura ambiente hasta 700°C y una rampa de calentamiento de 20°C/min.

CAPÍTULO TRES

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE INFLAMABILIDAD DE LAS ESPUMAS

Lo primero que se determinó fue la densidad con base en la norma ASTM D1622-98. Posteriormente se obtuvo el tiempo de ignición, que se determina cuantificando el tiempo al que se somete al polímero a la energía calorífica de la flama del mechero hasta que se extingue por completo el fuego del espécimen. Se calculó el porcentaje de masa retenida, que es la diferencia de la masa de la muestra obtenida después del quemado y la masa del soporte, e inversamente proporcional a la masa inicial, multiplicada por cien. Este parámetro lo que indica es la cantidad de masa restante posterior a la combustión. Para poder determinar la efectividad del retardante de fuego se debe mantener la mayor cantidad de masa. A continuación se muestran las Tablas y la discusión de los resultados obtenidos. En la Tabla 3.01 se dan los datos obtenidos de las muestras del núcleo de la espuma:

TABLA 3.01. DENSIDAD			
MUESTRA	MEDIA (KG/M3)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (KG/M3)	DIFERENCIA (%)
PU	29.42	±0.39	
PU-MMT 2pcr	30.68	±0.45	4.30
PU-MMT 4pcr	32.84	±0.73	11.61
PU-MMT 6pcr	33.44	±0.74	13.66
PU-MMT 8pcr	33.86	±0.29	15.11
PU-MMT 10pcr	34.26	±0.20	16.45
PU-MMT 15pcr	35.82	±0.77	21.76

Conforme se agregaba una mayor cantidad de arcilla la densidad de la espuma aumenta en general. El objetivo al determinar la densidad de las muestras es: tener constancia que se tiene la densidad requerida para aplicaciones en la construcción y tener especímenes con características semejantes. Realizar el corte homogéneo es uno de los procedimientos clave, ya que si hay diferencia en las dimensiones de las muestras, la densidad puede variar. En este trabajo se puso especial atención, en la limpieza de los especímenes porque también influye en los resultados de las pruebas de retardancia a la flama.

En los resultados de la Tabla 3.02, Grafica 3.01, se puede notar que el tiempo de ignición aumentó con la adición del la arcilla, con excepción de la muestra PU-MMT 8pcr en la que el tiempo de combustión se redujo 3.74 % con respecto a la espuma virgen.

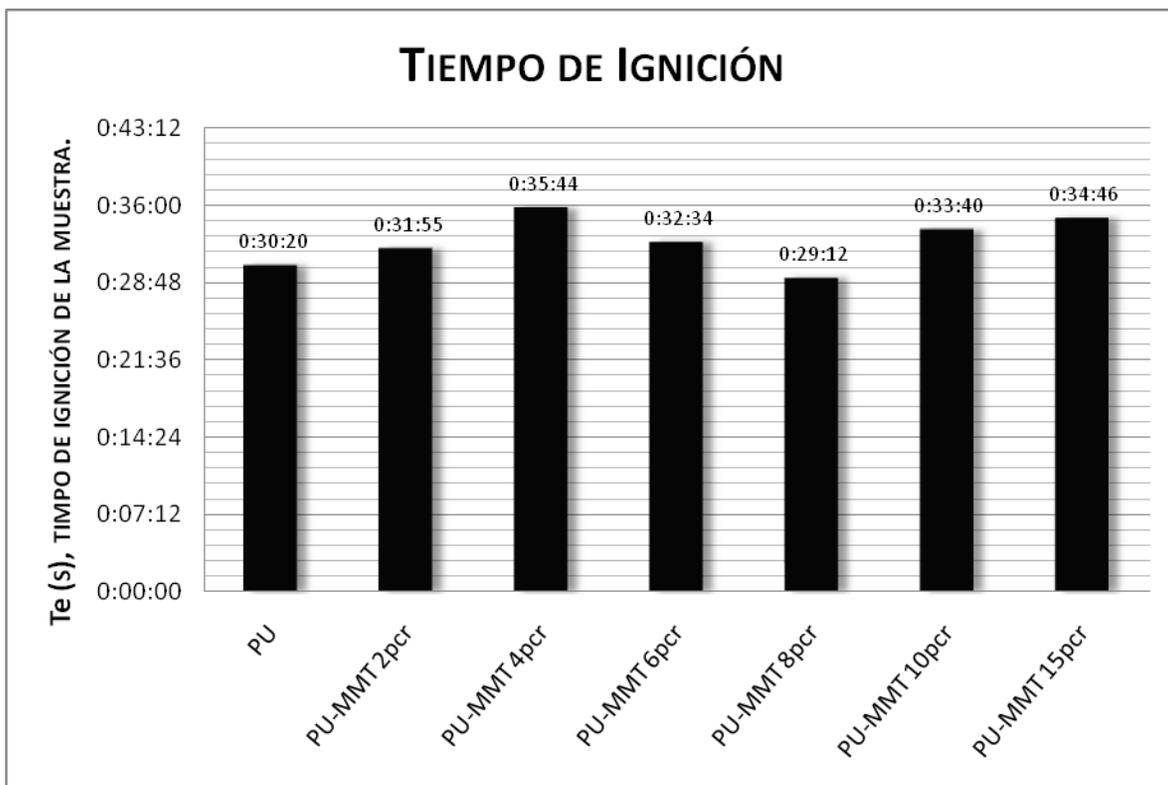
Al observar el porcentaje de masa retenida, ver Tabla 3.03, Gráfica 3.02, para la misma muestra es mayor un 69.38 % comparada con la espuma virgen. Como se muestra en la gráfica conforme se aumentó la cantidad de arcilla, se retuvo mayor cantidad de masa, justo lo que se pretendía con este trabajo. Es decir, si el combustible utilizado es menor, a pesar de que el tiempo de ignición haya sido mayor, la energía liberada durante ese tiempo es menor. Si se piensa en un incendio aunque el material este quemándose un mayor tiempo, si la llama no es lo suficientemente fuerte, se desprende menos energía.

De acuerdo a los resultados presentados se puede concluir que si a una espuma de poliuretano se le agrega 8pcr de arcilla montmorillonita se tendrá menor consumo de material y menor desprendimiento de calor.

TABLA 3.02. TIEMPO DE IGNICIÓN, T_E			
MUESTRA	MEDIA (s)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (s)	DIFERENCIA (%)
PU	0:30:20	± 0:01:53	---
PU-MMT 2pcr	0:31:55	± 0:04:38	5.22
PU-MMT 4pcr	0:35:44	± 0:03:39	17.80
PU-MMT 6pcr	0:32:34	± 0:01:26	7.33
PU-MMT 8pcr	0:29:12	± 0:00:41	-3.74
PU-MMT 10pcr	0:33:40	± 0:03:37	10.97
PU-MMT 15pcr	0:34:46	± 0:04:48	14.60

Estas muestras y su caracterización, se repitieron para verificar los resultados.

GRÁFICA 3.01

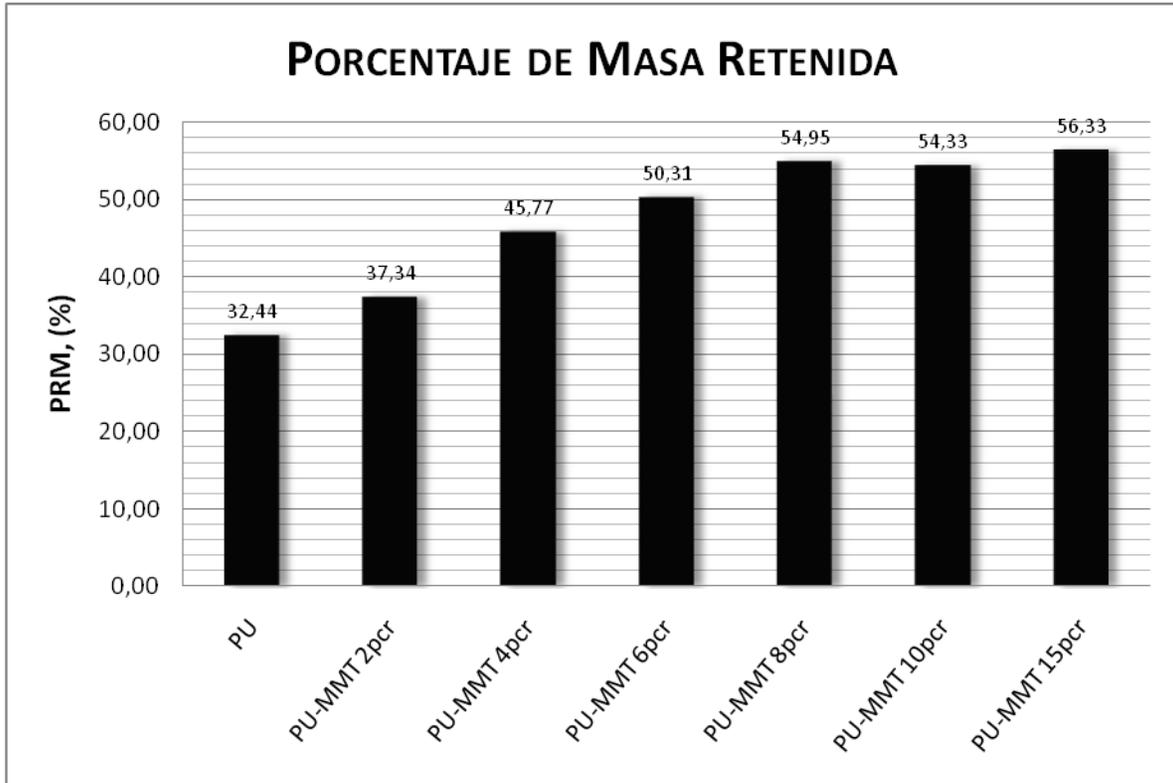


Los resultados obtenidos fueron de muestras, que no presentaban recubrimiento de ningún tipo.

TABLA 3.03. PORCENTAJE DE MASA RETENIDA, PMR

MUESTRA	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	DIFERENCIA (%)
PU	32.44	± 1.42	-----
PU-MMT 2pcr	37.34	± 2.55	15.08
PU-MMT 4pcr	45.77	±1.68	41.06
PU-MMT 6pcr	50.31	±0.84	55.07
PU-MMT 8pcr	54.95	±0.97	69.38
PU-MMT 10pcr	54.33	±2.17	67.47
PU-MMT 15pcr	56.33	±0.71	73.62

GRÁFICA 3.02



Por otra parte, se hizo un experimento con dimensiones 254 x 19 x 19 mm sin quitarles la superficie que integro con la arcilla del desmoldante, es decir, con probetas que conservan un recubrimiento pequeño de arcilla, no del núcleo de la espuma. Los valores obtenidos son distintos ya que la arcilla forma una barrera que impide que se comience a quemar, siendo esta más eficiente que la capa entumeciente de carbón. La costra de la espuma con recubrimiento de arcilla no permite el paso de los vapores para que comience la reacción de combustión. Estupendamente se conserva prácticamente toda la masa para la espuma con 0, 8 y 15 pcr de arcilla.

TABLA 3.04. MUESTRAS CON RECUBRIMIENTO DE ARCILLA

MUESTRA	M(g)	S ₁ (g)	T _e (s)	S ₂ (g)	PMR [(S ₁ S ₂)/M]*100
PU	9.35	38.40	00:25:62	47.38	96.04
PU/MMT 8 pcr	11.65	38.40	00:26:39	49.56	95.79
PU/MMT 15 pcr	12.71	38.36	00:27:66	50.54	95.83

Con ello puede concluirse que pueden aprovecharse las propiedades de la superficie de la espuma y utilizarla para controlar el fuego, con la adición de arcilla en el desmoldante.

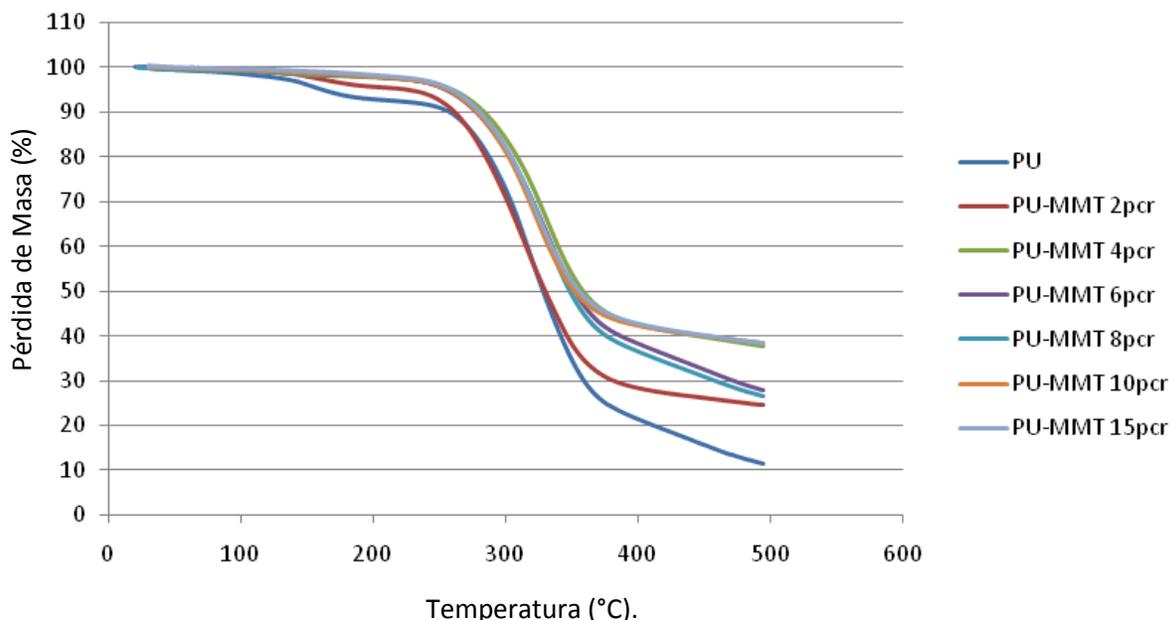
3.2 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE ESTABILIDAD TÉRMICA

Los resultados del estudio de estabilidad térmica se presentan como un porcentaje de pérdida de masa en función de aumento de la temperatura en las gráficas. En los resultados se observa que para 500°C el comportamiento de degradación se presenta en un paso, para objeto de este estudio se optó por hacer el análisis de la temperatura correspondiente al 50 por ciento de la descomposición del material. De las muestras analizadas se observa que la temperatura de descomposición de la espuma de PU a partir de 4pcr de montmorillonita es superior 25°C promedio y se estabiliza, que la espuma PUR sin arcilla.

La degradación térmica implica cambios en el peso molecular del polímero y cambios en las propiedades, como pueden ser la reducción de ductilidad, cambios de color, propiedades mecánicas y la reducción en general de la mayoría de las propiedades físicas deseables. La descomposición de las espumas se afectó incorporando arcilla nanoestructurada, lo que significa que ejerce un efecto estabilizador en contra de la descomposición.

MUESTRA	PÉRDIDA DE MASA, %	TEMPERATURA, °C
PU	50,00	328,36
PU-MMT 2pcr	50,00	330,03
PU-MMT 4pcr	50,00	358,60
PU-MMT 6pcr	50,00	352,01
PU-MMT 8pcr	50,00	348,39
PU-MMT 10pcr	50,00	352,30
PU-MMT 15pcr	50,00	355,38

GRÁFICA 3.03

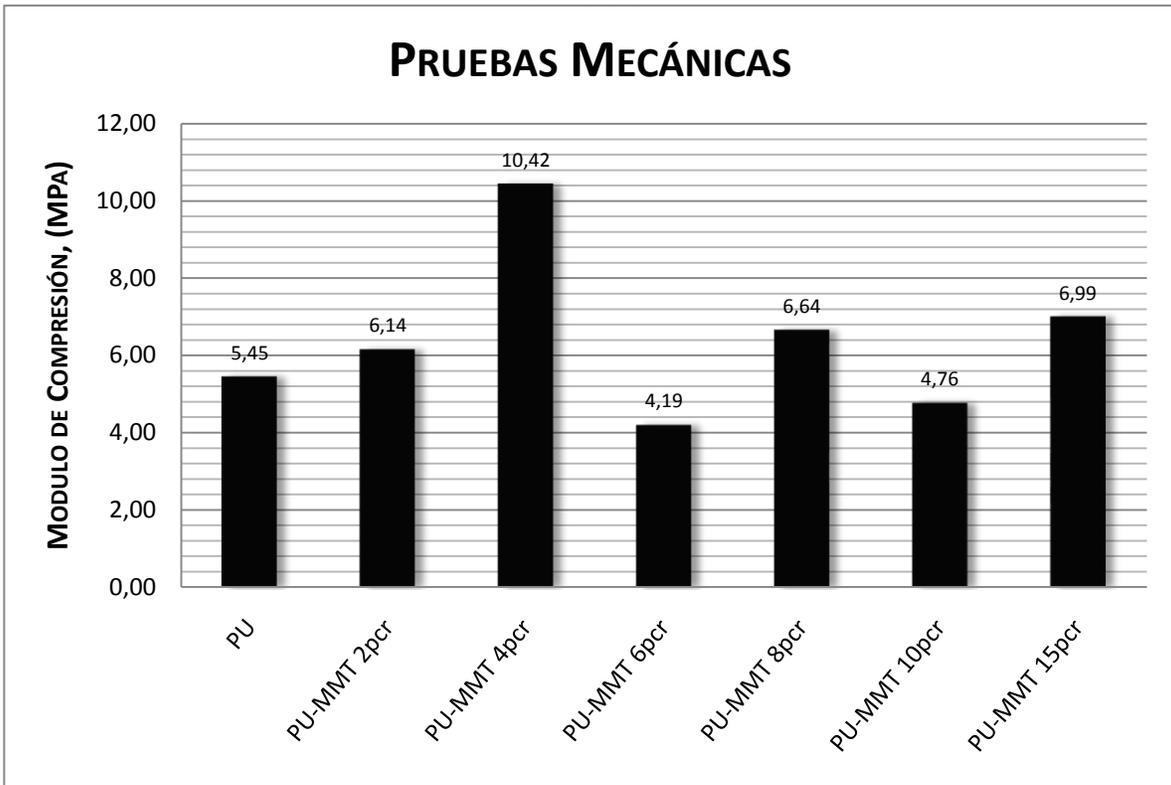
DSC-TGA**3.3 EVALUACIÓN DE LAS PRUEBAS MECÁNICAS**

Los resultados de las curvas de tensión deformación de la prueba de compresión de las espumas de poliuretano se muestran en la Tabla 3.06 y en las Gráficas 3.04 y 3.05. Los resultados muestran las tres etapas de la deformación; comportamiento lineal inicial, región de fluencia y finalmente la deformación. La pendiente inicial se utiliza para calcular el módulo de compresión de la espuma y el punto de intersección entre la pendiente inicial y el punto máximo de esa curva se utiliza para calcular la resistencia a la compresión. Se observa que tanto el módulo de compresión y la fuerza de compresión son superiores en la mayoría de las muestras con nanopartículas. Al aumentar un cuatro por ciento de nanopartículas a la espuma de PU su módulo de compresión aumenta un 91.28 % y la fuerza de compresión a 32.11%, los valores correspondientes para 8pcr son de 22.00% y 49.95% respectivamente. Para PU-MMT 10pcr son de alrededor de 28.37% y 7.78%. Sin embargo en las muestras de 6 y 10pcr el modulo de compresión disminuyo y la fuerza de compresión también disminuyo en las muestras de 2 y 6pcr, los valores se presentan en la Tabla 3.06. Esta diferencia en los resultados se puede deber a la dispersión de la arcilla dentro de la espuma.

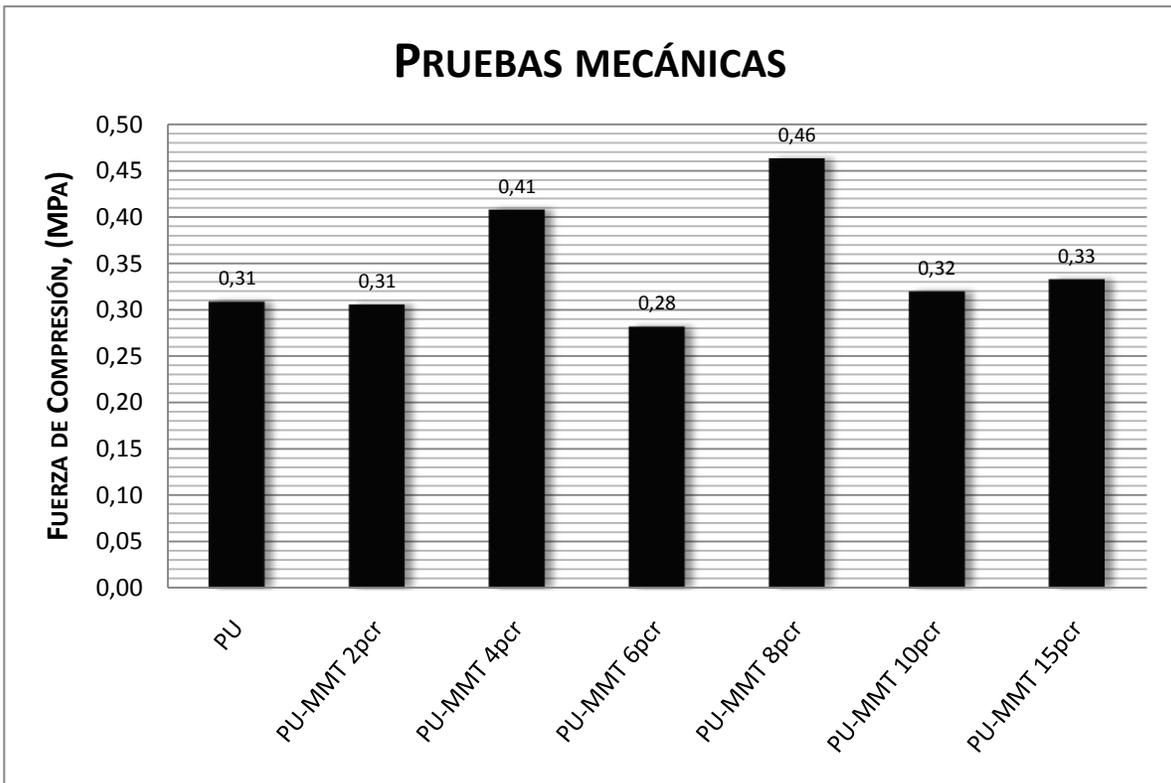
Así, puede decirse que el comportamiento del rendimiento de la espuma de poliuretano puede ser mejorado o en su caso, no afectado, debido a la incorporación de nanopartículas, como lo muestran en los resultados de las pruebas.

TABLA 3.06. RESULTADOS PRUEBAS MECÁNICAS, COMPRESIÓN							
MUESTRA	ENSAYO	MODULO DE COMPRESIÓN (MPa)			FUERZA DE COMPRESIÓN (MPa)		
		VALOR	MEDIA	DIFERENCIA (%)	VALOR	MEDIA	DIFERENCIA (%)
PU	1	5.56	5.45	----	0.36	0.31	----
	2	5.40	± 0.10		0.29	± 0.05	
	3	5.38			0.27		
PU-MMT 2pcr	1	6.41	6.14	12.77	0.34	0.31	-0.97
	2	6.84	± 0.86		0.30	± 0.03	
	3	5.17			0.28		
PU-MMT 4pcr	1	10.04	10.42	91.28	0.43	0.41	32.11
	2	10.80	± 0.38		0.41	± 0.02	
	3	10.41			0.39		
PU-MMT 6pcr	1	3.14	4.19	-23.02	0.26	0.28	-8.65
	2	4.17	± 1.06		0.28	± 0.02	
	3	5.27			0.31		
PU-MMT 8pcr	1	7.09	6.64	22.00	0.48	0.46	49.95
	2	4.94	± 1.53		0.44	± 0.02	
	3	7.90			0.47		
PU-MMT 10pcr	1	5.47	4.76	-12.64	0.37	0.32	3.57
	2	5.94	± 1.66		0.33	± 0.06	
	3	2.85			0.25		
PU-MMT 15pcr	1	6.86	6.99	28.37	0.37	0.33	7.78
	2	7.67	± 0.40		0.33	± 0.4	
	3	6.67			0.30		

GRÁFICA 3.04



GRÁFICA 3.05



CONCLUSIONES

El objetivo general del trabajo de investigación fue logrado al encontrar una metodología para obtener una espuma rígida de poliuretano con arcilla nanoestructurada. Se estudiaron el tiempo que tarda en apagarse y la masa retenida después de aplicarle una fuente calorífica, así como la propiedad mecánica de compresión de la espuma rígida de poliuretano con la adición de arcilla al 2, 4, 6, 8, 10 y 15 pcr.

Los estudios de resistencia al fuego con la metodología de la norma ASTM D3014-04a mostraron que la MMT mejora las propiedades de retardancia de fuego del material. Los resultados permiten concluir que la arcilla ejerce un efecto de barrera al formar una capa de carbón que no permite el paso de los vapores combustibles. El aumento del contenido de arcilla provoca un aumento del porcentaje de masa retenida. Se encontró que la adición de MMT no afecta el tiempo de ignición pero hay una mayor cantidad de masa retenida, siendo la muestra de 8pcr la que retuvo una mayor cantidad de masa.

La adición de MMT a la espuma rígida afecta las propiedades mecánicas siendo la de 4pcr la de mayor modulo de compresión, cabe hacer notar que en este estudio las muestras que se sometieron a prueba fueron de la parte central de la espuma, retirando las paredes más densas, tratando de uniformizar las muestras a ensayar.

En el análisis termogravimétrico se observa que la temperatura de descomposición de la espuma PUR con montmorillonita a partir de 4pcr es superior a la espuma PUR sin arcilla.

Un hallazgo interesante fue que al aplicarse la arcilla como un recubrimiento, actúa directamente como una barrera contra el fuego, que impide al fuego tener contacto con el polímero. La arcilla dispersa en este caso no modifica la propiedad de la espuma, sino que es suficiente con el recubrimiento.

REFERENCIAS

- ¹ “Los plásticos en 2007” Plastics Europe Association of plastics Manufactureers, Bruselas, octubre 2008.
- ² “Beneficios del aislamiento térmico en la industria” Comisión nacional para el ahorro de energía, Secretaria de energía, México, Abril 2008.
- ³ J. M. Buist, H. Gundgeon , *Advances in Polyurethan Technology*, Ed. Wiley, Nueva York, 1968.
- ⁴ K. Ashida, *Polyurethane and related foams*, Ed. Taylor & Francis, Estados Unidos de América, 2007.
- ⁵ Center for the Polyurethanes Industry of the American Chemistry Council, <http://www.polyurethane.org>
- ⁶ M. Okamoto, *Polymer/Clay Nanocomposites*. *Enciclopedia of Nanoscience and Nanotechnology* , Ed. H. S. Nalwa, American Scientific Publishers, vol 8, 2004.
- ⁷ J. W. Gilman, Kashiwagi T. *Polymer-clay nanocomposites* , Ed .Pinnavaia T. J. and Beall G. W), Baffins Lane, 2000.
- ⁸ “Plásticos, trabajar por un futuro sostenible”, Asociación Europea de Productores de Plástico, Bruselas, 2000.
- ⁹ United Nations Framework Convention on Climate Change, <http://unfccc.int/2860.php>
- ¹⁰ “Energy consumption by sector 2005”, International Energy Association, 2005.
- ¹¹ “Insulation for sustainability” Federation of European Rigid Polyurethane Foam Associations,
- ¹² “Construcción y edificación: aislamiento perfecto para nuestros hogares” , Plastics Europa Ibérica, Spain, 2008.
- ¹³ J. Karter Michael, *Fire Loss in the United States 2007*, National Fire Protection Association, Agosto 2008
- ¹⁴ S. Bourbigot, S. Duquesne, C. Janna, *Macromol. Symp*, 2006, **233**, 180-190.

- ¹⁵ G. E. Zikov, S. M. Lomakin, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2002, **86**, 2449-2462.
- ¹⁶ Gy. Marosi, P. Anna, A. Márton, Gy. Bertalan, A. Bóta, A. Tóth, M. Mohai, I. Tács, *Polym. Adv. Technol.*, 2002, **13**, 1103-1111.
- ¹⁷ H. Zhang, Y. Wang, Y. Wu, L. Zhang, J. Yang, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2005, **97 (3)**, 844-849.
- ¹⁸ M. Sepehr, L. Utracki, X. Zheng, C. A. Wilkie, *Polymer*, 2005, **46**, 11569-1581.
- ¹⁹ J. Q. Wang, W. K. Chow, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2005, **97**, 366-376.
- ²⁰ F. G. R. Filho, T. J. A. Mélo, M. S. Rabello, S. M. L. Silva, *Polym. Degrad. Stab.*, 2005, **89**, 383-392.
- ²¹ T-K. Chen, Y-I. Tien, K-H Wei, *Polymer*, 2000, **41**, 1345-1353.
- ²² X. Cao, L. J. Lee, T. Widya, C. Macosko, *Polymer*, 2005, **46**, 775-783.
- ²³ Z. Xu, X. Tang, A. Gu, Z. Fang, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2007, **106**, 439-447.
- ²⁴ S. Bourbigot, S. Duquesne, *J. Meter. Chem.*, 2007, **17**, 2283-2300.
- ²⁵ W. J. Seo, Y. T. Sung, S. B. Kim, Y. B. Lee, K. H. Choe, j. Y. Sung, W. N. Kim, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2006, **102**, 3764-3773.
- ²⁶ X. Dai, J. Xu, X. Gou, Y. Lu, D. Shen, N. Zhao, X. Luo, X. Zhang, *Macromolecules*, 2004, **15**, 5615-5623.
- ²⁷ X-C. Bian, J-H. Tang, Z-M. Li, Z-Y. Lu, A. Li, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2007, **104**, 3347-3355.
- ²⁸ L. Song, Y. Hu, Y. Tang, R. Zhang, Z. Chen, W. Fan, *Polym. Deg. Stab.*, 2005, **87**, 111-116.
- ²⁹ J. Zhang, C. A. Wilkie, *Polym. Deg. Stab.*, 2003, **80**, 163-169.
- ³⁰ M. M. Hirschler, *Polym. Adv. Technol.*, 2008, **19**, 521-529.
- ³¹ H. Horacek, S. Pieh, *Polym. Int.*, 2000, **49**, 1106-1114 .
- ³² J. Michael, Jr. Karter., Fire analysis and research division, NFPA, 2008.
- ³³ NFPA 921 Fire and Explosion Investigations, vol 15, guide 2004.
- ³⁴ NFPA901 Standard Classifications for incident Reporting and fire protection, vol 15, 2001.
- ³⁵ E. Meyer. *Chemistry of Hazardous Materials*, 2a Ed., A Brady Book, New Jersey 1989.
- ³⁶ A.H. Buchanan. *Estructural Desing for Fire Safety*, John Wiley & Sons Ltd., England 2001.
- ³⁷ Pitts, Sissom Drysdale 1998
- ³⁸ NFPA 801 Failities handling Radioactive Materials 2003, Vol 9.
- ³⁹ Comunicación, Evaluación y Prevención de Emergencias, capitulo 4, Normas Técnicas Complementarias para el Proyecto Arquitectónico del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal,

- ⁴⁰ NFPA 53 Oxygen –Enriched Atmospheres 2004, Vol14.
- ⁴¹ NMX-S-044-1987. Seguridad tecnología del Fuego Terminología
- ⁴² NOM-154-SCFI-2005, Equipos Contra Incendio-Extintores-Servicio de Mantenimiento y Recarga
- ⁴³ NOM-002-STPS-2000, Condiciones de Seguridad, Prevención, Protección y Combate de Incendios en los Centros de Trabajo.
- ⁴⁴ Communication of the Commission with Regard to the Interpretative Documents, No C 62/1, 1994.
- ⁴⁵ NFPA, Industrial Fire Hazards Handook, 3a Ed.,
- ⁴⁶ Fundación MAPFRE, Recuperación y Salvamento en Siniestros de Incendio, ITSEMAP, España 1985.
- ⁴⁷ R. Bayon, la Protección Contra Incendios en la Construcción, Editores Técnicos Asociados, S.A., Barcelona 1978.
- ⁴⁸ NFPA 550 Guia del Arbol de Desiciones para la Seguridad Contra Incendios 2002
- ⁴⁹ Arnal S. L., Betancourt S. M. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, comentado. 5ª ed. Trillas, pags. 261-275.
- ⁵⁰ NFPA 220 Types of Buiding Construction 2006, Vol 7.
- ⁵¹ NFPA 1141 Planned Building Groups 2003, Vol 11.
- ⁵² NMX-C-307 Edificaciones- Componentes - Resistencia al Fuego - Determinación
- ⁵³ Plastics Europe’s Market Research and Statistics Group, The Compelling Facts About Plastics 2007, Published in October 2008.
- ⁵⁴ Bruice P.Y. Química orgánica, 5a Ed. Pearson Education, Inc., pag. 1232-1261, México (2008).
- ⁵⁵ PlasticsEurope, The World in 2030, November 2007.
- ⁵⁶ Askeland D. R., The science and engineering of materials. 3rd ed, The PWS series in engineering, pag.449-481, Boston (1994)
- ⁵⁷ Cruz L. A., Plásticos y elastómeros. Polímeros y su asignación. SemMaaterials México.
- ⁵⁸ Grand A. F, Wilkie C.A. Fire retardancy of polymeric materials, Marcel Dekker, Inc., pag. 47-59, New York (2000).
- ⁵⁹ Hilado C. J.. Flamability handbook for plastics, 5a Ed., Technomic Publication Co., pag. 29-56, Lancaster (1998).
- ⁶⁰ Lyon R., Janssens M., Polymer flammability. Report No. DOT/FAA/AR- 05/14, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration Office of Aviation Research, Washington, DC. (2005).
- ⁶¹ Buist J, Gundgeon HM, editor. Advances in Polyurethan Technology. New York: John Wiley y Sons 1968

- ⁶² Center for the Polyurethanes Industry of the American Chemistry Council, <http://www.polyurethane.org>
- ⁶³ PNUMA, Manual del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la Capa de Ozono. Séptima edición 2006.
- ⁶⁴ S. Bourbigot, S. Duquesne, *Journal of Materials Chemistry*, 2007, **17**, 2283-2300
- ⁶⁵ G. E. Zaikov, S. M. Lomakin, Wiley Periodicals, Inc. *J Appl Polym Sci* 2002, **86**, 2449–2462
- ⁶⁶ B. Marosfo" i, Sz. Matko, P. Anna Gy. Marosi *Current Applied Physics* 2006, **6**, 259–261.
- ⁶⁷ Z. Wang, E. Han, W. Ke, W. Periodicals, Inc. *J Appl Polym Sci* 2007, **103**, 1681–1689.
- ⁶⁸ L. Songa, Y. Hua, Y. Tanga, R. Zhanga, Z. Chena, b, W. Fan, *Polymer Degradation and Stability* 2005, **87**, 111-116
- ⁶⁹ NOM-018-STPS-2000. Sistema para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo.
- ⁷⁰ Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012. Eje cuatro, Sustentabilidad Ambiental. Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, Presidencia de la Republica 2007.
- ⁷¹ CONAVI. Criterios e indicadores para desarrollos habitacionales sustentables. Febrero 2008.
- ⁷² Pitts, Sissom Drysdale 1998
- ⁷³ CONAVI. Programa Especifico para el Desarrollo Habitacional Sustentable ante el Cambio Climático, primera edición 2008.
- ⁷⁴ Saving Energy in Buildings through Thermal Insulation With Polyurethane, ISOPA European Diisocyanate & Polyol Producers Association, Febrero 2004.
- ⁷⁵ Soluciones de Aislamiento con Poliuretano, IDEA, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, E-28004- Madrid, septiembre de 2008, www.idae.es.
- ⁷⁶ Libro Blanco del Poliuretano Proyectado, Guía de ventajas y soluciones de espuma rígida de poliuretano proyectado para aislamiento térmico, acústico e impermeabilización, conforme al CTE. ATEPA, Asociación Técnica del Poliuretano Aplicado, Versión 2.0 julio del 2009, www.atepa.org.
- ⁷⁷ Soluciones de Aislamiento Acústico, ANDIMAT, Asociación Nacional de Fabricantes de Materiales Aislantes, junio de 2009. www.andimat.es