

Test bench design for evaluating flame propagation under controlled flow conditions

Freddy X. Jervis, PhD¹, Alvaro Acosta, Ingeniero Mecánico¹, Stephanie Mite, Ingeniera Mecánica¹

¹Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador, fjervis@espol.edu.ec, afacosta@espol.edu.ec, smite@espol.edu.ec

Abstract— *The present project was developed with the purpose of allowing the evaluation of the behavior of construction materials, when a flame is propagated during combustion. To fulfill this objective, a test bench was designed to verify these materials under the conditions of a controlled environment. The methodology to be followed was to select the different components that integrate the test bench, through experimental tests and analysis by simulation with a computer program. The main components that make up the test bench are: axial fan, turbulence reducing device (honeycomb), protective meshes, voltage regulator and the sample holder. And the test materials that were part of this project included: PMMA (Polymethylmethacrylate); woods and derivatives; polypropylene and polyurethane (elastomer), to be evaluated through a simulation and verify that they meet the limitations of our test bench, such as the maximum working temperature inside the test chamber and the rate of heat released. The taking of data and measurements of the flammability of the material by means of a fire propagation device are under the ASTM 2058 standard. As a result, the maximum glass surface temperature is 275 °C, and the air flow velocity is obtained as 0.26 m/s. The sizing of the equipment was carried out to allow testing on samples 12 cm wide, 30 cm long and 10 - 25 mm thick. Once the design of the test bench was completed, it was determined that the required workspace is 0.87 x 1.08 m and a height of 1.24 m.*

Keywords- *Test bench, flame propagation, boundary layer, heat release rate*

Digital Object Identifier (DOI):<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.452>
ISBN: 978-0-9993443-1-6
ISSN: 2414-6390

Diseño de un banco de pruebas para evaluar propagación de la llama bajo condiciones de flujo controlada

Freddy X. Jervis, PhD¹, Alvaro Acosta, Ingeniero Mecánico¹, Stephanie Mite, Ingeniera Mecánica¹

¹Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador, fjervis@espol.edu.ec, afacosta@espol.edu.ec, smite@espol.edu.ec

Abstract- The present project was developed with the purpose of allowing the evaluation of the behavior of construction materials, when a flame is propagated during combustion. To fulfill this objective, a test bench was designed to verify these materials under the conditions of a controlled environment.

The methodology to be followed was to select the different components that integrate the test bench, through experimental tests and analysis by simulation with a computer program. The main components that make up the test bench are: axial fan, turbulence reducing device (honeycomb), protective meshes, voltage regulator and the sample holder. And the test materials that were part of this project included: PMMA (Polymethylmethacrylate); woods and derivatives; polypropylene and polyurethane (elastomer), to be evaluated through a simulation and verify that they meet the limitations of our test bench, such as the maximum working temperature inside the test chamber and the rate of heat released. The taking of data and measurements of the flammability of the material by means of a fire propagation device are under the ASTM 2058 standard.

As a result, the maximum glass surface temperature is 275 °C, and the air flow velocity is obtained as 0.26 m/s. The sizing of the equipment was carried out to allow testing on samples 12 cm wide, 30 cm long and 10 - 25 mm thick. Once the design of the test bench was completed, it was determined that the required workspace is 0.87 x 1.08 m and a height of 1.24 m.

Keywords: *Test bench, flame propagation, boundary layer, heat release rate*

Resumen- El presente proyecto es elaborado con la finalidad de evaluar el comportamiento que presentan diferentes materiales de construcción, cuando una llama se propaga durante la combustión. Para cumplir con este objetivo se diseña un banco de pruebas que permita analizar estos materiales bajo condiciones de un ambiente controlado.

La metodología a seguir fue seleccionar los distintos componentes que integran al banco de pruebas, mediante pruebas experimentales y análisis por simulación con un programa computador. Los componentes principales que integran el banco de pruebas son: ventilador axial, dispositivo reductor de turbulencia (honeycomb), mallas protectoras, regulador de voltaje y porta-muestra. Los materiales de prueba que forman parte de este proyecto incluyeron: PMMA (Polimetilmetacrilato); maderas y derivados; polipropileno y poliuretano (elastómero), para ser evaluados mediante una simulación y verificar que cumplen con las limitaciones de nuestro banco de pruebas, tales como la temperatura máxima de trabajo dentro de la cámara de prueba y la tasa de calor liberada. La toma de datos y mediciones de la inflamabilidad del material mediante un aparato de propagación de incendios están bajo la norma ASTM 2058.

Como resultado se obtiene la temperatura máxima de la superficie del vidrio de 275 °C y la velocidad del flujo de aire de 0.26 m/s. El dimensionamiento del equipo fue realizado para desarrollar ensayos en muestras de ancho 12 cm, largo 30 cm y

espesor 10 - 25 mm. Finalizado el diseño del banco de prueba se determinó que el espacio de trabajo requerido es de 0.87 x 1.08 m y una altura de 1.24 m.

Palabras Clave: *Banco de pruebas, propagación de la llama, capa límite, tasa de liberación de calor*

1. INTRODUCCIÓN

Existe una necesidad por evaluar cómo se comportan diferentes materiales cuando se propaga una llama durante la combustión. Para predecir el riesgo que un fuego bajo condiciones determinadas representa, es necesario medir diferentes parámetros como son la velocidad del frente de combustión, concentración de oxígeno, calor disipado, temperatura y producción de gases durante la combustión de diferentes materiales.

Las normas de construcción hoy en día requieren regulaciones más estrictas para materiales en distintas aplicaciones y sólo pueden ser evaluadas utilizando bancos de prueba apropiados. En este proyecto, se analiza el diseño de un banco de prueba que refleje las condiciones en las que se pueda evaluar qué tan propenso es un material a quemarse. El propósito será evaluar la resistencia que proyecta un material al quemarse bajo diferentes condiciones de flujo controlado y la propagación de la llama durante la combustión.

1.1 IGNICIÓN DEL FUEGO

Para que un material inicie el proceso de combustión es necesario disponer de tres factores: combustible, comburente y temperatura de ignición. En general, sin importar el tipo de combustible; sea éste, sólido, líquido o gaseoso; debe de alcanzar su temperatura de ignición antes de poder arder. La temperatura de ignición puede ser considerada como la temperatura mínima necesaria para que una mezcla aire combustible provoque el fuego, con o sin presencia de una chispa o llama que genere la ignición.

Atreya, A. en su estudio Ignition of Fires [1] (Ignición del Fuego) determina que el tiempo para que ocurra la ignición depende de varios factores tanto internos como externos al sólido. Los factores externos son los siguientes. (i) La temperatura, composición y velocidad del flujo alrededor de la muestra sólida. Este flujo puede ser forzado o generarse de manera natural. (ii) La geometría de la muestra y el tamaño del área expuesta. Por otro lado, dentro de los factores internos a la muestra se encuentran las propiedades termofísicas y termoquímicas del sólido, así como su contenido de humedad.

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.452>

ISBN: 978-0-9993443-1-6

ISSN: 2414-6390

1.2 PROPAGACIÓN DE UNA LLAMA

La velocidad de propagación de una llama se determina mediante la capacidad de transferir calor necesario para generar pirolisis en un sólido y crear la ignición del combustible a su alrededor. Cuando la transferencia de calor y el flujo de aire se encuentran en la misma dirección, el proceso de dispersión de la llama es acelerado, de lo contrario el flujo es opuesto y la propagación de la llama ocurre de manera lenta.

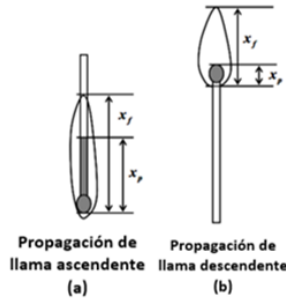


Figura 1: Propagación de llama en un fósforo [2]

En la Figura 1 se muestra la propagación de la llama en un fósforo. En el literal (a), después de la ignición, la llama muestra un recorrido acelerado a lo largo de la madera, a diferencia del literal (b), que toma más tiempo, dado que el flujo de aire y la dirección de transferencia de calor están en direcciones opuestas.

Explicando cada uno de los términos de la Figura 1, x_f es la longitud total de la llama visible, que va desde la base hasta la punta de la llama; x_p es la longitud del sólido en combustión también llamada longitud de pirólisis. Consecuentemente la velocidad de propagación estaría definida como (dx_p/dt) . [2]

El flujo de combustión (\dot{m}_f) se define como la masa de combustible liberada por la superficie en un periodo de tiempo determinado. Tal como se observa en la Figura 2, la distancia de separación de la llama ($y_f(x)$), es la distancia entre el perfil de llama y la superficie del material base, misma que varía de acuerdo a la velocidad del aire, las condiciones ambientales, tales como el porcentaje de oxígeno y temperatura del ambiente circundante; y las propiedades termodinámicas del material, así como su transmitancia térmica.

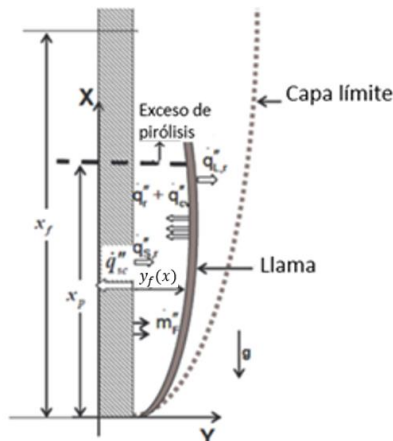


Figura 2: Distancia de separación y capa límite de una llama [3]

1.3 NÚMERO DE TRANSFERENCIA DE MASA B-NUMBER

Se utiliza un número adimensional denominado “B-Number”, también llamado número de transferencia de masa, como una medida de la eficiencia termodinámica del proceso de combustión.

Rangwala realizó una investigación en donde obtiene el “B-Number” de manera experimental a partir de la distancia de separación, medida entre la llama y el sólido, en una llama cuando ésta se extiende hacia arriba. Resultados experimentales demuestran que el “B-Number” no es constante, sin embargo, puede ser utilizado para predecir la tasa de combustión, la longitud de la llama y su tasa de propagación. [2]

La máxima representación del “B-Number” ocurre adiabáticamente, es decir, sin considerar las pérdidas de calor. En este punto, el “B-Number” es considerado constante y valor crítico puesto que representa al peor escenario de comportamiento de inflamabilidad de un material durante su combustión. [2]

1.4 TASA DE LIBERACIÓN DE CALOR

La tasa de liberación de calor, dada por la ecuación 1, es la característica esencial que describe cuantitativamente qué tan grande es la llama generada durante un fuego. La tasa de combustión de un material se mide en kilovatios [kW] y corresponde a la velocidad a la que las reacciones de combustión producen calor. Se la expresa a través de la siguiente relación:

$$\dot{E} = \Delta H \dot{m}_f \quad (1)$$

Donde ΔH es el poder calorífico [MJ/kg] y \dot{m}_f es la tasa de pérdida de masa [kg/s]. El poder calorífico de un material es la cantidad de energía liberada por la reacción de combustión, que entrega un kilogramo de combustible al oxidarse en forma completa. Por otro lado, la tasa de liberación de calor es la variable principal que determina como el comportamiento de distintos materiales puede afectar al riesgo de incendios.

Para determinar el poder calorífico de un material, se realiza una prueba utilizando un calorímetro. El experimento consiste en introducir las probetas en un contenedor de acero antiexplosivo, tal como se muestra en la Figura 3, cuyo volumen se mantiene constante durante la reacción de combustión. El porta-muestra se sumerge en un contenedor aislado lleno de un líquido que absorbe el calor generado por la combustión. En el interior de la cámara una chispa eléctrica reacciona bajo la presencia de abundante oxígeno produciendo la ignición. [4]

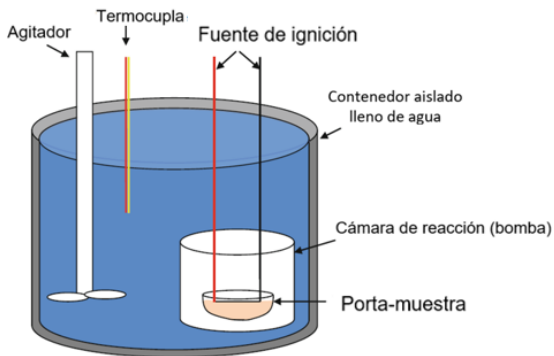


Figura 3: Calorímetro y sus partes [5]

1.5 PRUEBA DE PROPAGACIÓN DE LLAMA ASCENDENTE

La prueba de propagación de llama ascendente está diseñada con el objetivo de determinar las características de inflamabilidad de los materiales candidatos cuando se exponen a lo largo del borde inferior a una fuente de ignición. De manera que se ponen a prueba los factores de combustibilidad de la muestra, la tasa de propagación, las propiedades de auto-extinguible y el tiempo total de combustión. [6]

Para los intereses de este proyecto, se desea mantener un flujo de aire controlado, proporcionar un flujo constante de aire/oxígeno durante la propagación de combustión. Con ello medir diversos parámetros de interés, como la velocidad del frente de combustión, el calor disipado, la temperatura, perfil de la llama y producción de gases durante la combustión de los materiales a prueba.

Con respecto al banco de pruebas, según las recomendaciones [6], éste debe tener un volumen suficiente para asegurar la combustión completa de la muestra. Además, éste incluirá una ventana o puerto de observación y deberá ser construido adecuadamente para garantizar una operación segura y fuera de peligro. Continuando con la cámara de prueba, debe contener entradas para la instrumentación, el alambre de encendido, inyección de aire/oxígeno y elementos adecuados para calentar la cámara de ser necesario. Por otra parte, los materiales utilizados para la construcción de la cámara de prueba, tales como juntas y sellos, no deben contribuir a la inflamabilidad del material de prueba. Finalmente, la cámara de prueba debe estar equipada con características de ventilación, para evitar la exposición del personal de trabajo a los subproductos de combustión potencialmente peligrosos.

1.6 TEORÍA DE CAPA LÍMITE

La capa límite mostrada en la Figura 4, ocurre cuando un fluido fluye sobre una superficie y se crea un perfil de velocidad variable debido a la condición de no deslizamiento producto de la fricción entre las capas del flujo y la superficie de contacto. La velocidad aumenta desde cero (velocidad en la superficie de la placa) hasta su máximo valor U_∞ que ocurre cuando la velocidad se vuelve constante y el flujo alcanza el espesor de su capa límite $\delta(x)$. [7]

El espesor de la capa límite varía de acuerdo a la rugosidad y forma de la superficie de contacto, así como también del tipo de régimen del flujo. [7] [8]

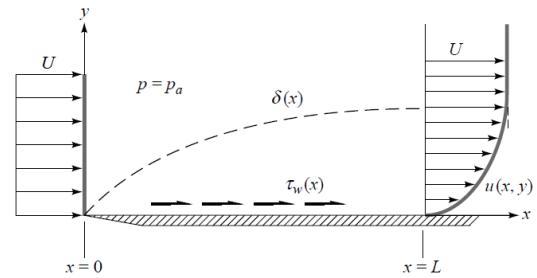


Figura 4: Crecimiento de la capa límite de una placa plana [8]

2. METODOLOGÍA

Los principales factores que influyen en el diseño del banco de pruebas son el tipo de material de las muestras y sus dimensiones; las condiciones del flujo de aire en el interior de la cámara de prueba, así como su velocidad y porcentaje de oxígeno; y la temperatura máxima en el interior de la cámara.

El banco de pruebas enfoca su diseño en el estudio de la propagación de una llama. Las dimensiones de las muestras fueron definidas al inicio del proyecto, tales como: ancho de 12 cm, el largo de 30 cm y el espesor de 10 - 25 mm.

El flujo de aire en el interior de la cámara de prueba debe de cumplir con ciertos parámetros para que pueda ser considerado como óptimo para la realización del experimento. En este proyecto se busca que el flujo sea de régimen laminar, que se encuentre en la región de fluido no viscoso y que la velocidad máxima del perfil desarrollado no supere los 27 cm/s. Hay que mencionar, además que el porcentaje de oxígeno que suministra el flujo de aire juega un papel importante en la geometría del perfil de la llama, por lo tanto, debe de ser considerado para el dimensionamiento de la cámara de prueba.

El tipo de ignición de la muestra es un aspecto importante que debe ser tomado en consideración durante las primeras etapas de diseño, ya que determina qué se requiere que cumpla el banco de pruebas para que la propagación de la llama sea uniforme. Para esto, es necesario que el ambiente en el interior del área de trabajo sea controlado, es decir, que el flujo sea laminar y que su velocidad sea constante.

Tras la selección del tipo de ignición se determina el diseño de la cámara de pruebas y el dispositivo de reducción de turbulencia. El diseño de la cámara de prueba involucra la selección del material y su geometría; y el diseño del dispositivo para la sujeción de las muestras. El primer dimensionamiento de la cámara deberá ajustarse al tamaño de las probetas que se deseen analizar. Así mismo, estas primeras directrices serán tomadas en consideración para la realización del diseño del dispositivo de reducción de turbulencia.

Tomando en cuenta las consideraciones previas, la selección del ventilador será propuesta a partir de la cantidad de potencia requerida para la operación normal del sistema, es decir, cumpliendo con los requerimientos planteados al inicio del proyecto en función del flujo de aire y su velocidad. Estas características serán debidamente evaluadas en un programa de computador analítico que permita determinar si el sistema cumple o no con todas las funciones anteriormente descritas. En el caso de que no se cumplan, se deberá regresar al diseño de la cámara de prueba y dispositivo de reducción de turbulencia para realizar modificaciones hasta que los

resultados obtenidos del análisis correspondan a los esperados. Como ha sido mencionado anteriormente, la geometría del perfil de la llama afecta directamente al dimensionamiento de la cámara de prueba y, por lo tanto, del honeycomb (dispositivo de reducción de turbulencia).

Por último, se deberá realizar el análisis de costo y la elaboración de los planos para la posterior construcción del banco de pruebas.

2.1 DIMENSIONAMIENTO DE LA CÁMARA DE PRUEBAS

Para determinar las dimensiones de la cámara de prueba es necesario calcular los espesores de las capas límites hidrodinámica y térmica en el interior del ducto de ensayo. La muestra por analizar deberá ser colocada en la región en donde el flujo se mantenga dentro del núcleo no viscoso con el fin de asegurar que la simulación sea realizada bajo condiciones de corriente libre. En la sección de análisis para velocidades medias en el orden de 0.15 a 0.27 m/s y con un Reynolds crítico en régimen laminar, el espesor de la capa

límite hidrodinámica al final de la sección de ensayos es $\delta_H=2$ mm, dejando una sección de flujo no viscoso de 236 [mm] para ensayar las muestras. Sin embargo, hay que considerar además el espesor de la capa límite que se formará debido al calentamiento de las muestras. Este espesor varía de 19.78 a 23.53 mm con el incremento en la temperatura del flujo de aire al paso por el interior de la cámara de pruebas. Finalmente, se logra calcular la sección libre correspondiente a la distancia entre la capa hidrodinámica y térmica medidas a partir de la superficie en transferencia de calor, por lo que a partir del siguiente análisis se obtuvo de la ecuación 2:

$$e_{\text{libre}} = \frac{d}{2} - \delta_H - \delta_L - \frac{e_{\text{placa}}}{2} \quad (2)$$

Para un diámetro del cilindro de 240 mm se obtuvo una sección libre de aproximadamente 84,5 mm. A continuación, en la Figura 5 se puede observar la imagen de la simulación de las capas límites, tanto térmicas como hidrodinámicas obtenidas en el interior de la cámara de pruebas.

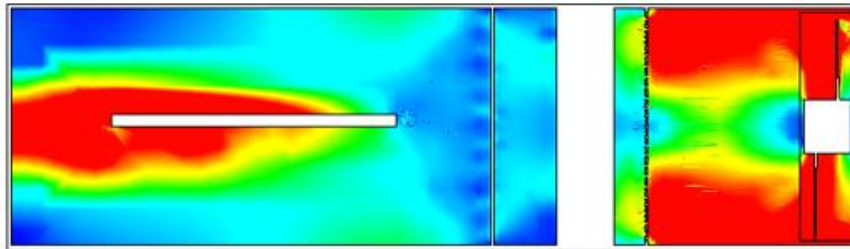


Figura 5: Distribución de capa límite térmica e hidrodinámica.

2.3 PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN DEL FLUJO DE AIRE CONTROLADO

PARÁMETROS CONSTANTES:

- **Velocidad de rotación del ventilador:** Se requiere una velocidad media que fluctúa de 0.15 a 0.27 m/s dentro de la cámara de pruebas, para mantener un flujo laminar, por lo tanto, se determinó que la velocidad de giro del ventilador es de 320 RPM.
- **Presión atmosférica:** Para el análisis se ingresó como parámetro presión atmosférica a la entrada y la salida de la cámara de pruebas.
- **Tiempo de prueba:** El tiempo máximo de prueba depende del número de iteraciones realizadas para llegar a converger una respuesta estable. Se fija un máximo de 160 iteraciones, para alcanzar los resultados de velocidad y temperatura del fluido dentro del ducto circular.

PARÁMETROS VARIABLES:

- **Tasa de generación de calor:** La tasa de liberación de calor de una muestra se la determina a partir de la ecuación 1. Este parámetro varía de acuerdo al material de prueba que se está utilizando, ya que depende exclusivamente del poder calorífico y la tasa de pérdida de masa del material. En este trabajo se toma como material de muestra al PMMA, con un poder calorífico de 26,56 [kJ/kg] y la tasa de pérdida de masa de 0,02735 g/s [4]

- **Material de prueba:** Se analizaron distintos materiales de prueba, para conocer cuáles de ellos se encuentran dentro de los parámetros que regulan el uso del banco de pruebas. Entre los materiales analizados se incluyen la madera (roble), PMMA, polipropileno y poliuretano.

2.4 CÁLCULO DE TRASFERENCIA DE CALOR Y TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA CÁMARA DE PRUEBA

Conociendo que la tasa de liberación de calor es directamente proporcional a la tasa de pérdida de masa y al poder calorífico, tal como se muestra en la Ecuación 3

$$E = \Delta H \dot{m}_f \quad (3)$$

Por lo tanto, se determinó que $E= 19.52$ kW/m². Mediante un balance de energía, es posible determinar las temperaturas del flujo a la salida del ducto, y a su vez la temperatura de superficie de la cámara de pruebas. Asumiendo que todo el calor emitido por la muestra es liberado a través de calor por convección hacia el flujo de aire, como se muestra en la Ecuación 4

$$\dot{E} = q_{conv} \quad (4)$$

De esta manera se realiza un análisis de transferencia de calor para flujo interno en ductos a temperatura constante. De la Ecuación 5

$$q_{conv} = \dot{m} C_p (T_{mo} - T_{mi}) \quad (5)$$

Es por ello que se logra determinar que la temperatura del flujo de aire a la salida del ducto es $T_{mo}=142.06^{\circ}\text{C}$.

Es importante mencionar que T_{mo} es la máxima temperatura del aire que podría alcanzar a la salida del ducto, ya que se desprecia el calor liberado por radiación.

Continuando con el cálculo de la temperatura superficial, se asume que todo el calor generado por la muestra en combustión es recibido a través de la radiación liberada por la mitad del ducto que conforma la cámara de pruebas (ecuación 6).

$$E = q_{rad} \quad (6)$$

Y este calor recibido es liberado a través de convección forzada en el interior del ducto y a su vez por convección libre en el exterior.

Por lo tanto, se plantea un balance de energía, utilizando la temperatura de salida del flujo de aire como máxima, y se llega a calcular que la temperatura superficial $T_s=196.43^{\circ}\text{C}$

2.5 NIVELES DE FLUJO AIRE/OXÍGENO

El nivel de oxígeno en el flujo de aire juega un papel importante ya que, al ser regulado, altera la geometría de la llama. Para disminuir o aumentar el porcentaje de oxígeno presente en el aire se considera la inyección de un flujo de nitrógeno y oxígeno, respectivamente. A través del uso de un programa computarizado se logra determinar el flujo necesario de oxígeno y nitrógeno para obtener una relación de aire/oxígeno porcentual en el rango de 15 a 30%. En la Figura 6 que se muestra a continuación, se observa el esquema del diseño del sistema de inyección de Oxígeno / Nitrógeno a la cámara de pruebas. Es importante mencionar que en el esquema mencionado no se muestran los accesorios necesarios para la instalación del sistema de tuberías ni de los regulares de presión y flujo volumétrico requeridos durante la operación.

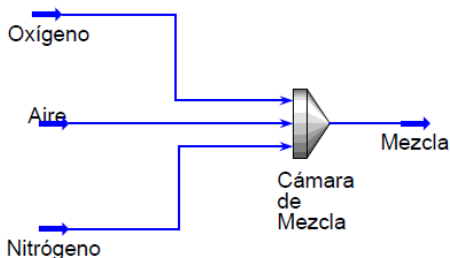


Figura 6: Sistema de inyección oxígeno / nitrógeno.

3. RESULTADOS

3.1 ENSAMBLE Y COMPONENTES DEL BANCO DE PRUEBAS

Se realizó el ensamble de cada una de las piezas que conforman el banco de pruebas. Para este aspecto se consideró la factibilidad de construcción de cada pieza, montaje y desmontaje de la muestra, y la facilidad para la realización de trabajos de mantenimiento y limpieza. El banco de pruebas está conformado por las diferentes partes que muestran en la Figura 7.

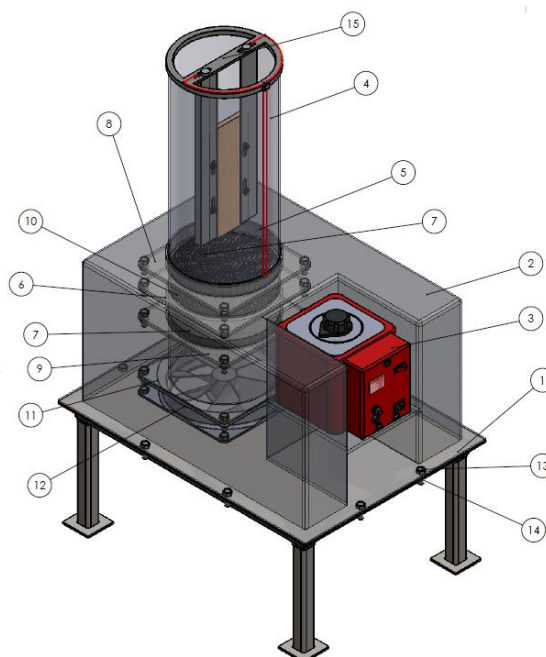


Figura 7: Componentes del banco de pruebas

Se reconocen a las diferentes piezas que constituyen al ensamble en función de cada número visible en la Figura 7. Posteriormente, se detalla en el siguiente listado cada una de sus partes:

1. Mesa
2. Protector de mesa
3. Regulador de Voltaje
4. Cámara de Prueba
5. Caucho
6. Ducto interno superior
7. Mallas Protectoras de Ventilador
8. Semi-ducto superior
9. Ducto interno intermedio
10. Honeycomb
11. Ducto interno inferior
12. Ventilador Axial
13. Perno M12X30 DIN 933 – 8.8
14. Tuerca M12 DIN 934 – 8.8
15. Porta-muestra

A continuación, se describe brevemente cada uno de los componentes que integran al banco de pruebas.

• Mesa

La base de la mesa está compuesta por una estructura de cuatro extremidades diseñadas con perfiles tubulares cuadrados de 40x40x4 mm en acero ASTM A36. La plancha que soporta el peso de los ductos será de 5 mm de espesor tomando en consideración las deformaciones ocasionadas producto del peso de los demás componentes que conforman al banco de pruebas. La carga total soportada por la plancha de la mesa es de 270 N. A continuación, en la Figura 8, se muestra el resultado de la simulación, mostrando una deformación máxima de 0.022 mm.

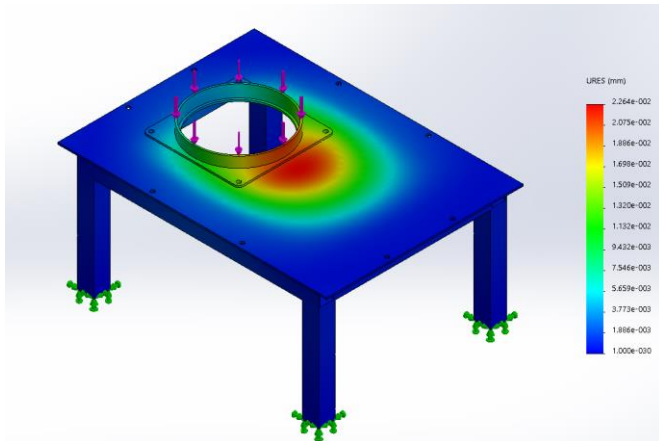


Figura 8: Simulación de carga estática mesa del banco de pruebas

- **Protector de mesa**

El protector de la mesa fue diseñado con la finalidad de que los componentes del ducto de aire se encuentren protegidos y que, durante la realización de la prueba, el operador se encuentre seguro en todo momento.

- **Regulador de Voltaje**

Se pretende hacer uso del regulador disponible, ya que provee de suficiente potencia a la resistencia para que ésta pueda generar la ignición de la muestra. El equipo en mención posee las siguientes características:

- Potencia de salida 2500 W
- Voltaje de entrada 110 V / 60 Hz
- Voltaje de salida 0 – 250 V
- Corriente de salida 0 – 10 A

- **Cámara de prueba**

La cámara de prueba es un ducto circular, el cual fue diseñado en vidrio de cuarzo con la finalidad de que soporte temperaturas de hasta 1100°C. Los cálculos realizados para determinar la temperatura de la cámara durante la combustión del material fueron realizados a través de un análisis de transferencia de calor. Los resultados mostraron que para un vidrio de espesor 5 mm, la máxima temperatura en su superficie es de 196.43°C, de esta manera, se asegura que el vidrio no presente fallas durante su operación.

- **Caucho**

Como medida de seguridad, durante el montaje y desmontaje de la cámara de vidrio, se incluyó un caucho, colocado en la sección superior (espesor de 2 mm), y en el porta-muestra (espesor despreciable), el cual cumplió con la función de evitar fracturas y daños al vidrio.

- **Ductos**

Fueron diseñados con la finalidad de contener y proteger los dispositivos principales de la cámara de prueba, estos incluyen al honeycomb y mallas protectoras para el ventilador (malla superior e inferior). El material de construcción seleccionado es el acero ASTM A36.

- **Honeycomb**

El dispositivo de reducción de turbulencia (Honeycomb) fue diseñado en base a los parámetros de diseño mencionados anteriormente. En general, las características que describen al honeycomb son:

- Material: Policarbonato
- Arreglo geométrico circular con un diámetro hidráulico de 9.5 mm.

- Colocado a una distancia de 20 cm con respecto al ventilador.

- **Malla protectora**

Dos mallas de acero fueron incluidas en el diseño del banco de pruebas, con el objetivo de proteger y evitar que caigan residuos de la muestra durante la combustión dentro del honeycomb y en el ventilador de tal manera que no se obstruya el paso del flujo de aire. Las dos mallas están colocadas dentro de los ductos, previamente mencionados.

- **Porta-Muestras**

El porta-muestras está conformado por los distintos componentes mostrados en la Figura 9.

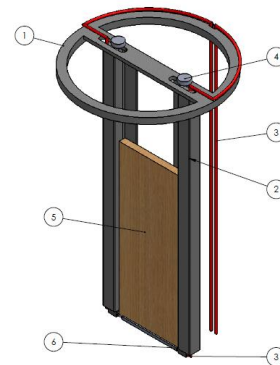


Figura 9: Componentes del Porta-muestra

A continuación, se detalla en el siguiente listado cada una de sus partes, según el número en la referencia:

1. Soporte superior del Porta-muestra
2. Varilla del soporte del Porta-muestra
3. Cables eléctricos
4. Pernos de sujeción
5. Probeta
6. Resistencia eléctrica

Posteriormente, se describen brevemente los componentes del porta-muestra.

- **Estructura del Porta-muestra:**

El porta-muestras se ajusta a los requerimientos para una ignición por una fuente regulada de voltaje, es decir, las dimensiones y geometría requerida. Además, se proporciona la facilidad de incorporar un cable eléctrico que se conecte directamente a la resistencia eléctrica en la parte inferior de la muestra.

El porta-muestra debe ser diseñado de tal forma que soporte temperaturas elevadas, superiores a los 500 °C. Es por este motivo que se ha decidido utilizar el acero AISI 4340 por su alto punto de fusión de 1427°C y su resistencia de 855 MPa. El factor de seguridad se determina a través de la Ecuación 7 que involucra el esfuerzo térmico al que es sometido la pieza y la resistencia propia del material.

$$\eta = \frac{\text{Resistencia}}{\text{Esfuerzo}} \quad (7)$$

El esfuerzo térmico fue calculado mediante un simulador, en donde se define que la máxima temperatura del porta-muestra en contacto con la muestra no supere los 500°C. En la Figura 10 se muestran las deformaciones provocadas por los esfuerzos térmicos, en estos resultados de la simulación están considerados como parámetros de entrada el tipo de material y el empotramiento en la parte superior del porta-muestra. De los resultados obtenidos se logró

determinar el esfuerzo de von Mises como 573 MPa y un factor de seguridad de $\eta=1.5$. Además se muestra una deformación máxima en la parte inferior de 1.8 mm.

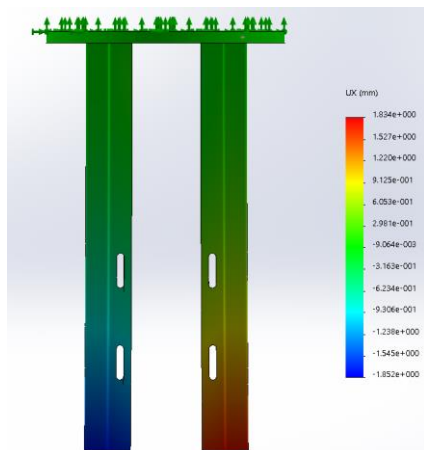


Figura 10: Simulación de deformación a causa de esfuerzos térmicos

• **La muestra:**

Las dimensiones de las muestras fueron previamente definidas en el capítulo anterior, por lo tanto, se consideran las medidas de ancho 120 mm, largo 300 mm y un espesor variable entre 10 a 25 mm.

Por otro lado, los materiales tomados en consideración para este trabajo fueron:

- Aglomerado
- PMMA
- Polipropileno
- Poliuretano

• **Conexiones eléctricas:**

De las pruebas realizadas con material aglomerado, se determinó que una resistencia de 25 ohmios operando a 110 V generaba el calor suficiente para provocar la ignición del material de prueba. En general, se recomienda utilizar una resistencia plana rectangular, para que se mantenga en contacto con la muestra en todo momento.

Otra recomendación tomada [6], es utilizar alambre de cromo níquel calibre No. 20 de valor nominal 2.3 ohmios por metro y suficientemente largo para envolver la muestra tres giros igualmente espaciados.

Finalmente se requiere utilizar un cable eléctrico de calibre No. 12 con aislamiento THW, el cual soporta hasta 250 V. El cable eléctrico conecta la resistencia con el regulador de voltaje.

3.2 SIMULACIÓN FLUJO CONTROLADO DENTRO DE LA CÁMARA DE PRUEBAS

Para la realización de las pruebas se desea mantener un flujo de aire constante en el interior de la cámara de pruebas, es por este motivo que se decidió hacer uso de un ventilador axial a la entrada del dispositivo que proporcionara dicho flujo. Sin embargo, se observa que el flujo de aire que desarrolla el ventilador posee turbulencias a lo largo de la cámara de pruebas. En la Figura 11, se muestran las turbulencias generadas tras la utilización del ventilador axial.

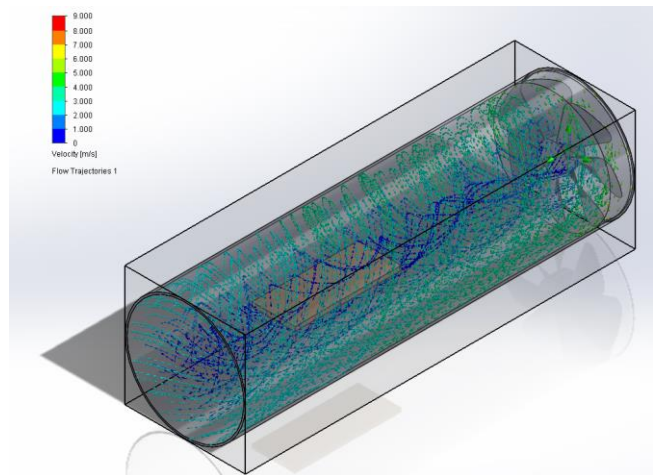


Figura 11: Simulación flujo de aire turbulento

Para corregir las turbulencias que se generan producto del ventilador axial, se utilizaron dispositivos que permitieran transformar el flujo de régimen turbulento a laminar, de tal manera que las líneas de corriente generadas en el interior de la cámara se encuentren igual espaciadas unas de otras y que la velocidad sea constante. Los dispositivos utilizados en el diseño incluyen un honeycomb y dos mallas, mismas que son utilizadas además para fines de protección en caso de que exista alguna caída de partículas del material de prueba durante la combustión. La primera malla se utilizará como seguridad únicamente para protección del ventilador, mientras que la segunda malla servirá como protección inicial para el honeycomb y el ventilador, ambas mallas serán ubicadas en los extremos del honeycomb. En la Figura 12 se muestra cómo los dispositivos de reducción de turbulencia logran cambiar el régimen de un flujo de turbulento a laminar con pérdidas mínimas de presión y velocidad. En la cámara de pruebas se obtuvo que la velocidad máxima permisible para régimen laminar es de 0.2661 m/s.

Tras el uso de los diferentes dispositivos de reducción de turbulencia, existen pérdidas de velocidad en el flujo de aire en dirección axial al ducto. A través de las simulaciones se logra observar la reducción de velocidades que ocasiona cada dispositivo tras el paso del aire por cada uno de ellos.

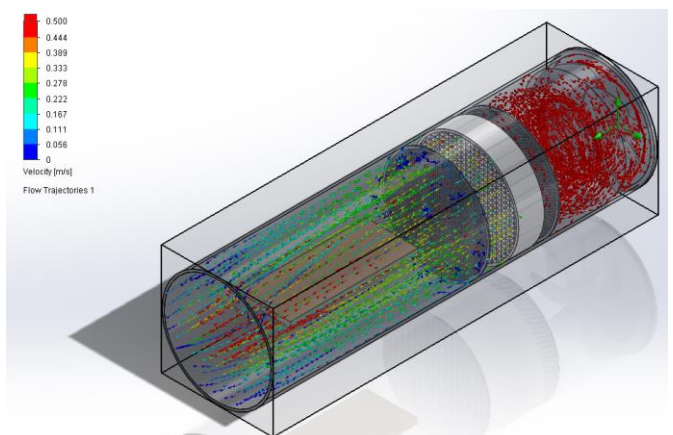


Figura 12 Simulación flujo de aire con el honeycomb y dos mallas protectoras

Inicialmente, se desea alcanzar una velocidad máxima media en el interior de la cámara de 0.2661 m/s, para esto fue necesario determinar a qué velocidad en RPM gira el

ventilador para que esto se cumpla. De los resultados de la simulación se concluye que para alcanzar esta velocidad es necesario que el ventilador opere a máximo 320 RPM, a fin de garantizar las condiciones de flujo laminar en la sección de la cámara de pruebas. En la Tabla 1 se observa en qué medida cada dispositivo utilizado reduce la velocidad axial del flujo cuando la muestra se encuentra en calentamiento.

TABLA 1: REDUCCIÓN PORCENTUAL DE VELOCIDAD TRAS EL PASO POR CADA DISPOSITIVO UTILIZADO

Dispositivo	Reducción [%]	Velocidad Entrada [m/s]	Velocidad Salida [m/s]
Malla Protectora Inferior	0.31	1.7	1.17
Honeycomb	0.57	1.15	0.5
Malla Protectora Superior	0.125	0.4	0.35

3.3 ANÁLISIS DE LOS NIVELES DE OXÍGENO

En condiciones normales el porcentaje de oxígeno corresponde a un 21% mientras que con la inyección de oxígeno este porcentaje puede aumentar hasta un 30% y, por otro lado, con la inyección de nitrógeno disminuir hasta un 15%.

Tal como se muestra en la Figura 13, se requiere de un flujo másico de oxígeno de 0 a 56 kg/h para que el porcentaje de oxígeno incremente de 21 a 30%. Una vez obtenido el flujo másico, se determinó que el flujo volumétrico del oxígeno variaba de 0 a 9.4 m³/h. A partir de este parámetro se logra definir qué capacidad debe de tener el tanque que suministra el gas y qué regulador de flujo másico debe ser seleccionado. De acuerdo a los resultados obtenidos, la capacidad del tanque de oxígeno debe ser de 7 m³ de tal forma que, tras el desarrollo de cada prueba, considerando un tiempo de prueba de 15 min, el consumo del tanque corresponda al que se muestra en la Tabla 2.

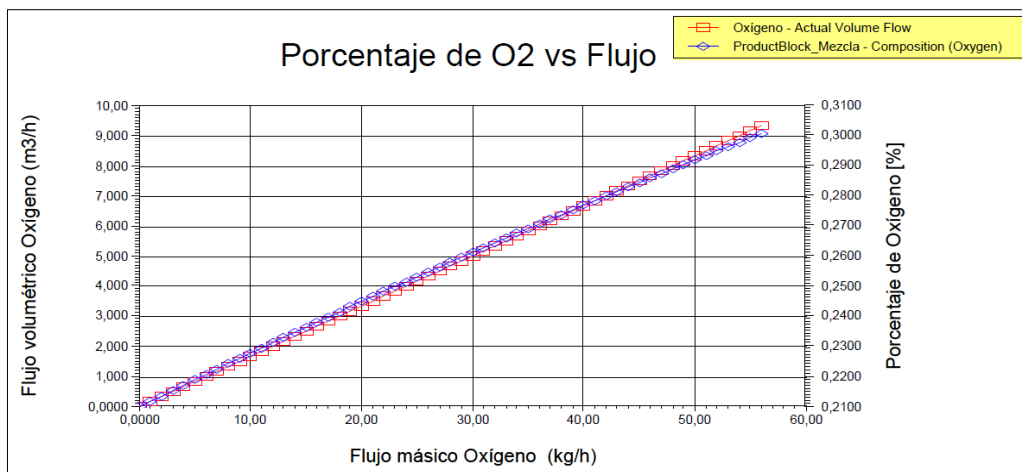


Figura 13: Relación de porcentaje de oxígeno en el flujo de aire, al introducir oxígeno

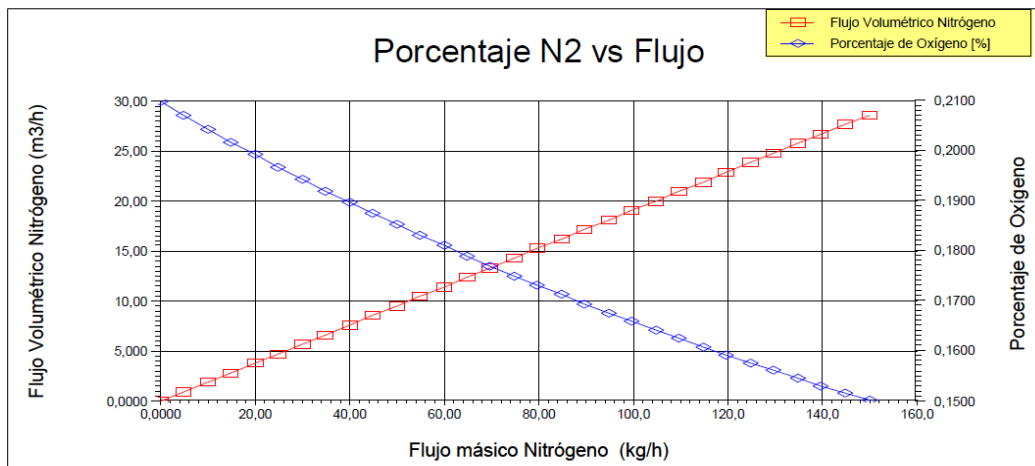


Figura 14: Relación de porcentaje de oxígeno en el flujo de aire, al introducir nitrógeno

En la Figura 14 se requiere de un flujo másico de nitrógeno de 0 a 150 kg/h para que el porcentaje de oxígeno disminuya desde el 21% hasta el 15%. Una vez obtenido el flujo másico, se determinó que el flujo volumétrico del nitrógeno variaba de 0 a 28 m³/h. A partir de este parámetro se logra definir qué capacidad debe de tener el tanque que suministra el gas y qué regulador de flujo másico debe ser seleccionado. De acuerdo a los resultados obtenidos, la capacidad del tanque de nitrógeno debe ser de 9 m³ de tal forma que, tras el desarrollo de cada prueba, considerando un

tiempo de prueba de 15 min, el consumo del tanque sea tal como se muestra en la Tabla 3.

TABLA 2: PORCENTAJE DE CONSUMO DE OXÍGENO TRAS CADA PRUEBA REALIZADA

Porcentaje Oxígeno (%)	Flujo volumétrico [m3/h]	Flujo volumétrico [L/min]	Tiempo de prueba [min]	Porcentaje de consumo	Número de pruebas
22	1	16.7	15	2.78%	36
23	2	33.3	15	5.56%	18
24	3	50	15	8.33%	12
25	4	66.7	15	11.11%	9
26	5	83.3	15	13.89%	7
27	6	100	15	16.67%	6
28	7	116.7	15	19.44%	5
29	8	133.3	15	22.22%	4
30	9	150	15	25.00%	4

TABLA 3: PORCENTAJE DE CONSUMO DE NITRÓGENO TRAS CADA PRUEBA REALIZADA

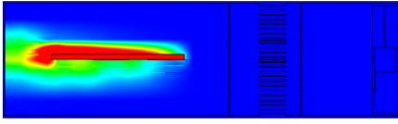
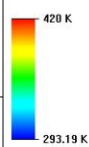
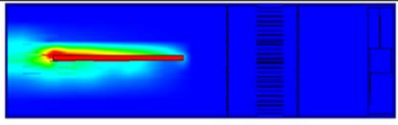
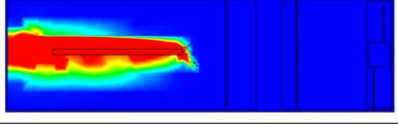
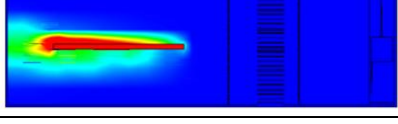
Porcentaje Oxígeno (%)	Flujo volumétrico [m3/h]	Flujo volumétrico [L/min]	Tiempo de prueba [min]	Porcentaje de consumo	Número de pruebas
20	3.5	58.3	15	9.72%	10
19	7.5	125	15	20.83%	4
18	11.5	191.7	15	31.94%	3
17	17.5	291.7	15	48.61%	2
16	22	366.7	15	61.11%	1
15	28	466.7	15	77.78%	1

3.4 ANÁLISIS DE RIESGO CON LOS MATERIALES DE PRUEBA

Para un seguro funcionamiento del banco de pruebas, fue necesario realizar una simulación mediante un programa de computador analítico, que probara el riesgo que pueden ocasionar distintos materiales, y cuáles de estos cumplen con las limitaciones propuestas, tales como, la tasa de liberación de calor y la temperatura máxima alcanzada dentro de la cámara de pruebas a causa de la combustión de dicho material. Para ello, con el simulador, fueron evaluados 4 materiales; PMMA, roble, poliuretano (elastómero) y polipropileno.

A continuación, en la Tabla 3.3 se muestran los resultados producto de la simulación realizada. Tomando como referencia los cálculos realizados a partir del material de prueba PMMA, se alcanza una temperatura máxima a la salida del ducto de 146.06 °C y una temperatura superficial de la cámara de 196°C.

TABLA 4: RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE SIMULACIÓN

No.	Material	Prueba simulación	Rango de temperatura
1	PMMA		
2	Madera (Roble)		
3	Polipropileno		
4	Poliuretano (elastómero)		

Adicionalmente, se procedió a calcular la tasa de liberación de calor para cada material probado durante la simulación, como se muestra en la Tabla 5. Este parámetro influye directamente en los cálculos realizados de la simulación. Como limitante se toma como referencia los resultados obtenidos del material PMMA, con una tasa de liberación de calor de 19.52 kW/m².

TABLA 5: TASA DE LIBERACIÓN DE CALOR PARA CADA MATERIAL PROPUESTO

No.	Material	Tasa de liberación de calor (kW/m ²)
1	PMMA	19.52
2	Madera (roble)	12.68
3	Polipropileno	32.84
4	Poliuretano (elastómero)	19

Finalmente, en la Tabla 6 se muestran las temperaturas máximas alcanzada por el flujo de aire a la salida del ducto, luego de cada simulación realizada. Y en la Tabla 7 se muestra la temperatura calculada en la superficie del vidrio. En este caso se comparan los resultados obtenidos de la simulación, con los cálculos realizados. Es importante mencionar que, durante los cálculos realizados, se asumieron distintos parámetros para obtener los resultados en el peor escenario posible.

TABLA 6: TEMPERATURA DEL AIRE A LA SALIDA DEL DUCTO

No.	Material	Temperatura simulada (°C)	Temperatura calculada (°C)
1	PMMA	110	142
2	Madera (roble)	70	109
3	Polipropileno	600	150
4	Poliuretano (elastómero)	90	140

TABLA 7: TEMPERATURA EN LA SUPERFICIE DEL VIDRIO

No.	Material	Temperatura máxima alcanzada (°C)
1	PMMA	196
2	Madera (roble)	143.45
3	Polipropileno	275
4	Poliuretano (elastómero)	188

4. CONCLUSIONES

Una vez realizadas las pruebas pertinentes, se lograron determinar los parámetros de funcionamiento del banco de pruebas. En este trabajo se determinó la velocidad y temperatura máxima de operación en el interior de la cámara de pruebas. Además se simuló el flujo necesario que se requiere para mantener un ambiente controlado de aire/oxígeno. Por último, se diseñó un dispositivo para reducir la turbulencia generada en la salida del ventilador para así obtener condiciones de flujo de aire en régimen laminar.

Dentro de la cámara de pruebas fue necesario que el flujo de aire se encontrara en régimen laminar. A partir de esta condición se determinó la velocidad máxima de 0.26 m/s para

la cual se mantiene un perfil de llama uniforme. La dirección del vector velocidad del flujo de aire es aleatoria y turbulenta a la salida del ventilador, por lo cual se utilizó un dispositivo reductor de turbulencia (honeycomb) con la finalidad de obtener un flujo con velocidad unidireccional en el sentido axial del ducto garantizando la uniformidad deseada.

Para el análisis del perfil de una llama es necesario mantener controlado la relación de flujo aire/oxígeno. Para variar el nivel de oxígeno en el aire en un rango de 15 a 30% se introdujo un flujo de oxígeno y nitrógeno además del flujo de aire producido por el ventilador. Dentro de una cámara de mezcla aire y oxígeno o nitrógeno se mezclan y como resultado se obtiene un flujo de aire con un nivel superior o inferior de oxígeno, respectivamente. Los flujos de oxígeno y nitrógeno fueron calculados en función a los porcentajes de oxígeno deseados en el aire. En el sistema de conexión tanque (O₂ y N₂) y cámara de pruebas se tuvo que analizar el diseño de tuberías para así seleccionar la correcta válvula reguladora de presión y su flujo de salida.

Se determinaron las temperaturas máximas en operación en la superficie del vidrio de la cámara de prueba. Con los materiales propuestos se obtuvo una temperatura máxima de 275°C, demostrando que el vidrio de cuarzo cumple con las limitaciones presentes para el funcionamiento.

La realización de los ensayos experimentales de la propagación de la llama, permitieron determinar el tipo de ignición de la muestra. Las pruebas no se realizaron en un ambiente controlado, pero sirvieron para mejorar el diseño del banco de pruebas.

Se discute incluir un sistema de medición de masa que permita conocer la pérdida de masa por unidad de área durante la ejecución de la prueba. Además, se recomienda colocar un extractor de tipo campana para el uso del banco de pruebas dentro de un laboratorio, debido a la liberación de gases producto de la combustión. Con el extractor, se recomienda incluir un sistema de medición de los gases liberados, para así medir el nivel de toxicidad y otros parámetros relevantes.

Es recomendable colocar termocuplas a lo largo de la muestra, para conocer las temperaturas alcanzadas durante la combustión, y así medir con exactitud las temperaturas de ignición y pirolisis de la muestra durante el ensayo experimental. Además, facilitará el cálculo para determinar la tasa de calor liberada.

El espacio de trabajo requerido para ubicar el banco de pruebas dentro de un laboratorio, incluyendo el posicionamiento de las dos cámaras de video, es de 0.87 x 1.08 m, y una altura de 1.24 m. el dimensionamiento del equipo fue desarrollado para realizar ensayos en muestras de ancho 12 cm, largo 30 cm, y espesor de 10 – 25 mm.

Es indispensable revisar el nivel de los tanques de oxígeno y nitrógeno antes de la realización de la prueba de tal forma que el contenido del gas que se requiera abastezca en su totalidad el periodo de prueba.

- [1] A. Atreya, "Ignition of fires," Michigan, The Royal Society, 1998, pp. 2787-2813.
- [2] A. S. Rangwala, "Flame Spread Analysis using a Variable B-Number," in *Fire Safety Science- Proceedings of the Ninth International, Worcester Polytechnic Institute, Department of Fire Protection Engineering*, 2006, pp. 243-254.
- [3] A. S. Rangwala, S. G. Buckley and J. L. Torero, "Verification of the constant B-number assumption while modeling flame spread," *Worcester Polytechnic Institute, Department of Fire Protection Engineering*, 2009, pp. 1-44.
- [4] P. J. DiNunno and W. D. Walton, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, vol. Section 3, National Fire Protection Association Quincy, Massachusetts; Society of Fire Protection Engineers Bethesda, Maryland, 2002.
- [5] S. McAllister, J.-Y. Chen and C. Fernandez, *Fundamentals of Combustion Processes*, New York: Springer New York, 2011.
- [6] NASA, Office of Space Transportation Systems, "Flammability, Offgassing, and Compatibility requirements and test procedures," in *NASA, Office of Space Transportation System, United States, NASA, Office of Space Transportation Systems*, 2008.
- [7] A. Muñoz Mejías, *Diseño y análisis computacional para túnel de viento de baja velocidad*, Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
- [8] F. M. White, "Flujo viscoso en conductos," in *Mecánica de Fluidos*, España, McGraw-Hill Inc., 2004, pp. 335-414.
- [9] NASA, Office of Space Transportation Systems, "Flammability, offgassing, and compatibility requirements and test procedures," in *NASA, Office of Space Transportation Systems, United States, NASA, Office of Space Transportation Systems*, 2008.