

DISEÑO DE CÁMARA DE COMBUSTIÓN PARA ENSAYOS DE TASA DE LIBERACIÓN DE CALOR.

COMBUSTION CHAMBER DESIGN FOR HEAT RELEASE RATE TESTS.

Laiño, Ailén Melisa¹
Bacci, Guillermo Alberto²
Schmidt, Nicolás³
Pereira, Cecilia María⁴
Saenz, Nazarena⁵
Chiarelli, Bianca⁶
Ponzoni, Lucio María Emilio⁷

Laiño, A. M., Bacci, G. A., Schmidt, N., Pereira, C. M., Saenz, N., Chiarelli, B. y Ponzoni, L. M. E. (2022). Diseño de cámara de combustión para ensayos de Tasa de Liberación de Calor.. *Revista INNOVA, Revista argentina de Ciencia y Tecnología*, 10.

RESUMEN

Una de las formas convencionales de determinar la carga de fuego en la normativa nacional es determinar el calor almacenado por unidad de superficie como la equivalencia para cualquier material sea combustible o inflamable a peso en madera. Uno de los inconvenientes

¹ Universidad Nacional de Tres de Febrero, Argentina / ailenmelisalaino@gmail.com/ ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3083-7226>.

² Universidad Nacional de Tres de Febrero, Argentina / gbacci1984@gmail.com / ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9752-2926>

³ Universidad Nacional de Tres de Febrero, Argentina / nico_schmidt@live.com.ar/ ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2517-2947>

⁴ Universidad Nacional de Tres de Febrero, Argentina / cpereira@untref.edu.ar/ ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3671-7690>.

⁵ Universidad Nacional de Tres de Febrero, Argentina / nazarensaenz97@gmail.com/ ORCID 0000-0001-7431-5118.

⁶ Universidad Nacional de Tres de Febrero, Argentina / bian_chiarelli@hotmail.com/ ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4814-125>

⁷ Comisión Nacional de Energía Atómica - Universidad Nacional de Tres de Febrero/ Universidad Nacional de San Martín, Argentina / lponzoni@untref.edu.ar/ ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0414-1535>

de este método, es que no considera la velocidad con la que se libera ese calor en función del tiempo, conocido como tasa de liberación de calor o Heat Release Rate en inglés, siendo este uno de los parámetros fundamentales para analizar el riesgo de una combustión o de un incendio. Recientemente se conformó un grupo de trabajo formado por docentes e investigadores y alumnos de la Universidad Nacional Tres de Febrero (UNTREF), que apunta a complementar el método convencional de la obtención de la carga de fuego nacional determinado por el Decreto PEN Nro. 351/79, proponiendo un análisis de mejora del método a partir de implementar un estudio de la termodinámica del incendio con el uso del concepto de HRR. En este sentido, el grupo ha comenzado a desarrollar una cámara de combustión en escala, diseñada para modelar la combustión de diferentes materiales equipada con sensores ad-hoc, que permitirá obtener mayor precisión de las diferentes etapas de un incendio y modelar el comportamiento de un incendio aplicando los conceptos de dinámica de incendio, una rama relativamente nueva para el estudio de incendios en la Argentina.

ABSTRACT

A conventional method to determine the fire load in national regulations is to determine the heat stored per unit area as the equivalence for any material is combustible or flammable to weight in wood. An inconvenient of this method is that it doesn't consider the speed of the heat released per time, known as the heat release rate, this is one of the fundamental parameters to analyze the risk of combustion or fire. UNTREF teachers, researchers and students formed an investigation group, which aims to complement the conventional method of obtaining the national fire load determined by Decree 351/79, improving the method studying the thermodynamics of the fire applying the HRR concept. The group has begun to develop a combustion chamber. It was designed with sensors to model the combustion of different materials, it will allow to obtain precision in different stages of a fire and to model the behavior of a fire applying the concepts of fire dynamics, a new branch for the study of fires in Argentina.

PALABRAS CLAVE

Tasa de liberación de calor /cámara de combustión / poder calorífico/ carga de fuego.

KEY WORDS

Heat release rate /combustion chamber/ heat of combustion / fire load

INTRODUCCIÓN

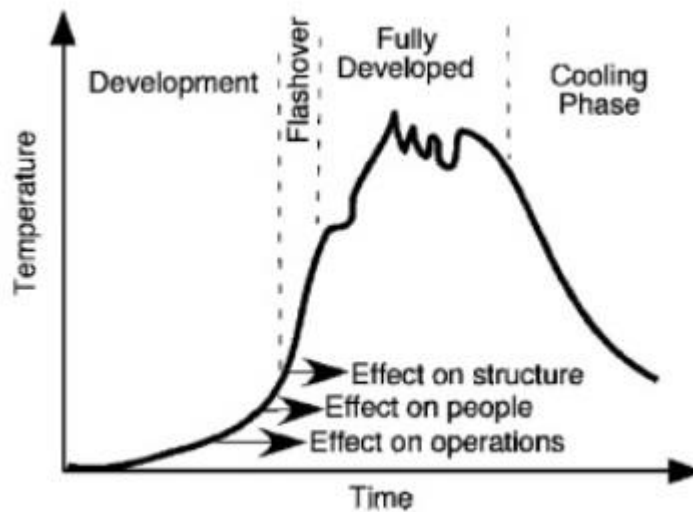
Tras finalizar la investigación de un incendio, se evalúan medidas preventivas las cuales pueden evitar y limitar su propagación y, por sobre todo cómo reducir al máximo sus daños y consecuencias. El riesgo incendio representa un potencial de pérdidas y para prevenir, es necesario conocer la evolución que tendrá el mismo, como así también, las variables que contempla el proceso de una combustión.

Determinar por qué ocurre un incendio, aún en los casos en que las pérdidas sean mínimas, es fundamental para desarrollar métodos preventivos que mitiguen sus efectos. El control y extinción requiere un conocimiento básico de la naturaleza química y física del fuego, así como también las características de los combustibles y las condiciones ambientales. Esto nos provee de una base para comprender el desarrollo de un incendio, su propagación en una estructura, su comportamiento, y las técnicas y tácticas para su combate y control.

Al momento de definir el parámetro carga de fuego, hablamos de la cantidad de energía en forma de calor que un material libera en un proceso de combustión. Ahora bien, a fin de garantizar la prevención contra incendios, no sólo debe contemplar la cantidad de calor liberado en función del material combustible presente, sino también diversos parámetros que detallaremos más adelante. Por consiguiente, para explicar lo que antecede, en esta etapa del análisis nos centraremos en considerar el tiempo que tarda en liberarse esa cantidad de calor capaz de entregar el combustible durante el proceso de combustión y comprender las diferentes etapas durante el desarrollo de un incendio, las cuales son:

Etapa 1ª. *Desarrollo*. En esta primera etapa, todos los elementos presentes capaces de iniciar el incendio comienzan a interactuar por medio de la generación de vapores (pirólisis). El acto físico de la ignición podrá estar dado por la presencia de una fuente de ignición o bien podrá ser provocado cuando el material implicado alcance su temperatura de ignición como resultado de poseer vapores con suficiente energía para ello. Esta etapa puede durar varios minutos o apenas unos segundos, en este momento, existen las condiciones favorables y la existencia de oxígeno suficiente para que se desarrollen llamas con gran rapidez, con el correspondiente desprendimiento de rayos infrarrojos y luz. A su vez, a las llamas les sigue la producción de calor, con humos y gases tóxicos, ascendiendo a las partes altas. Durante este período, los gases calientes se seguirán acumulando horizontalmente de arriba hacia abajo, empujando al aire fresco a las zonas bajas, generando emisión de gases de combustión en los materiales combustibles más cercanos si los hubiese. En esta etapa, el incendio se encuentra en su fase de crecimiento y alcanzará su pico máximo. Este último se encuentra asociado al punto en el cual todo el material se encuentra ardiendo, y en donde el fuego no podrá continuar creciendo una vez encendido la cantidad de material combustible presente.

Figura 1: Fases de desarrollo del Fuego



Fuente: Fundamentals of Fire Phenomena (Quintiere, 2006)

Etapa 2ª. *Flashover*. El *Flashover* es la transición entre la etapa de desarrollo y la etapa del incendio cuando este se encuentra completamente desarrollado. Por lo general, la combustión súbita generalizada está caracterizada por el cambio repentino en las condiciones del recinto, siendo esta la consecuencia que más la caracteriza. Estos cambios están dados por el intervalo en el que, la combustión de los materiales implicados que han comenzado a arder en primer lugar, comienza a generar por medio de los vapores, una cantidad de calor radiante suficiente para que esta combustión se extienda a todas las superficies de material combustible dentro del recinto. Esto se debe a que, con el transcurso del tiempo, la temperatura y la concentración de gases aumentan hasta generar una nube de gases de incendio en la parte más alta del recinto donde se favorece una inflamación muy favorable en un punto del Límite Inferior de Inflamabilidad. Por consiguiente, cuando las llamas alcanzan la parte inferior de esta nube de gases, estos se inflaman e incrementan el efecto de radiación de calor al resto de los materiales que se encuentran en el lugar. Sin embargo, no debe confundirse la ocurrencia de este fenómeno con el acontecimiento del *Flashover*, ya que este ocurre cuando se halla la máxima cantidad de calor liberado en un breve lapso. Por otro lado, es importante señalar la importancia de dicha coyuntura al momento en el que el cuerpo de bomberos se encuentra en el recinto, ya que implica una situación de extremo peligro para los mismos aun cuando se encuentren previstos de su equipo de protección personal.

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

Etapa 3ª. *Completamente desarrollado*. Es aquella etapa del incendio en la que todos los materiales combustibles presentes en el recinto se encuentran ardiendo. Durante este período de tiempo, los combustibles incendiados se encuentran liberando la máxima cantidad

de calor posible por la o las fuentes de ignición disponibles y a su vez continúan generando grandes cantidades de gases.

Etapa 4^a. *Enfriamiento*. En el decurso del tiempo, en la medida en que el fuego consume el combustible disponible, es decir, ya no se dispone de más material para combustionar, la curva comienza a descender de manera vertical. Lo que indica que la cantidad de calor liberado es cada vez menor hasta llegar a su extinción.

Como se mencionó anteriormente, durante el proceso de combustión se desprende energía calórica, y surge aquí un concepto que se erige como el más influyente por encima del resto: la tasa de liberación de calor del incendio, que en adelante denominaremos HRR (*Heat Release Rate*). Esta se define en función de la carga combustible por unidad de área del compartimiento y del tiempo en el cual se desarrolla el fuego en todas sus etapas. En este caso, el área bajo la curva será la que representa la energía liberada en forma de calor en el transcurso del tiempo. Es decir, representa con qué velocidad (tasa) se estaría liberando el calor durante un incendio.

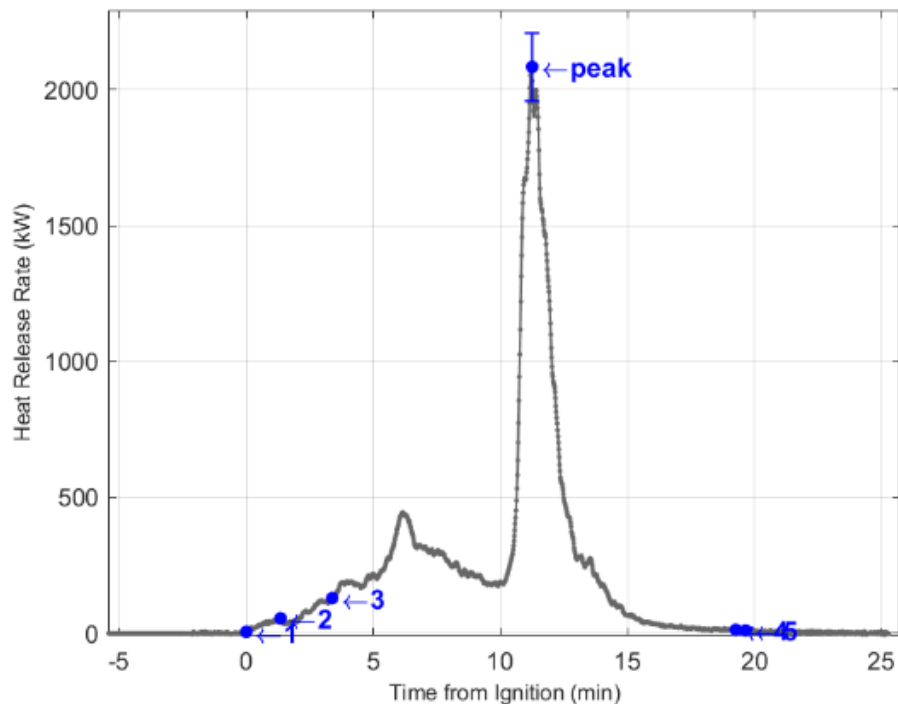
En este sentido, la información de las curvas HRR (Heat Release Rate) podrían ser de gran ayuda para determinar el calor liberado en función de tiempo, es decir determinar la carga dinámica del fuego de un recinto de estudio, además, se debe considerar cada elemento de forma particular, ya que las propiedades químicas de la materia son diversas, no es correcto considerar que todo es equivalente a madera. Un ejemplo de ello es; “Para la combustión de la madera, primero es necesario evaporar el agua contenida en la misma y cambiar de estado el material”. Este fenómeno no se observa en líquidos inflamables. Es por ello que el cálculo de carga de fuego por equivalencia a peso en madera es sumamente impreciso y escaso para determinar el riesgo ante un incendio al no contemplar el tiempo como variable.

Desde el grupo de investigación denominado “Incendios” estamos trabajando en una alternativa al método tradicional del cálculo de la carga de fuego mediante el uso de curvas HRR. En este sentido, el proyecto presentado tiene por objetivo determinar diferentes escenarios en los cuales a partir de parámetros como poder calorífico, materiales, tiempos, superficies se pueda estimar la curva característica de la tasa de liberación de calor y con ello estudiar la dinámica del incendio.

El desarrollo de esta temática es de gran interés para mejorar la metodología actual establecida legalmente pues el método del cálculo de carga de fuego según Decreto PEN Nro. 351/79 es en muchos casos poco preciso para garantizar la seguridad contra incendios de un lugar. Del mismo modo, este método no se encuentra preestablecido mediante algún protocolo, lo cual genera que existan numerosos modelos de informes, haciendo difícil la unificación de criterios por parte de los profesionales al momento de generarlo.

La Tasa de liberación de calor (HRR) es una medida de la cantidad de energía que un tipo específico de combustible puede contribuir al flujo de calor en un incendio, asimismo, está controlada por las propiedades químicas y físicas del combustible y el área de superficie del combustible. Por lo general esta se mide en KW. En la Figura 2, se muestra un ejemplo de curva HRR realizada por el National Institute of Standards and Technology (NIST)

Figura 2: Curva Heat Release Rate



Fuente: National Institute of Standards and Technology (NIST)

OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo consiste en diseñar una cámara de combustión capaz de sostener ensayos que permitan estimar el calor liberado a través del tiempo producto de la combustión de distintos materiales o sustancias inflamables.

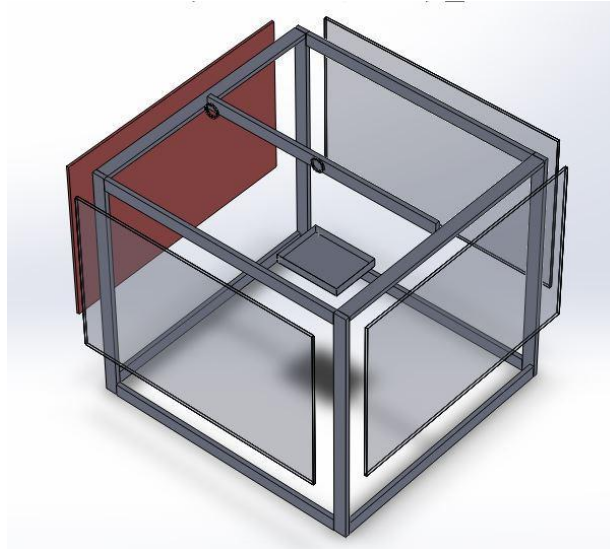
Los objetivos específicos son:

- Seleccionar el material o sustancia combustible que se utilizará en los ensayos.
- Determinar los métodos y parámetros de medición.
- Describir el funcionamiento de los sensores a utilizar.
- Diseñar la cámara de combustión.

METODOLOGÍA

Para el diseño inicial de la cámara de combustión se decidió utilizar el software SolidWorks de modelado 3D, con el que se representó el prototipo inicial que se puede apreciar en la Figura 3. A continuación se realiza una breve descripción de los elementos que se utilizarán para su construcción.

Figura 3: Cámara de combustión



Fuente: Elaboración propia

Figura 4: Proceso de armado de la cámara



Fuente: Elaboración propia

La estructura de la cámara, la cual se puede observar en la Figura 4, estará compuesta por un total de doce perfiles de aluminio de una longitud de un metro y medio que conformarán un cubo. A su vez, se colocarán dos perfiles adicionales. En su parte superior un perfil que cumplirá la función de sostén para las roldanas y el cable tensor que mantendrán la bandeja de combustión suspendida en el aire a determinada altura con respecto del suelo, tanto la

altura, como las dimensiones del recipiente, serán dependiendo del material a combustionar. El segundo perfil se situará en uno de sus laterales y cumplirá la función de sostener la celda de carga, la cual será desarrollada en el transcurso de este apartado.

Las cuatro caras laterales del cubo estarán cubiertas por placas rectangulares de cartón yeso (conocidas en Argentina como Durlock) de 1 metro de ancho por 1,5 metros de largo que protegerán a la reacción de combustión de los efectos indeseados del viento. Sin embargo, se puede observar una abertura, es decir, las placas no cubren la superficie total de los laterales, esto es para alcanzar un flujo de aire por convección. Tanto los perfiles como las placas estarán unidos mediante elementos de fijación como remaches y pitones.

Por último, en cuanto al diseño de la cámara de combustión, se utilizará el perfil central superior para anexar un tubo de zinc corrugado de 4 pulgadas de diámetro y 2 metros de longitud, que será destinado a recolectar los fluidos y los productos de la combustión con el fin de transportarlos hacia el sensor de gases MQ135.

El equipo de sensores ad-hoc estará compuesto por un árbol de tres termocuplas tipo K (con un rango de medición de -200 a 1372°C y una sensibilidad de 41 microvoltios por grado centígrado), una celda de carga y el sensor de gases mencionado anteriormente.

La termocupla o termopar es un sensor de temperaturas cuyo funcionamiento se puede entender mediante el efecto Seebeck, registrando una diferencia de temperaturas a través de un par bimetálico y transduciéndolo en una diferencia de potencial. El termopar seleccionado está compuesto por una aleación de alumel (níquel y aluminio) y otra de cromel (cromo y níquel). Como se mencionó anteriormente, se seleccionó la termocupla del tipo K (Teniendo en cuenta que existen otros tipos) ya que se considera que el rango de temperaturas a la que opera corresponde a las temperaturas que se podrán alcanzar durante el ensayo, teniendo así, una medición lo más precisa. El árbol de termocuplas se colocará en el lado interno de la cámara de combustión, sobre uno de los largueros principales de la estructura, de manera tal que dos termocuplas quedarán ubicadas en las partes superior e inferior dejando a la última equidistante, en el centro de las otras.

Por otro lado, la celda de carga, un transductor que convierte la fuerza aplicada sobre ella en una señal eléctrica medible, será ubicada en el perfil lateral y cumplirá la función de sensar la variación de la masa de combustible a lo largo del ensayo. Utilizaremos una celda de carga de 5 kg., este dato representa el peso máximo que podrá sensar, la misma se seleccionó tanto por la cantidad de combustible que se utilizará en el momento la combustión, como también se tiene en cuenta la sensibilidad de la misma, para lograr una medición lo más exacta posible. Será sostenida por un cable tensor de acero que, a través de las dos roldanas que se añadirán al perfil central superior, y se mantendrá la bandeja de combustión suspendida en el aire. Cabe destacar que la misma estará protegida con una pared de Durlock con el fin de que la transferencia de calor no la afecte.

En último lugar, el sensor de gases MQ135 se ubicará también por fuera de la cámara. Estará situado a unos dos metros de distancia y recibirá los gases de la combustión por medio del tubo corrugado de zinc mencionado previamente. Será de gran utilidad para analizar la calidad de la combustión midiendo los niveles de concentración de CO , CO_2 , O_2 y NO_x .

Para obtener la tasa de liberación de calor se utilizará el método de pérdida de masa desarrollado por (*SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2016). Para realizar este cálculo será preciso conocer el poder calorífico (también conocido como calor de combustión) del combustible a estudiar y la variación de masa a medida que se desarrolla la reacción de combustión. De esta manera, la tasa de liberación de calor se podrá calcular mediante la siguiente expresión:

$$q_{hc} = \Delta H_c \cdot \dot{m} \text{ (Ecuación 1)}$$

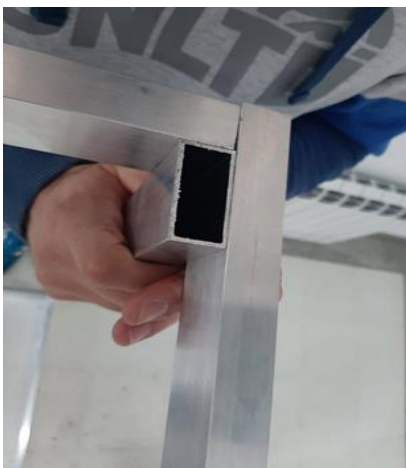
Donde q_{hc} representa la tasa de liberación de calor (en kJ/s), ΔH_c el poder calorífico del material (en kJ/kg) y \dot{m} , la tasa de flujo másico (kg/s), que irá variando a medida que progresa la combustión. Este método tendrá un margen de error del 10%, siempre y cuando la combustión sea 100% completa. Como este tipo de reacciones jamás se da de manera perfecta y siempre subsiste un porcentaje de inquemados, el método permite realizar una corrección del error a través de la medición de CO y CO₂ emanados por la combustión.

Una vez determinada la metodología seleccionada para la obtención de curvas HRR y diseñada la cámara de combustión, se plantea lineamientos y herramientas a utilizar para dar inicio a la etapa constructiva de la misma, teniendo en cuenta los sensores que se dispondrán en la misma, dado que, el diseño de la cámara deberá garantizar el funcionamiento y vida útil de estos.

Construcción

Una vez establecido el material y diseño de la cámara de combustión se realizó la construcción de su estructura. En primer lugar, se dispusieron los perfiles en el espacio de trabajo a fin de determinar el encastre de estos (Figura 5). Se decidió que su encastre, se llevaría a cabo mediante la colocación de varillas roscadas de 6mm de diámetro, con sus respectivas tuercas. Para ello, se procedió a la perforación de los perfiles en lugares estratégicos, de modo tal que las varillas no se interpusieran entre sí (Figura 6). Una vez realizadas las perforaciones, se colocaron las varillas y tuercas, finalizando de esta manera el armado de la estructura.

Figura 5: Presentación de perfiles



Fuente: Elaboración propia

Figura 6: Perforación de perfiles



Fuente: Elaboración propia

En segundo lugar, se planteó que podría ser favorable la colocación de ruedas para un provechoso traslado de la estructura. Por tanto, en los perfiles que componen la base, se colocaron las mismas mediante remaches, según se muestra en Figura 7.

Figura 7: Colocación de ruedas



Fuente: Elaboración propia

En tercer lugar, en su parte superior, se colocó un perfil siguiendo los lineamientos establecidos en los perfiles anteriores. Este perfil, como se mencionó anteriormente, cumple la función de sostén del recipiente que contendrá la sustancia a combustionar. Para esto, en la mitad del perfil se realizó una perforación y se colocó una roldana, a fin de situar un cable tensor, el cual sostendrá el recipiente. Como puede verse en la Figura 8, se coloca una roldana adicional en uno de sus extremos, en la cual se dispone el cable tensor, y sostiene la celda de carga.

Figura 8: Colocación de roldana



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, resulta necesario desarrollar que, en el transcurso de la construcción, hubo discrepancias respecto al prototipo inicial realizado en SolidWorks (Figura 3). Esto se debe a que, en un primer momento la celda de carga se situaría por fuera de la cámara, a modo de protegerla de la transferencia de calor que se produciría en la combustión. Sin embargo, se analizó la localización y se concluyó en la colocación de un perfil adicional, situado en uno de los laterales de la cámara. Para ello, se realiza las perforaciones y se encastra el perfil en el lateral de la cámara, a una altura y disposición estratégica de modo tal que, la celda de carga se sitúe en forma perpendicular en dicho perfil y el cable tensor se direcciona a 90° respecto de la celda, logrando de esta manera que las mediciones sean lo más exactas posibles.

Figura 9: Colocación de perfil lateral



Fuente: Elaboración propia

● **Ensayo de líquidos inflamables**

Inicialmente, con la finalidad de estimar el calor liberado, se someterá a ensayo el combustible *NAFTA INFINIA*. Al seleccionar un líquido se debe tener en cuenta, que el mismo arde en toda su superficie, es decir, está estrechamente relacionado con el recipiente que contendrá la sustancia. Por esta razón, se utiliza una metodología propuesta por el *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT)* y se concluye lo siguiente:

La bandeja de combustión rectangular que se puede apreciar en el centro de la imagen a modo ilustrativo será reemplazada por una bandeja de aluminio circular de 14,5 centímetros de diámetro, suspendida a 0,5 metros respecto del nivel del suelo, con el fin de controlar la altura máxima de la llama. Su capacidad permitirá realizar ensayos con una cantidad de hasta 330 mililitros de combustible. En el transcurso del apartado “Radiación Térmica” se detalla el método de cálculo utilizado para determinar tanto su tamaño como la relación del mismo con la altura de la llama.

● **Radiación Térmica**

El calor radiante de la llama es uno de los parámetros de importancia que indican el riesgo de incendio y su determinación, no solo es necesaria para evaluar consecuencias nocivas y verificar la resistencia al fuego (tanto sea en equipos, materiales, instalaciones); sino también es un factor utilizado para establecer distancias de seguridad.

Con el propósito de estudiar este parámetro, se opta por implementar la metodología descrita en *Nota Técnica de Prevención (NTP) 326: Radiación Térmica en incendios de líquidos y gases*, publicada por *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT)*. En la misma se desarrolla un modelo de cálculo a fin de evaluar la irradiación térmica de incendios estacionarios de base circular o rectangular y sin considerar la influencia del viento. En la ecuación (2), se aprecia el cálculo propuesto. El mismo, consiste en determinar la irradiación por unidad de superficie que recibe una persona u objeto situado a determinada distancia, y la misma depende de:

- Condiciones atmosféricas: temperatura ambiente, humedad relativa
- Geometría del incendio: diámetro de la base de incendio, altura de las llamas y distancia al punto irradiado.
- Características fisicoquímicas del combustible.

$$q = d \cdot E \cdot F \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde:

q= Intensidad de irradiación a una distancia determinada (kW/m²)

d= Coeficiente de transmisión atmosférica (adimensional)

F=Factor geométrico de visión, de vista o de forma (adimensional)

E= intensidad media de radiación de la llama (kW/m²)

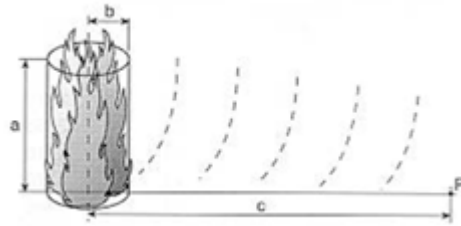
Anteriormente se mencionó la elección del combustible *NAFTA INFINIA*. Ahora bien, para la estimación de la radiación térmica en forma analítica, no se dispone en su totalidad la información requerida por la *NTP* de dicho combustible. Es por lo que, se decidió investigar aquellos líquidos inflamables que posean similar poder calorífico que este (con un margen de error del 10-15 %), ya que se espera un equivalente en la liberación de calor, y a su vez, se dispongan los datos necesarios para la realización del cálculo. Según la *Ficha de Datos de Seguridad*, la *NAFTA INFINIA* posee un poder calorífico de 10,081 Mcal/kg, en base a esto, se designa para el desarrollo del cálculo propuesto, al líquido inflamable *Benceno* con un poder calorífico de 9,6 Mcal/kg.

A su vez, debemos tener en cuenta algunas consideraciones que nos condicionan al momento de estimar la irradiación. En primer lugar, el diseño de la cámara de combustión, ya que la misma tiene una altura de 1,5 metros y se situará un recipiente en el centro suspendido a 0,5 metros de altura con respecto al suelo. Siendo así, se tiene en cuenta que la altura de la llama no puede superar el metro. En segundo lugar, se escoge una bandeja circular, pero, al momento de seleccionar la más apropiada en cuanto a dimensiones, se debe tener en cuenta no sólo la cantidad de combustible, sino también la altura de la llama, debido a que a mayor superficie la llama alcanzará una altura superior. En tercer lugar, el cálculo depende de las condiciones atmosféricas, es necesario tener en cuenta que el mismo se desarrollará con una temperatura de 25°C y una humedad relativa del 60%.

Todas estas consideraciones se relacionan directamente, entre otros, con la forma geométrica de la llama, es decir, con el *factor de visión geométrico* el cual será nuestro punto de partida al momento de realizar el cálculo.

Una de las razones favorables de la utilización de la NTP, es que considera dos tipos habituales de forma de incendio, entre ellas las circulares, y proporciona tablas con valores de factor de visión, tanto para vertical F_v , como para factor de visión horizontal F_h y el factor de visión máximo. Para hallar estos valores, es necesario conocer los parámetros que se observan en la Figura 10.

Figura 10: Forma de incendio cilíndrico vertical



Fuente: NTP 326 "Radiación Térmica de incendios de líquidos y gases"

Siendo:

a= altura de la llama (metros)

b= radio del recipiente (metros)

c= Distancia entre P y el centro de la base de las llamas (metros).

Altura de la llama y radio del recipiente

En la Ecuación (3) se puede observar la fórmula empírica que proporciona la NTP que determina la altura de la llama. Dicho factor depende del radio del recipiente (b) y del caudal de evaporación del combustible (m).

$$a = 29b^{0,7}m^{0,6} \quad (\text{Ecuación 3})$$

No obstante, como se mencionó anteriormente la altura de llama es un parámetro que tendremos que establecer considerando las dimensiones de la cámara de combustión. Por lo expuesto, optamos por comenzar el cálculo con la altura máxima que puede tomar, un metro, teniendo en cuenta que resultará una estimación, no sólo por las condiciones atmosféricas sino también por desconocimiento del caudal de evaporación de *NAFTA INFINIA*.

Por lo cual, se procede a calcular el caudal de evaporación del Benceno y despejar de la Ecuación (3) el radio del recipiente. De esta manera, obtendremos la dimensión deseada del recipiente para la altura requerida.

Caudal de evaporación

Para hallar el caudal de evaporación se hace la distinción dependiendo de la temperatura de ebullición del combustible. En el caso del benceno, como se observa en la Tabla 2, es un líquido inflamable con una temperatura de ebullición superior a la temperatura ambiente. En la Ecuación (4) se dispone el cálculo del caudal del benceno.

Tabla 1: Propiedades del Benceno

| Benceno | | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|---|--------------------------------|
| Calor de combustión (kJ/kg) | Calor latente de vaporización (kJ/kg) | Calor específico a presión constante (kJ/kg °C) | Temperatura de ebullición (°C) |
| 40140 | 389 | 1,72 | 80,1 |

Fuente: Handbook of Fire Protection Engineering

$$m = \frac{hc}{c_p(\Delta t) + h_v} \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2\text{s} \quad (4)$$

$$m = \frac{40140 \text{ kJ/kg}}{1,72 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} (80,1 - 25)^\circ\text{C} + 389 \text{ kJ/kg}} \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$m = 0,083 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$$

Sustituyendo en la Ecuación (3) y despejando el factor b, se obtiene que el radio del recipiente es b= 0,068 m, y por tanto su diámetro 0,136m.

Para la utilización de tablas proporcionadas por NTP, debemos hallar la relación entre los indicadores que hacen al factor geométrico: altura de llama (a), radio del recipiente (b) y distancia entre un punto y el centro de la base de llamas (c). La distancia "c" que se selecciona es la máxima de 0,75 m. Por tanto, se busca la relación entre $\frac{a}{b}$; $\frac{c}{b}$ e ingresamos a la Tabla (3) y hallamos el factor de visión horizontal, vertical y máximo.

- $\frac{a}{b} = 14,70$
- $\frac{c}{b} = 11,03$

Tabla 2: Factor de visión geométrico para incendio cilíndrico

| Factor de visión horizontal, F_h | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| c/b | a/b | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 5.0 | 6.0 | 10.0 | 20.0 |
| 1.10 | 0.132 | 0.242 | 0.332 | 0.354 | 0.360 | 0.362 | 0.362 | 0.362 | 0.362 | 0.363 | 0.363 |
| 1.20 | 0.044 | 0.120 | 0.243 | 0.291 | 0.307 | 0.310 | 0.312 | 0.312 | 0.312 | 0.313 | 0.313 |
| 1.30 | 0.020 | 0.065 | 0.178 | 0.242 | 0.268 | 0.274 | 0.277 | 0.277 | 0.270 | 0.278 | 0.279 |
| 1.40 | 0.011 | 0.038 | 0.130 | 0.203 | 0.238 | 0.246 | 0.250 | 0.251 | 0.251 | 0.252 | 0.253 |
| 1.50 | 0.005 | 0.024 | 0.097 | 0.170 | 0.212 | 0.222 | 0.228 | 0.228 | 0.229 | 0.231 | 0.232 |
| 2.00 | 0.001 | 0.005 | 0.027 | 0.073 | 0.126 | 0.145 | 0.158 | 0.160 | 0.160 | 0.164 | 0.166 |
| 3.00 | 0.000 | 0.000 | 0.005 | 0.019 | 0.050 | 0.071 | 0.091 | 0.091 | 0.095 | 0.103 | 0.106 |
| 4.00 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.007 | 0.022 | 0.038 | 0.057 | 0.057 | 0.062 | 0.073 | 0.078 |
| 5.00 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.011 | 0.021 | 0.037 | 0.037 | 0.043 | 0.054 | 0.061 |
| 10.00 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.003 | 0.007 | 0.007 | 0.009 | 0.017 | 0.026 |
| 20.00 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.003 | 0.003 |
| 50.00 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Factor de visión vertical, F_v | | | | | | | | | | | |
| 1.10 | 0.330 | 0.415 | 0.449 | 0.453 | 0.454 | 0.454 | 0.454 | 0.454 | 0.454 | 0.454 | 0.454 |
| 1.20 | 0.196 | 0.308 | 0.397 | 0.413 | 0.416 | 0.416 | 0.416 | 0.416 | 0.416 | 0.416 | 0.416 |
| 1.30 | 0.130 | 0.227 | 0.344 | 0.376 | 0.383 | 0.384 | 0.384 | 0.384 | 0.384 | 0.384 | 0.384 |
| 1.40 | 0.096 | 0.173 | 0.296 | 0.342 | 0.354 | 0.356 | 0.356 | 0.357 | 0.357 | 0.357 | 0.357 |
| 1.50 | 0.071 | 0.135 | 0.253 | 0.312 | 0.229 | 0.312 | 0.333 | 0.333 | 0.333 | 0.333 | 0.333 |
| 2.00 | 0.028 | 0.056 | 0.126 | 0.194 | 0.236 | 0.245 | 0.248 | 0.248 | 0.249 | 0.249 | 0.249 |
| 3.00 | 0.009 | 0.019 | 0.047 | 0.086 | 0.132 | 0.150 | 0.161 | 0.163 | 0.163 | 0.165 | 0.166 |
| 4.00 | 0.005 | 0.010 | 0.024 | 0.047 | 0.080 | 0.100 | 0.115 | 0.115 | 0.119 | 0.123 | 0.124 |
| 5.00 | 0.003 | 0.006 | 0.015 | 0.029 | 0.053 | 0.069 | 0.086 | 0.086 | 0.091 | 0.097 | 0.099 |
| 10.00 | 0.000 | 0.001 | 0.003 | 0.006 | 0.013 | 0.019 | 0.029 | 0.029 | 0.032 | 0.042 | 0.048 |
| 20.00 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.003 | 0.004 | 0.007 | 0.009 | 0.009 | 0.014 | 0.020 |
| 50.00 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.004 |
| Factor de visión máximo, F_{max} | | | | | | | | | | | |
| 1.10 | 0.356 | 0.481 | 0.559 | 0.575 | 0.580 | 0.581 | 0.581 | 0.581 | 0.581 | 0.581 | 0.581 |
| 1.20 | 0.201 | 0.331 | 0.466 | 0.505 | 0.517 | 0.519 | 0.520 | 0.521 | 0.521 | 0.521 | 0.521 |
| 1.30 | 0.132 | 0.236 | 0.367 | 0.448 | 0.468 | 0.472 | 0.474 | 0.474 | 0.474 | 0.475 | 0.475 |
| 1.40 | 0.094 | 0.177 | 0.323 | 0.398 | 0.427 | 0.433 | 0.436 | 0.436 | 0.436 | 0.437 | 0.437 |
| 1.50 | 0.072 | 0.138 | 0.271 | 0.355 | 0.392 | 0.400 | 0.404 | 0.404 | 0.404 | 0.405 | 0.406 |
| 2.00 | 0.028 | 0.056 | 0.129 | 0.208 | 0.267 | 0.285 | 0.294 | 0.296 | 0.296 | 0.299 | 0.300 |
| 3.00 | 0.009 | 0.019 | 0.048 | 0.088 | 0.141 | 0.160 | 0.183 | 0.189 | 0.189 | 0.195 | 0.197 |
| 4.00 | 0.005 | 0.010 | 0.024 | 0.047 | 0.083 | 0.106 | 0.129 | 0.134 | 0.134 | 0.143 | 0.147 |
| 5.00 | 0.003 | 0.005 | 0.015 | 0.029 | 0.054 | 0.073 | 0.094 | 0.100 | 0.100 | 0.111 | 0.117 |
| 10.00 | 0.000 | 0.001 | 0.003 | 0.006 | 0.013 | 0.019 | 0.030 | 0.034 | 0.034 | 0.045 | 0.055 |
| 20.00 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.003 | 0.004 | 0.007 | 0.009 | 0.009 | 0.014 | 0.022 |
| 50.00 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.004 |

Fuente: NTP 326 “Radiación Térmica de incendios de líquidos y gases

Realizando interpolación entre valores se obtiene:

$$F_h = 0,018$$

$$F_v = 0,041$$

$$F_{max} = 0,045$$

Continuando con la Ecuación (2), empleamos una fórmula empírica, Ecuación (5), a modo de hallar el coeficiente de transmisión atmosférica, recordando que utilizamos condiciones de temperatura ambiente de 25°C y humedad relativa del 60%. En la ecuación (5) se observa que el coeficiente además de depender de la presión de vapor de agua, depende de la longitud de recorrido de la radiación, por tanto, se interpreta que esa distancia es “c” = 0,75m

$$d = 2,02 (P_v \cdot x)^{-0,09} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Siendo:

P_v = Presión parcial de vapor de agua a una temperatura determinada (Pa)

x = Longitud de recorrido de la radiación, distancia desde la superficie de llama al blanco receptor (m)

Por tanto, según ecuación (3) el coeficiente será:

$$d = 2,02 (1878.0,75)^{-0,09}$$

$$d = 1,05$$

A modo de finalizar el cálculo, expresamos la intensidad de radiación de la llama (E) medida en kW/m^2 , la cual depende del tipo de combustible y del diámetro de la base del líquido a combustionar. La NTP proporciona dos tablas en donde, dependiendo de la temperatura de ebullición del combustible, se encuentran los valores para estimar E .

Tabla 3: Intensidad media de la radiación de superficie de llama (kW/m^2)

| LÍQUIDOS CON TEMPERATURA EBULLICIÓN > TEMPERATURA AMBIENTE (CHARCOS NO HIRVIENTES) | |
|--|----|
| Acetato de vinilo | 30 |
| Acetonitrilo | 37 |
| Acrilonitrilo | 26 |
| Acido fórmico | =2 |
| Alcohol alílico | 38 |
| Acrilato de metilo | 30 |
| Benceno | 70 |
| Bromo | |
| N-butil mercaptano | 85 |
| T-butil mercaptano | 73 |
| Cloroformo | =1 |
| Cloruro de alilo | 32 |
| Dicloropropano | 20 |
| Dietilamina | 77 |
| Disulfuro de carbono | 16 |
| Epiclorhidrina | 22 |
| Etilendiamina | 30 |
| Etil mercaptano | 59 |
| Formiato de etilo | 30 |
| Formato de metilo | 19 |
| Metanol | 15 |
| Nafta disolvente | 68 |
| Oxido de propileno | 45 |
| Tetracloruro de carbono | =1 |
| Tetraetilo de plomo | 20 |
| Tetrahidrotiofeno | - |

Fuente: NTP 326 "Radiación Térmica de incendios de líquidos y gases"

Como se puede observar en la Tabla 4 la intensidad media de llama que corresponde al benceno es 70 kW/m .

Por tanto, la intensidad de irradiación (Ecuación 2) para una distancia de $0,75\text{m}$ será:

$$q = (1,05 \times 0,045 \times 70) \text{ kW/m}^2$$

$$q = 3,30 \text{ kW/m}^2$$

Tal como se mencionó anteriormente, si se quisiera evaluar las posibles consecuencias de la radiación térmica de un incendio, podemos adquirirlo mediante esta metodología propuesta por la NTP. En este caso, es útil para hallar un valor aproximado, es decir, es estimativo por las razones que se fueron desarrollando en este artículo. Adicionalmente del objetivo que posee este procedimiento, particularmente nos aporta la posibilidad de establecer y asimismo transformar mediante las circunstancias, parámetros que hacen al cálculo. Un ejemplo claro, es la altura. En este contexto se encuentra limitada y optamos la máxima, pero si se deseara reducir la altura, hallaríamos las dimensiones de un recipiente con menor diámetro; de igual modo, si se busca mayor altura, el recipiente sería mayor y en ese caso deberíamos descender el mismo. Otro factor que hace al cálculo y presenta estas flexibilidades, es la distancia desde la superficie de llama al receptor, sea persona u objeto. Como en el caso de la altura, se tomó la distancia máxima, sin embargo, se podría establecer una menor, y obtener una mayor intensidad. En otras palabras, lo que nos aporta tomar estos atributos es evaluar, más allá del combustible a seleccionar, en cómo varía esta intensidad de irradiación alternando otros parámetros que hacen a la misma.

CONCLUSIONES

El trabajo demuestra que mediante ensayos se podrán obtener curvas de tasa de liberación de calor para variedad de elementos combustibles, ya sea líquidos o sólidos.

A partir del análisis planteado se concluye que es beneficioso y necesario poder complementar la legislación y los métodos que utilizamos actualmente para determinar la carga de fuego de un recinto, ya que actualmente se considera poco preciso para garantizar la seguridad contra incendios de un lugar. Por lo tanto, podremos realizar una comparación de resultados obtenidos con el método convencional y estudiar el comportamiento de los materiales nacionales.

Asimismo, la cámara de combustión será de utilidad para realizar, ya sea, ensayos para diferentes materiales, como también mediciones de liberación de calor y ensayos de resistencia al fuego para el proyecto de Eco Vivienda Modular Eficiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Decreto Poder Ejecutivo Nacional 351 de 1979. Reglamentación de la Ley 19.587 de Higiene y Seguridad en el Trabajo.
<http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/verNorma.do?id=32030>

National Institute of Standards and Technology (NIST). (2018). Fire Barriers in Full-Scale Chair Mock-ups. Test B4-1 [Fire Barriers in Full-Scale Chair Mock-ups | NIST](#)

National Fire Protection Association (NFPA). (2016). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Editorial Staff.

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (1992). *Nota Técnica de Prevención 326: Radiación térmica en incendios de líquidos y gases*.

Fecha de recepción: 7/11/2022

Fecha de aceptación: 28/11/2022