

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA
MEDIR LA VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN DE DIFERENTES
MATERIALES POLIMÉRICOS BAJO LA NORMA FMVSS 302.

RAFAEL ÁNGEL GIRALDO BROCHERO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PERERIA

2016

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS QUE MIDA
LA VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN DE DIFERENTES MATERIALES
POLIMÉRICOS BAJO LA NORMA FMVSS 302.

RAFAEL ÁNGEL GIRALDO BROCHERO

Trabajo de Investigación Formativa para optar al título de Ingeniero
Mecánico.

Director, Ing. Manuel Pinzón Candelario

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PERERIA

2016

ACEPTACIÓN

Ing. MANUEL PINZÓN CANDELARIO
DIRECTOR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo investigativo a mi madre por su valioso y constante apoyo durante mi carrera, a mi novia por su soporte durante todos los días de difíciles de trabajo y al Ing Manuel Pinzón por su dirección acertada en el trabajo Investigativo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
1. MARCO TEÓRICO.....	16
1.1 COMBUSTIÓN Y CALOR	16
1.1.1 Combustión.....	16
1.1.2 Combustión completa e incompleta	16
1.1.3 El aire y el combustible en la combustión	17
1.1.4 Estequiometría de la combustión.....	18
1.1.5 Calor y calor específico	18
1.1.6 Transferencia de calor y sus formas	18
1.1.7 Entalpía de formación y entalpía de combustión.....	19
1.1.8 Entalpía de reacción	20
1.1.9 Entalpía de formación.....	20
1.1.10 Sistema estacionario.....	20
1.1.11 Temperatura de flama adiabática	22
1.2 SOLDADURA	22
1.2.1 Soldadura.....	23
1.2.2 Cordón de soldadura	23
1.2.3 Metal de aporte.....	23
1.2.4 Unión de esquina.....	23
1.2.5 Unión a tope	23
1.2.6 Las Soldaduras De Ranura	24

1.2.7 Las Soldaduras De Filete	24
1.2.8 Soldadura por Arco o Eléctrica	24
1.2.9 Soldadura TIG	24
1.2.10 Soldadura MIG	25
1.3 NORMA FMVSS 302.....	25
1.3.1 Propósito y aplicación.....	25
1.3.2 Requisitos	25
1.3.3 Elementos para el ensayo.....	26
1.4 CALIDAD E INCERTIDUMBRE DEL ENSAYO	26
1.4.1 Repetibilidad.....	26
1.4.2 Reproducibilidad.....	27
1.4.3 Método promedios y rangos	27
2 DISEÑO	28
2.1 DISEÑO TERMODINÁMICO.....	28
2.1.1 Cálculo temperatura de flama adiabática	28
2.1.2 Análisis termodinámico	32
2.1.3 Consumo combustible	33
2.1.4 Análisis estequiométrico de la combustión.....	34
2.2 ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	36
2.2.1 Calor por convección	36
2.2.2 Calor por radiación	39
2.3 DISEÑO ESTRUCTURAL DEL BANCO DE PRUEBAS	40
2.3.1 Cámara de combustión.....	40
2.3.2 Porta probetas	43

2.3.3 Puerta lateral con vidrio	43
2.3.4 mechero Bunsen	43
3 CONSTRUCCIÓN.....	45
4 IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA PUNTO DEL ENSAYO.....	49
4.1 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO.....	50
4.2 ANÁLISIS DE REPRODUCIBILIDAD Y REPETIBILIDAD.....	52
4.3 FIBRA DE VIDRIO	53
5 ANÁLISIS DE DIFERENTES MATERIALES POLIMÉRICOS.....	61
5.1 POLIPROPILENO	61
5.1.1 Polipropileno (Espesor 0,5 mm)	61
5.1.2 Polipropileno (Espesor 3mm)	63
5.2 POLIETILENO	65
5.2.1 Polietileno de Baja Densidad	66
5.2.2 Polietileno de Alta Densidad.....	67
5.3 POLIESTIRENO	69
5.4 POLIURETANO	72
5.4.1 Poliuretano Densidad 15 [kg/m ³]	72
5.4.2 Poliuretano Densidad 20 [kg/m ³]	74
5.4.3 Poliuretano Densidad 26 [kg/m ³]	76
5.5 POLICLORURO DE VINILO PVC (Espesor 0,3 [mm])	78
5.6 POLIPIEL (Espesor 1,2 [mm])	80
5.7 POLIÉSTER	82
5.7.1 Poliéster 100%	83
5.7.2 Poliéster (65% algodón – 35% poliéster).....	84

5.8 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS DIFERENTES ESTIMACIONES DE VELOCIDAD Y COMBUSTIÓN DE LOS MATERIALES POLIMÉRICOS ENSAYADOS.....	86
5.8.1 Velocidades de combustión de los diferentes materiales poliméricos.....	86
5.8.2 Comportamiento de los diferentes materiales poliméricos durante la combustión.....	89
5.9 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	91
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	93
6.1 CONCLUSIONES.....	93
6.2 RECOMENDACIONES.....	94
BIBLIOGRAFÍA.....	96

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Valores de entalpía en el estado estándar CH₄. Tabla A-26, A-27 Anexos 2.</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 2. Valores de entalpía en el estado estándar C₃H₈. Tabla A-26, A-27 Anexos 2.</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 3. Coeficientes de exceso de aire.</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 4. Dimensiones del porta probetas. [9]</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 5. Datos fibra de vidrio Observador 1. (Autor)</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 6. Datos fibra de vidrio Observador 2. (Autor)</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 7. Velocidad de combustión Fibra de vidrio observador 1 y 2</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 8. Datos polipropileno espesor 0,5 mm. (Autor)</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 9. Datos polipropileno espesor 3 mm. (Autor)</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 10. Datos polietileno de baja densidad 0,2 [mm]. (Autor)</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 11. Datos polietileno de alta densidad 2,5 [mm]. (Autor)</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 12. Datos poliestireno expandido 9 [mm]. (Autor)</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 13. Datos poliuretano 15 [kg/m³]. (Autor)</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 14. Datos poliuretano 20 [kg/ m³]. (Autor)</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 15. Datos poliuretano 26 [kg/ m³]. (Autor)</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 16. Datos PVC espesor 0,3 [mm]</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 17. Datos polipiel espesor 1,2 [mm] (Autor)</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 18. Datos poliéster 35%. (Autor)</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 19. Velocidad de combustión de materiales poliméricos. (Autor)</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 20. Velocidades de combustión vs. norma FMVSS 302. (Autor)</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 21. Referencia de características de cada material polimérico durante la combustión. (Autor).</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 22. Características en la combustión de los materiales ensayados. (Autor)</i>	<i>90</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. A. Unión de Esquina, B. Unión a Tope, C. Soldadura Ranura, D. Soldadura Filete. [7].....	23
Figura 2. Combustión del gas natural (Autor).....	29
Figura 3. Combustión del gas propano. (Autor).....	30
Figura 4. Transferencia de calor en la cámara de combustión. $H=0,26$ m, $L=0,103$ m, $w=0,331$ m, $T_1=200$ °C, $T_2=22$ °C. (Autor).....	37
Figura 5. Secciones L1 y L2. (Autor).....	41
Figura 6. Base Inferior. (Autor).....	41
Figura 7. Tapa superior. (Autor).....	42
Figura 8. Cámara de combustión. (Autor).....	42
Figura 9. Dimensiones porta probetas. (Autor).....	43
Figura 10. Ubicación del mechero dentro de la cámara, dimensiones en [mm]. (Autor).....	44
Figura 11. Elementos mecanizados de la cámara de combustión. (Autor).	45
Figura 12. Secciones soldadas. (Autor).....	46
Figura 13. Abertura de entrada del porta probeta. (Autor).....	46
Figura 14. Porta probeta. (Autor).....	47
Figura 15. Puerta lateral. (Autor).....	48
Figura 16. Mechero Bunsen. (Autor).....	48
Figura 17. Tapa superior y puerta unidas a la cámara (autor).....	49
Figura 18. Cámara de combustión, mechero y porta probeta. (Autor).....	49
Figura 19. Cámara para ensayos bajo la norma FMVSS 302. (Autor).....	50
Figura 20. Montaje probeta en porta probeta. (Autor).....	50
Figura 21. Llama mechero Bunsen. (Autor).....	51
Figura 22. Inicio de llama en la probeta. (Autor).....	51
Figura 23. Probeta fibra de vidrio: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor).....	53
Figura 24. Probeta polipropileno 0,5 [mm]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor).....	62
Figura 25. Probeta polipropileno 3 [mm]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor).....	64
Figura 26. . Probeta polietileno de baja densidad 0,2 [mm]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor).....	66

<i>Figura 27. Probeta polietileno de alta densidad 2,5 [mm]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor).....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 28. Probeta poliestireno expandido 9 [mm]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor).....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 29. Probeta poliuretano 15 [kg/ m³]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor).....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 30. Probeta poliuretano 20 [kg/ m³]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor).....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 31. Probeta poliuretano 26 [kg/ m³]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor).....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 32. Probeta PVC espesor 0,2 [mm]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor)</i>	<i>79</i>
<i>Figura 33. Probeta polipiel espesor 1,2 [mm]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor).....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 34. Probeta poliéster 100 %</i>	<i>83</i>
<i>Figura 35. Probeta poliéster 35%: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor)</i>	<i>84</i>

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1: Norma FMVSS

ANEXO 2: Propiedades de combustibles e hidrocarburos comunes

ANEXO 3: Iteración y tablas de propiedades de gases ideales

ANEXO 4: Fichas técnicas materiales poliméricos

ANEXO 5: Ficha técnica acero inoxidable

ANEXO 6: Planos

ANEXO 7: Ficha técnica mechero Bunsen

ANEXO 8: Propiedades del aire a presión de 1 atm

ANEXO 9: Manual de Operación

RESUMEN

En el presente trabajo investigativo se diseñó y construyó un banco de pruebas para medir la velocidad de combustión de diferentes materiales poliméricos bajo la norma FMVSS 302. Inicialmente se despliega la fundamentación teórica necesaria relacionada con el estudio.

Posteriormente se realiza el diseño del banco de pruebas, iniciando con un análisis térmico que determinó el calor requerido dentro del banco para mantener las condiciones de la norma FMVSS 302. Como parámetro de diseño para lograr éste análisis se usó la temperatura de combustión del nailon, el cual es considerado como uno de los materiales más críticos en revestimientos internos para vehículos, debido a que presenta un mayor punto de inflamación [11].

Seguidamente se presenta la construcción del banco de pruebas; conformado por un gabinete metálico cerrado, para proteger las probetas del ensayo de cualquier corriente de aire que pueda afectar el mismo, una ventana de observación de cristal en la parte frontal, una abertura que se pueda abrir y cerrar para permitir la inserción del soporte de la probeta, un orificio para acomodar un mechero a gas, un porta probeta en forma de U, y para permitir la ventilación cuenta en la parte superior del gabinete con un espacio libre de $\frac{1}{2}$ in y diez orificios en la parte inferior del gabinete. [9].

Después de la construcción del banco de pruebas, se realizó la implementación y puesta a punto del ensayo en la que se usó como material de validación la fibra de vidrio con resina poliéster P 2530-A. Se realizaron cinco ensayos con cada uno de estos materiales, con el fin de garantizar repetibilidad y reproducibilidad en los mismos y obtener valores iguales o semejantes de velocidad de combustión de cada material, así mismo, con lo anterior se obtuvo un error del dispositivo necesario para mediciones de materiales futuros.

Seguido a la puesta a punto, se continuó con el ensayo y análisis de diferentes materiales poliméricos bajo la norma FMVSS 302. Para cada ensayo se registró; el tipo de material, la temperatura y humedad relativa y los tiempos de combustión de cada uno, con el fin de recabar datos de calidad que permitieron hacer el análisis, con el que se clasificaron los datos y se obtuvieron las gráficas del comportamiento de la velocidad de combustión de cada material. Finalmente se realizaron las comparaciones necesarias entre los distintos materiales, de acuerdo al índice de velocidad de combustión obtenido para cada uno.

INTRODUCCIÓN

La industria se encuentra constantemente en la búsqueda de desarrollo y evolución de los procesos de producción, para el mejoramiento de la calidad, eficiencia y la productividad. Por ende, muchos sectores estratégicos entre ellos el sector automotriz, el textil, el de la construcción, entre otros, requieren la implementación de mejores prácticas acordes a las necesidades del mercado, sobre todo en calidad y seguridad.

Uno de los requerimientos permanentes, es la utilización de materiales que cumplan con los requisitos para la resistencia a la combustión, para ello, con la intención de cubrir esta necesidad se plantea el diseño y construcción de un banco de pruebas para medir la velocidad de combustión bajo la norma FMVSS 302, que permita analizar el comportamiento de inflamabilidad de los distintos materiales utilizados en la industria automotriz y textil. La inflamabilidad de un material está dada por la capacidad de este, para iniciar la combustión, la combustión no es más que una reacción química durante la cual se oxida un combustible y se libera cierta cantidad de energía, el oxidante usado con mayor frecuencia en este proceso es el aire [1]. Al tener el conocimiento del comportamiento de inflamabilidad de los materiales se busca prevenir accidentes causados por incendios que puedan poner en riesgo la seguridad de las personas y los bienes en general.

En la industria automotriz se hace necesario contar con un instrumento que permita conocer y visualizar el comportamiento de inflamabilidad de los diferentes materiales usados en dicha industria. La falta de este instrumento causa que muchos fabricantes omitan este ensayo o se limiten a la información que su proveedor les brinda. El uso de este instrumento y los resultados de este estudio, servirán como base para tomar decisiones en cuanto a mejora de diseños, seguridad y uso de materiales más idóneos, que reduzcan los accidentes causados por incendios dentro de los vehículos o en materiales textiles. El desconocimiento de este tipo de comportamiento en los materiales, dificultaría el mejoramiento en diseños de partes de automotores, causando de igual forma mayor inseguridad en los mismos. Por otro lado, se ralentizaría el conocimiento de las posibles causas y planteamiento de soluciones de accidentes de incendios que generan pérdidas de vidas humanas y/o materiales. A lo anteriormente mencionado, es imposible no sumarle ahorros monetarios reflejados en piezas no sobre dimensionadas, piezas que garanticen los más altos estándares de calidad y de seguridad; estas dos últimas cualidades importantísimas en cualquier industria moderna.

Haciendo uso del banco de pruebas construido, se ensayaron diferentes materiales poliméricos usados cotidianamente en la industria, tales como plásticos, telas y fibra de vidrio, esta última es usada en una alta proporción en la manufactura automotriz. Desarrollando un análisis estadístico con el número escogido de probetas para cada material, se llegó a un valor experimental de la velocidad de combustión de cada uno de ellos, conjuntamente se hicieron observaciones del comportamiento de cada uno de los materiales escogidos ante la presencia del fuego.

Con el presente trabajo se pretende dotar a la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira de un banco de pruebas que permita el análisis del comportamiento de inflamabilidad de diferentes materiales bajo la norma FMVSS 302.

En virtud de lo anteriormente mencionado, para el presente trabajo se formuló como objetivo general, diseñar y construir un banco de pruebas para medir la velocidad de combustión de diferentes materiales poliméricos como polyester, poliuretano, PVC, polietileno, polipropileno, bajo la norma FMVSS 302.

Y como objetivos específicos:

- Diseñar y construir un banco de pruebas bajo la norma FMVSS 302.
- Implementar el ensayo de inflamabilidad y puesta a punto del banco de pruebas bajo la norma FMVSS 302.
- Analizar y comparar la velocidad de combustión de diferentes materiales poliméricos, por ejemplo polyester, poliuretano, PVC, polietileno, polipropileno, bajo la norma FMVSS 302.

1. MARCO TEÓRICO

En los siguientes numerales se entregarán definiciones necesarias para realizar el diseño y construcción del banco de pruebas.

1.1 COMBUSTIÓN Y CALOR

La combustión y el calor son dos conceptos de relevancia durante el diseño del banco de pruebas, debe tenerse referencia del tipo de combustión presente dentro del banco de pruebas y la manera como se transfiere el calor a través de él, en los siguientes numerales se explicarán éstos conceptos.

1.1.1 Combustión

Cuando tiene lugar una reacción química, los enlaces de las moléculas de los reactivos se rompen, y los átomos y electrones se reagrupan para formar los productos. En las reacciones de combustión, la oxidación rápida de los elementos reactivos del combustible trae como consecuencia la liberación de energía al formarse los productos de la combustión. Los tres elementos activos más importantes en los combustibles habituales son el carbono, el hidrogeno y el azufre. [2]

1.1.2 Combustión completa e incompleta

Para efectos teóricos es muy útil estudiar la combustión, con la suposición de que dicha combustión es completa. La combustión está completa si todo el carbono en el combustible se transforma en CO₂, todo el hidrógeno se transforma en H₂O y todo el azufre (si lo hay) se transforma en SO₂. Esto es, todos los componentes combustibles de un combustible se queman totalmente durante un proceso de combustión. Por el contrario, un proceso de combustión es incompleto si los productos de combustión contienen algo de combustible o componentes no quemados, como C, H₂, CO, o bien, OH. [1]

1.1.3 El aire y el combustible en la combustión

En la mayoría de los procesos de combustión es el aire el que proporciona el oxígeno necesario para la misma. Para efectos prácticos de cálculo todos los componentes distintos del aire y del nitrógeno se incluyen junto a este último. Con esta idealización, la relación molar entre nitrógeno y oxígeno es $0,79/0,21 = 3,76$. Por tanto, cuando el aire suministra el oxígeno en una reacción de combustión, cada mol de oxígeno va acompañado de 3,76 moles de nitrógeno. [2] El aire en una combustión está íntimamente relacionado con el combustible, ya que existe un factor de cálculo para cada combustión llamado relación de aire combustible (AC) es una cantidad utilizada en el análisis de procesos de combustión para cuantificar las cantidades de combustible y aire. Suele expresarse en una base de masa y se define como la proporción entre la masa de aire y la masa de combustible en un proceso de combustión, esta expresada por la ecuación 1. [3]

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Cualquier material que puede quemarse para liberar energía recibe el nombre de combustible. La mayoría de los combustibles conocidos se componen principalmente de hidrógeno y carbono. Reciben el nombre de combustibles hidrocarburos y se denotan por la fórmula general $C_x H_y$. Los combustibles hidrocarburos existen en todas las fases, y algunos son el carbón, la gasolina y el gas natural y propano. [1] El consumo de combustible en una combustión está expresado por la ecuación 2. [3]

$$\dot{m}_{combustible} = \frac{\dot{Q}}{\eta * LHV} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,

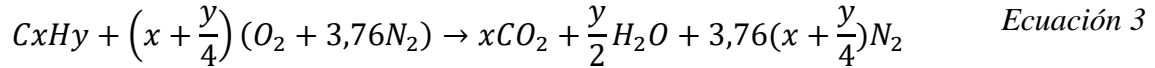
η : Eficiencia de la Combustión

LHV: Calor Específico de Baja

Q: Calor de la combustión por unidad de tiempo

1.1.4 Estequiometría de la combustión

En el estudio de un proceso de combustión para efectos prácticos, se asume una combustión completa (teórica), lo cual permite usar la ecuación 3, para un combustible hidrocarburo de la forma C_xH_y , el balance de esta ecuación química es realizado por el principio de la conservación de la masa. [3]



1.1.5 Calor y calor específico

El calor (Q) se define como la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas (o entre un sistema y el exterior) debido a una diferencia de temperatura. Es decir, una interacción de energía será calor sólo si ocurre debido a una diferencia de temperatura. Entonces se deduce que no puede haber ninguna transferencia de calor entre dos sistemas que se hallan a la misma temperatura; el calor específico (C_p) se define como la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia. En general, esta energía depende de cómo se ejecute el proceso, Estos dos conceptos se relacionan por medio de la ecuación 4. [1] Al no existir trabajo mecánico en el proceso de combustión, este queda como un simple cambio de temperatura, el cambio de entalpía por cada grado de variación corresponde a la capacidad calorífica del sistema a presión constante, lo cual transforma la ecuación 4 en la ecuación 5.

$$h_2 - h_1 = C_p(T_2 - T_1) \quad \text{Ecuación 4}$$

$$Q = C_p(T_2 - T_1) \quad \text{Ecuación 5}$$

1.1.6 Transferencia de calor y sus formas

La transferencia de calor es aquella ciencia que busca predecir la transferencia de energía que puede ocurrir entre diferentes materiales, como resultado de una diferencia de temperatura. La

termodinámica enseña que esta transferencia de energía se define como calor. [4] Existen tres formas distintas de transferencia de calor que son:

- **Conducción**, es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. [5]
- **Radiación**, es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor.[5]
- **Convección**, es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura.[5]

1.1.7 Entalpía de formación y entalpía de combustión

Durante una reacción química se rompen y se crean enlaces químicos que unen a los átomos en las moléculas. La energía química relacionada a estos enlaces es diferente para los reactivos y los productos. De tal manera, un proceso que implica reacciones químicas implicará cambios en las energías químicas. Si se supone que los átomos de cada reactivo permanecen intactos y se ignora cualquier cambio en las energías cinéticas y potencial, el cambio de energía de un sistema durante una reacción química se deberá a un cambio en el estado, y a un cambio en la composición química. De tal forma que:

$$\Delta E_{sistema} = \Delta E_{Estado} + \Delta E_{Química} \quad \text{Ecuación 6}$$

Por consiguiente, cuando los productos formados durante una reacción química salen de la cámara de reacción en el estado de entrada de los reactivos, se tiene $\Delta E_{Estado} = 0$ y, en este caso, el cambio de energía del sistema se debe tan sólo a los cambios de su composición química. Por lo tanto, se

puede elegir cualquier estado como el estado de referencia y asignar un valor cero a la energía interna o entalpía de una sustancia en ese estado. Cuando un proceso no implica cambios en la composición química, el estado de referencia elegido no tiene efecto en los resultados. Sin embargo, cuando los procesos implican reacciones químicas, la composición del sistema al final de un proceso ya no es la misma que al inicio del mismo. En este caso es necesario tener un estado de referencia común para todas las sustancias. El estado de referencia elegido es 25 °C (77 °F) y 1 atm, que se conoce como estado de referencia estándar. Los valores de las propiedades en el estado de referencia estándar se indican mediante un superíndice (°) (como h° y u°). [1]

1.1.8 Entalpía de reacción

Es la diferencia de los productos en un estado especificado y la entalpía de los reactivos en el mismo estado para una reacción completa, en un proceso de combustión esta entalpía se conoce como entalpía de combustión, ecuación 7. [2]

$$h_R = h_c = H_{\text{productos}} - H_{\text{reactivos}} \quad \text{Ecuación 7}$$

1.1.9 Entalpía de formación

Propiedad que representa la energía química de un elemento o compuesto en algún estado de referencia, indicado la entalpía en un estado especificado debido a su composición química, se denota de la forma \bar{h}_f . [1]

1.1.10 Sistema estacionario

Se debe expresar la entalpía de tal manera que sea relativa al estado de referencia estándar y que el término de la energía química aparezca explícitamente. Cuando se expresa de manera adecuada, el término de entalpía debe reducirse a la entalpía de formación (\bar{h}_f°) en el estado de referencia estándar.

De tal forma que se puede expresar así: [1]

$$H = \overline{h_f^o} + (\bar{h} - \bar{h}^o) \quad \text{Ecuación 8}$$

Asumiendo cambios de energía cinética y potencial despreciables se tiene:

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sal} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\dot{Q}_{ent} + \dot{W}_{ent} + \sum \dot{n}_r(\overline{h_f^o} + (\bar{h} - \bar{h}^o))r = \dot{Q}_{sal} + \dot{W}_{sal} + \sum \dot{n}_p(\overline{h_f^o} + (\bar{h} - \bar{h}^o))p \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde \dot{n}_r y \dot{n}_p son las razones de flujo molar del producto p y el reactivo r
Al dividir la ecuación 10 por la razón de flujo molar del combustible se tiene:

$$Q_{ent} + W_{ent} + \sum N_r(\overline{h_f^o} + (\bar{h} - \bar{h}^o))r = Q_{sal} + W_{sal} + \sum N_p(\overline{h_f^o} + (\bar{h} - \bar{h}^o))p \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde N_r y N_p representan el número de moles del reactivo r y el producto p por mol de combustible. Asumiendo transferencia de calor y trabajo como valores positivos en la ecuación 11 la misma se puede reescribir así:

$$Q - W = \overline{h_c^o} + \sum N_p(\bar{h} - \bar{h}^o)p - \sum N_r(\bar{h} - \bar{h}^o)r \quad \text{Ecuación 12}$$

Simplificando más:

$$Q - W = H_{\text{productos}} - H_{\text{reacción}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

$$H_{\text{productos}} = \sum N_p(\bar{h} - \bar{h}^o)p \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kmol de comb.}} \right]$$

$$H_{\text{reacción}} = \sum N_r(\bar{h} - \bar{h}^o)r \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kmol de comb.}} \right]$$

Un proceso de combustión generalmente involucra salida de calor, por lo tanto, se tiene:

$$Q_{sal} = \sum N_r(\overline{h_f^o} + \bar{h} - \bar{h}^o)r - \sum N_p(\overline{h_f^o} + \bar{h} - \bar{h}^o)p \quad \text{Ecuación 14}$$

1.1.11 Temperatura de flama adiabática

En ausencia de trabajo y cambios en las energías cinética y potencial, la energía química liberada durante un proceso de combustión se pierde como calor hacia los alrededores o se usa internamente para elevar la temperatura de los productos de combustión. A menor pérdida de calor, mayor resulta el aumento de la temperatura. En el estado ideal que no exista pérdida de calor hacia los alrededores ($Q = 0$), la temperatura de los productos alcanzará un máximo, conocido como temperatura de flama adiabática o de combustión adiabática. La temperatura de flama adiabática de un proceso de combustión de flujo estacionario se determina de la ecuación 13 al establecer $Q=0$ y $W = 0$. Con lo cual se deduce la ecuación 15. [1]

$$H_{prod.} = H_{react.} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\sum N_p(\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_p = \sum N_r(\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_r \quad \text{Ecuación 16}$$

Determinados los reactivos y sus estados, resulta fácil determinar la entalpía de los reactivos H_{react} pero debido a que la temperatura de los productos no se conoce antes de los cálculos, el cálculo de la entalpía de los productos H_{prod} no es directo. Por consiguiente, la determinación de la temperatura de flama adiabática requiere el uso de una técnica iterativa. [1]

1.2 SOLDADURA

El proceso de soldadura es una actividad que conlleva un sin número de conceptos que en el momento de realizar el armado de un elemento, deben estar lo suficientemente claros para evitar confusiones tanto por quien diseña como por quien hace el armado, por lo tanto, a continuación se entregan las definiciones necesarias para realizar un diseño y armado satisfactorio.

1.2.1 Soldadura

Es una coalescencia localizada de metales o no metales producidos por el calentamiento de materiales para la temperatura de la soldadura, con o sin la aplicación de presión o por las aplicaciones solo de presión y con o sin el uso de material de aporte. [6]

1.2.2 Cordón de soldadura

Es una soldadura resultante de una pasada. [6]

1.2.3 Metal de aporte

Es el metal o la aleación que debe agregarse para hacer una soldadura, una unión soldada o una unión soldada en fuerte. [6]

1.2.4 Unión de esquina

Es una unión entre dos componentes colocados aproximadamente en ángulos rectos entre sí en forma de L, figura 1. [6]

1.2.5 Unión a tope

Esta es una unión entre dos componentes alineados aproximadamente en el mismo plano, figura 1. [6]

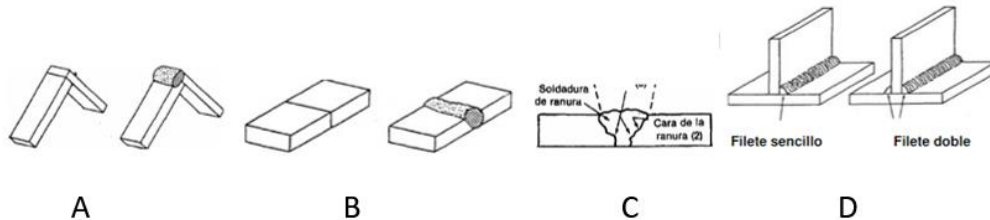


Figura 1. A. Unión de Esquina, B. Unión a Tope, C. Soldadura Ranura, D. Soldadura Filete. [7]

1.2.6 Las Soldaduras De Ranura

Se realiza entre el espacio que queda entre dos piezas de metal. Estas soldaduras se emplean en muchas combinaciones dependiendo de la accesibilidad, de la economía, del diseño, y del tipo de proceso de soldadura que se aplique, figura 1. [7]

1.2.7 Las Soldaduras De Filete

Son similares a las de ranura, pero se hacen con mayor rapidez que éstas. Las juntas soldadas de filete son simples de preparar desde el punto de vista de preparación y ajuste de borde, aunque a veces se requieran de más soldadura que las juntas soldadas de ranura, figura 1. [7]

1.2.8 Soldadura por Arco o Eléctrica

Como el nombre lo sugiere, es un arco eléctrico que se establece entre las partes a soldar y un electrodo metálico. La energía eléctrica, convertida en calor, genera una temperatura en el arco cerca de 5,500 grados centígrados (10,000 F), causando la fundición de los metales y después la unión. [8]

1.2.9 Soldadura TIG

La sigla TIG corresponde a las iniciales de las palabras inglesas "Tungsten Inert Gas", lo cual indica una soldadura en una atmósfera con gas inerte y electrodo de tungsteno. El procedimiento TIG puede ser utilizado en uniones que requieran alta calidad de soldadura y en soldaduras de metales altamente sensibles a la oxidación, su uso más frecuente está dado en aceros resistentes al calor, aceros inoxidable y aluminio. Este método de soldadura se caracteriza también por la ausencia de salpicaduras y escorias (lo que evita trabajos posteriores de limpieza) y por su aplicabilidad a espesores finos (desde 0,3 mm). Cabe destacar que la soldadura TIG puede ser utilizada con o sin material de aporte. Las mayores ventajas del proceso TIG provienen de la estabilidad y la

concentración del arco; además del hecho de que sea factible de utilizar en todas las posiciones y tipos de juntas y del buen aspecto del cordón (con terminaciones suaves y lisas). [8]

1.2.10 Soldadura MIG

La Soldadura con arco eléctrico y gas, es un proceso en el cual el electrodo es un alambre metálico desnudo consumible y la protección se proporciona inundando el arco eléctrico con un gas. El alambre desnudo se alimenta en forma continua y automática desde una bobina a través de una pistola de soldadura. [8]

1.3 NORMA FMVSS 302

La intención de esta norma es reducir las muertes y las heridas a los ocupantes de los vehículos causadas por incendios vehiculares, especialmente aquellos que se originan en el interior del vehículo debido a fuentes tales como fósforos o cigarrillos, la norma se encuentra en el anexo 1.

1.3.1 Propósito y aplicación

La Oficina de Cumplimiento en Seguridad de Vehículos por sus siglas en inglés OVSC, proporciona los procedimientos para realizar los ensayos que determinen si un vehículo específico o elemento dentro del mismo, cumple con ciertos requisitos mínimos del Estándar Federal de Seguridad de Vehículos Motorizados por sus siglas en inglés FMVSS. Esta norma se aplica a los vehículos de pasajeros, los vehículos de pasajeros multipropósito, camiones y buses. [9]

1.3.2 Requisitos

Esta norma especifica los requisitos para la resistencia a la combustión de los materiales utilizados en los compartimientos para ocupantes de los vehículos a motor. Los elementos a ensayar recomendados por la norma son: cojines de los asientos, espaldar de los asientos, cinturones, revestimiento, parte superior convertible, apoya brazos, todos los paneles decorativos incluyendo

los paneles de la puerta, frontal, posterior y lateral, anaqueles en el compartimiento, apoyacabezas, cubiertas del suelo, viseras, cortinas, persianas, cubiertas para las llantas, cubiertas para el compartimiento del motor, cubiertas para colchón y todos los demás materiales interiores, incluyendo elementos para acolchado y de despliegue en accidentes, que se diseñan para absorber energía al contacto con los ocupantes en el caso de accidente. Todos estos materiales para satisfacer la norma deben tener una velocidad de combustión menor a 4 [in/min]. [9]

1.3.3 Elementos para el ensayo

La norma especifica que el banco de pruebas debe ser una estructura en acero inoxidable, que cuente con un soporte con forma de U que funcione como porta probetas, y como medio de ignición de la llama un mechero Bunsen que quemé gas natural u otro gas que iguale el poder calorífico del gas natural. Las medidas del banco de prueba tanto de ubicación de los accesorios de éste, como de geometría del mismo están debidamente referenciadas en el anexo 1.

1.4 CALIDAD E INCERTIDUMBRE DEL ENSAYO

Con el fin de determinar la confiabilidad del ensayo se aplicaron los siguientes métodos, que den validez experimental a la cámara de combustión como instrumento de medida de la velocidad de combustión de diferentes materiales poliméricos.

1.4.1 Repetibilidad

Cercanía entre los resultados de mediciones sucesivas de la misma magnitud por medir, efectuadas en las mismas condiciones de medición. Las condiciones de repetibilidad incluyen: el mismo procedimiento de medición, el mismo observador, el mismo instrumento de medición utilizado en las mismas condiciones, el mismo lugar y repetición dentro de un período de tiempo corto. [13].

1.4.2 Reproducibilidad

Cercanía entre los resultados de las mediciones de la misma magnitud por medir, efectuada bajo condiciones de medición diferentes. Para que una expresión de la reproducibilidad sea válida, es necesario especificar las condiciones que cambian. Las condiciones que cambian pueden ser entre otras: El principio de medición, el método de medición, el observador, el instrumento de medición, el patrón de referencia, el lugar, las condiciones de uso y el tiempo. [13].

1.4.3 Método promedios y rangos

Este método determina la repetibilidad y la reproducibilidad para un sistema de medición, este método permite descomponer la variabilidad del sistema en dos componentes independientes: la repetibilidad y la reproducibilidad. [13] Por medio de este método se puede determinar que tan aceptable es el método de medición.

2 DISEÑO

El diseño se inicia determinando las temperaturas críticas que permitan elegir el acero idóneo y el tipo de vidrio necesario para construir el banco de pruebas, con base a lo anterior se determina la manera más óptima de realizar el armado.

2.1 DISEÑO TERMODINÁMICO

Por medio de un análisis de temperaturas de flama adiabáticas se determina la poca diferencia porcentual entre el gas natural y el gas propano lo cual permite usar este último como combustible para el ensayo, haciendo un análisis termodinámico y estequiométrico de la combustión se determinan calores y temperaturas dentro de la cámara.

2.1.1 Cálculo temperatura de flama adiabática

La norma FMVSS 302 recomienda como gas a usar por el mechero el gas natural (CH_4), debido a la falta de una conexión de gas natural en la Facultad de Ingeniería Mecánica, se hará el cálculo de la temperatura de flama adiabática del gas natural (CH_4) y de la temperatura de flama adiabática del gas propano (C_3H_8) y se compararán éstas para validar el uso de la última mencionada.

Para el gas natural (CH_4): Se plantea el proceso de combustión como un proceso de flujo estacionario; la cámara de combustión se asume adiabática, no existe ninguna forma de trabajo en el proceso, el aire y los gases de la combustión son gases ideales, los cambios en las energías cinéticas y potenciales son despreciables y se designa un estado de referencia que coincida con el estado de referencia estándar, con lo cual se tiene un sistema que coincide con la figura 2.

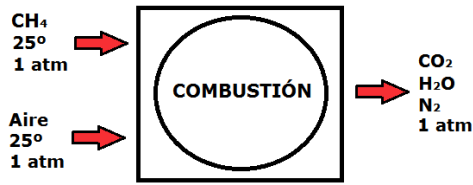
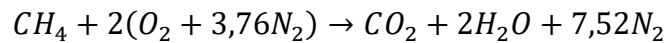


Figura 2. Combustión del gas natural (Autor)

Por medio de la ecuación 3 se hace el balance estequiométrico de la reacción y se balancea.



Ecuación 17

Tabla 1. Valores de entalpía en el estado estándar CH_4 . Tabla A-26, A-27 Anexos 2.

	$\bar{h}_f^o \left[\frac{kJ}{kmol} \right]$	$\bar{h}^o \left[\frac{kJ}{kmol} \right]$
CH_4	- 74,850	-----
O_2	0	8,682
N_2	0	8,669
CO_2	- 393,520	9,364
H_2O	-241,820	9,904

Reemplazando los valores de la tabla 1 en la ecuación 16 con el número de moles correcto obtenido en la ecuación 17.

$$-393,520 + h_{CO_2} - 9,364 + 2(-241,820 + h_{H_2O} - 9,904) + 7,52(h_{N_2} - 8,669) = -74,850$$

$$h_{CO_2} + 2h_{H_2O} + 7,52h_{N_2} = 896,672$$

Ecuación 18

Al iterar en la ecuación 18 y haciendo las debidas interpolaciones se obtiene. (Anexo 3)

$$\left. \begin{aligned} h_{CO_2} &= 120,716 \left[\frac{kJ}{kmol} \right] \\ h_{H_2O} &= 99,655 \left[\frac{kJ}{kmol} \right] \\ h_{N_2} &= 76,677 \left[\frac{kJ}{kmol} \right] \end{aligned} \right\} \text{ para una temperatura de } 2327,5 \text{ k}$$

Remplazando estos valores en la ecuación 18 se tiene:
 $120,7158 + (2 * 99,654) + (7,52 * 76,677) \Rightarrow 896,635$

Con el resultado que entrega la ecuación 18 se calcula un error porcentual

$$E\% = \left[\frac{896,672 - 896,635}{896,672} \right] * 100\%$$

$$E\% = 0,004 \% \approx 0$$

Por lo cual la temperatura de flama para el gas natural será:

$T_{f \text{ gas natural}} = \begin{matrix} 2327,5 \text{ K} \\ 2054,3 \text{ }^\circ\text{C} \end{matrix}$

Para el gas propano (C₃H₈): Se tienen las mismas condiciones planteadas con el gas natural. Con lo cual se tiene un sistema que coincide con la figura 3.

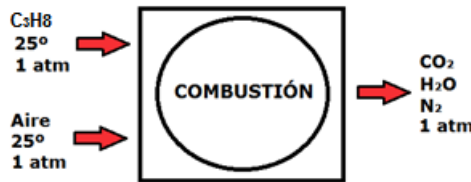


Figura 3. Combustión del gas propano. (Autor)

Por medio de la ecuación 3 se hace el balance estequimétrico de la reacción y se balancea.

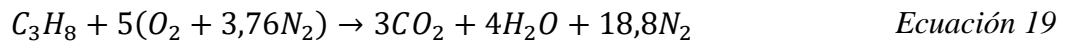


Tabla 2. Valores de entalpía en el estado estándar C₃H₈. Tabla A-26, A-27 Anexos 2.

	$\bar{h}_f^\circ \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right]$	$\bar{h}^\circ \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right]$
C ₃ H ₈	- 103,850	-----
O ₂	0	8,682
N ₂	0	8,669
CO ₂	- 393,520	9,364
H ₂ O	-241,820	9,904

Reemplazando los valores de la tabla 2 en la ecuación 16 con el número de moles correcto obtenido en la ecuación 18.

$$-(3 * 393,520) + 3h_{CO_2} - (3 * 9,364) - (4 * 241,820) + 4h_{H_2O} - (4 * 9,904) + 18,8h_{N_2} - (18,8 * 8,669) = -103,850$$

$$3h_{CO_2} + 4h_{H_2O} + 18,82h_{N_2} = 2274,675$$

Ecuación 20

Al iterar en la ecuación 20 y haciendo las debidas interpolaciones se obtiene. (Anexo 3)

$$\left. \begin{array}{l} h_{CO_2} = 124,815 \left[\frac{kJ}{kmol} \right] \\ h_{H_2O} = 103,215 \left[\frac{kJ}{kmol} \right] \\ h_{N_2} = 79,119 \left[\frac{kJ}{kmol} \right] \end{array} \right\} \text{ para una temperatura de } 2394,5 \text{ K}$$

Remplazando estos valores en la ecuación 20 se tiene:

$$(3 * 124,815) + (4 * 103,215) + (18,8 * 79,119) \Rightarrow 2274,742$$

Con el resultado que entrega la ecuación 20 se calcula un error porcentual

$$E\% = \left[\frac{2274,742 - 2274,675}{2274,675} \right] * 100\%$$

$$E\% = 0,003 \% \approx 0$$

Por lo cual la temperatura de flama para el gas propano será:

$T_{f \text{ propano}} = \begin{array}{l} \mathbf{2394,5 \text{ K}} \\ \mathbf{2121,35 \text{ }^\circ\text{C}} \end{array}$

De las dos temperaturas de flama encontradas se concluye lo siguiente.

$$\begin{aligned}\Delta T &= T_{f_{\text{propano}}} - T_{f_{\text{gas natural}}} \\ \Delta T &= 2394,5 - 2327,5 \\ \Delta T &= 19 [K]\end{aligned}\tag{Ecuación 21}$$

$$\begin{aligned}\Delta\% &= \frac{2394,5 - 2327,5}{2394,5} * 100 \\ \Delta\% &= 0,8 \%\end{aligned}\tag{Ecuación 22}$$

Se encuentra con la ecuación 21 que existe una diferencia de temperatura $19 K$ entre el gas propano y el gas natural; en la ecuación 22 se define que esta diferencia de temperatura representa solo un 0,8%, a la luz de estos datos puede decirse que el gas propano es una buena opción para remplazar al gas natural en el ensayo, por lo cual éste será el gas usado en los ensayos.

2.1.2 Análisis termodinámico

Se inicia este análisis con el material polimérico que presenta la mayor temperatura de fusión de los usados tanto por la industria automotriz y textil, del anexo 4 se desprende que este material es el nylon que presenta una temperatura de fusión de $220\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se usará las condiciones de este material como parámetro de diseño para el banco de pruebas. Haciendo uso de la ecuación 5 se determina el calor necesario (Q_n) para mantener la llama durante todo el ensayo. En el cálculo de este calor debe tenerse en cuenta la masa del elemento a quemar, dicha masa se considerará como la masa crítica con la probeta de mayor espesor que la norma FMVSS 302 permite en un ensayo y el tiempo durante el cual la norma también pide que se mantenga la llama inicial. Por lo mencionado con la ecuación 5 se llegará a un calor másico que garantiza el funcionamiento correcto del ensayo, esto transforma la ecuación 5 en la ecuación 23:

$$Q_n = \frac{C_p m (T_f - T_i)}{t}\tag{Ecuación 23}$$

Donde:

- $\dot{Q} = \text{Calor necesario } [J/s]$
- $C_p = \text{Calor específico} \Rightarrow 1700 [J/kg.K]$ (Anexo 4)
- m : masa de la probeta, se asume que se van a quemar 440 g de nailon en cada ensayo, valor crítico para una probeta con 1/2 in de espesor
$$m = 0,44 [kg]$$
- T_f : Temperatura final de la llama, en teoría sería la temperatura de fusión del material. Del anexo 4 se tiene que esta temperatura es de 200 °C (473,15 K) para el nailon.
- T_i : Temperatura con la que se inicia el ensayo es la condición de temperatura que marca el ensayo, para efectos prácticos se asumirán 22 °C (295,15 K). [9]
- T : Tiempo en el cual la llama del quemador debe estar presente en el ensayo, la llama debe estar en contacto con la probeta por un tiempo de 15 [s], además antes de este contacto entre llama y probeta se debe encender el mechero y dejar que la llama se estabilice por 1,5 minutos. [9] Con estas consideraciones se establece el tiempo t así:

$$t_1 = 1,5 \text{ minutos} * \frac{60 \text{ segundos}}{1 \text{ minuto}} \Rightarrow 90 [s]$$

$$t_2 = 15 [s]$$

$$t = t_1 + t_2 \Rightarrow 105 [s]$$

Reemplazando estos valores en la ecuación 23 se tiene:

$$Q_n = \frac{1700 * 0,44 * (473,15 - 295,15)}{105}$$

$$Q_n = 1268 [W]$$

2.1.3 Consumo combustible

Haciendo uso de la ecuación 2 y asumiendo una eficiencia de combustión del 50%, el consumo de combustible por probeta quemada será:

Nota: de la tabla A-27 del anexo 2 se obtiene el poder calorífico inferior para el propano (C₃H₈)

$$m_{combustible} = \frac{1268}{0,5 * 46340}$$

$$m_c = 0,054 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

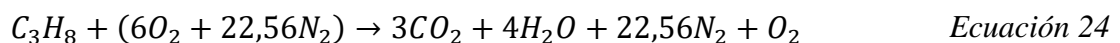
2.1.4 Análisis estequiométrico de la combustión

En los procesos de combustión reales es una práctica común emplear más aire que la cantidad estequiométrica, con el fin de aumentar las oportunidades de combustión completa o para controlar la temperatura de la cámara de combustión. La cantidad de aire en exceso de la cantidad estequiométrica se llama exceso de aire. La cantidad de exceso de aire suele expresarse en términos del aire estequiométrico como exceso de aire porcentual o aire teórico porcentual. [1] dicha cantidad se determina por un valor llamado coeficientes de exceso de aire, La tabla 3 da los intervalos típicos del coeficiente de exceso de aire para determinadas instalaciones de combustión. En principio: cuanto menor es la superficie de reacción del combustible en relación con la unidad de masa (combustible de grano grueso), mayor es la cantidad de exceso de aire que se debe escoger para garantizar la combustión completa. [14]

Tabla 3. Coeficientes de exceso de aire.

Instalación de Combustión	Rango Coeficiente
Motores de Combustión	0,8 – 1,2
Instalación Combustión de Gas	1,1 – 1,3
Quemador de Petróleo	1,2 – 1,5
Quemador de Carbón en Polvo	1,1 – 1,3
Caldera de Parrilla Para Lignito	1,3 – 1,7

Por medio de la tabla 3 se determina un coeficiente de exceso de aire para la combustión de 1,2, por lo cual la ecuación 19 se transforma en la ecuación 24



Haciendo uso de la ecuación 24 y 25 se puede calcular las masas de cada uno de los elementos presentes en la combustión. [1]

$$N_x = \frac{m_x [kg]}{M_x \left[\frac{kg}{kmol} \right]}$$

$$m_x = N_x M_x$$

Ecuación 25

Donde:

m_x : Masa de cada elemento que hace parte de la combustión

N_x : Numero de kmol presentes de cada elemento en la combustión

M_x : Masa molar de cada elemento. (Tabla A-1 anexos 2)

El cálculo de las masas para cada elemento será:

$$m_{C_3H_8} = 44,097 [kg]$$

$$m_{O_2} = 6[kmol] * 31,99 \left[\frac{kg}{kmol} \right] \Rightarrow 191,94 [kg]$$

$$m_{N_2} = 22,56[kmol] * 28,013 \left[\frac{kg}{kmol} \right] \Rightarrow 631,97 [kg]$$

$$m_{CO_2} = 3[kmol] * 44,01 \left[\frac{kg}{kmol} \right] \Rightarrow 132,03 [kg]$$

$$m_{H_2O} = 4[kmol] * 18,015 \left[\frac{kg}{kmol} \right] \Rightarrow 72,06 [kg]$$

Las fracciones molares de los gases de los productos se calculan a continuación. [1]

$$Y_x = \frac{N_x}{N_{Productos}}$$

Ecuación 26

De la ecuación 24 se calcula el número total de moles de los productos

$$N_{Productos} = 3 + 4 + 22,56 + 1 \Rightarrow 30,56 [kmol]$$

$$Y_{CO_2} = \frac{3 [kmol]}{30,56 [kmol]} \Rightarrow 0,098$$

$$Y_{H_2O} = \frac{4 [kmol]}{30,56 [kmol]} \Rightarrow 0,130$$

$$Y_{N_2} = \frac{22,56 [kmol]}{30,56 [kmol]} \Rightarrow 0,738$$

$$Y_{O_2} = \frac{1 [kmol]}{30,56 [kmol]} \Rightarrow 0,032$$

Usando los valores de masa hallados para cada elemento en la combustión, se calcula la masa molar de los productos, usando la ecuación 27.

$$M_{prod} = \frac{m_{prod}}{N_{prod}}$$

$$M_{prod} = \frac{191,94 + 72,06 + 631,97}{30,56} \Rightarrow 29,318 \left[\frac{kg}{kmol} \right] \quad \text{Ecuación 27}$$

Es importante conocer una relación másica aire combustible, esta relación se calcula por medio de la ecuación 28

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}}$$

$$AC = \frac{191,94 + 631,97}{44,097} \Rightarrow 18,68 \quad \text{Ecuación 28}$$

2.2 ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Se determinarán los calores de convección y radiación presentes en la cámara de combustión, asumiendo una temperatura ambiente de 22 °C, y una temperatura inicial de 200 °C que corresponde a la temperatura de ignición de la probeta crítica (nailon). Ya que la llama generada por el mechero Bunsen, es una llama que ocurre en un instante de tiempo relativamente corto comparado al tiempo que estará presente la llama generada por la combustión de la probeta, el calor generado por el mechero es despreciable para realizar cálculos de diseño.

2.2.1 Calor por convección

Se asumirá la cámara de combustión como un recinto cerrado rectangular del cual uno de los lados está transmitiendo calor hacia el otro lado por medio de convección natural, este inicio de transferencia de calor se asumirá en el centro de la cámara, como lo muestra la figura 4, donde se supone una temperatura de $T_1 = 200 \text{ } ^\circ \text{C}$, y una temperatura $T_2 = 22 \text{ } ^\circ \text{C}$ que corresponde a la temperatura ambiente.

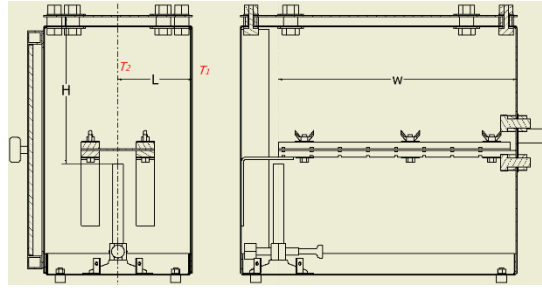


Figura 4. Transferencia de calor en la cámara de combustión. $H=0,26$ m, $L=0,103$ m, $w=0,331$ m, $T_1=200$ °C, $T_2=22$ °C. (Autor)

Para iniciar el análisis de transferencia de calor es necesario encontrar una proporción dimensional (H/L), de la cual se desprende del uso adecuado de la ecuación para hallar el número de Nuseelt, la relación H/L en este caso es igual a 2,52, por lo cual se recomienda usar la ecuación 29 para el cálculo del número de Nuseelt. [5]

$$N_u = 0,22 * \left[\frac{P_r R_{aL}}{0,2 + P_r} \right]^{0,28} * \left[\frac{H}{L} \right]^{-\frac{1}{4}} \text{ para } \begin{cases} 2 < \frac{H}{L} < 10 \\ \text{Cualquier } Pr \\ R_{aL} < 10^{10} \end{cases} \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde:

$$R_{aL} = \frac{g\beta(T_1 - T_2)L^3}{\nu^2} \Rightarrow \text{Número de Rayleigh} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} g: \text{Gravedad } \left[\frac{m}{s^2} \right] \\ \beta: \frac{1}{T_m} \left[K^{-1} \right] \\ \nu^2: \text{Viscosidad cinemática } \left[\frac{m^2}{s} \right] \end{array} \right\}$$

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2} \Rightarrow \text{Temperatura media}$$

Haciendo uso de la ecuación 30 se calcula el calor por convección dentro de la cámara de combustión. [5]

$$Q_c = hA_s(T_1 - T_2) = \frac{kN_u A_s}{L} (\Delta T) \quad \text{Ecuación 30}$$

Donde:

$$k: \text{Conductividad térmica} \left[\frac{W}{mK} \right]$$

$$A_s = H * w [m^2]$$

En la tabla A-15 en el anexo 8 por medio de la temperatura media, se encuentran los valores de conductividad térmica, viscosidad cinemática y número de Prandtl (P_r), necesarios para hallar el calor por convección. Aplicando la ecuación 29 y 30 para el caso de la cámara de combustión se tiene:

$$T_m = \frac{200 + 22}{2} \Rightarrow 111 [^{\circ}C]$$

De la tabla A-15 se tiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} k = 0,03172 \left[\frac{W}{mK} \right] \\ v = 2,4248 * 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s} \right] \\ P_r = 0,70901 \end{array} \right\}$$

Se calcula Rayleigh:

$$R_{aL} = \frac{9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] * 0,002603 [K^{-1}] * (178[K]) * 0,103^3 [m^3]}{\left(2,4248 * 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s} \right] \right)^2}$$

$$R_{aL} = 1,784 * 10^6 \quad R_{aL} < 10^{10}$$

Con los valores de los números de Prandtl y Rayleigh se calcula el número de Nusselt usando la ecuación 29.

$$N_u = 0,22 * \left[\frac{0,70901 * 1,784 * 10^6}{0,2 + 0,70901} \right]^{0,28} * \left[\frac{0,26 [m]}{0,103 [m]} \right]^{-\frac{1}{4}}$$

$$N_u = 9,151$$

Haciendo uso de la ecuación 30 se calcula el calor por convección dentro de la cámara de combustión.

$$Q_c = \frac{0,03172 \left[\frac{W}{m.K} \right] * 9,151 * (0,26 * 0,331) [m]^2 * (200 - 22) [K]}{0,103 [m]}$$

$$Q_c = 63,1 [W]$$

Y el coeficiente de transferencia de calor por convección h de la cámara de combustión será:

$$h = \frac{kN_u}{L} \Rightarrow \frac{0,03172 * 9,151}{0,103} \Rightarrow 4,12 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

2.2.2 Calor por radiación

Para hacer el cálculo del calor por radiación se asumirá una placa caliente irradiante delgada rectangular de medidas $H= 0,26$ m y $w= 0,331$ m que atraviese la cámara de combustión por el centro figura 4. Se asumirá que la placa es una superficie negra con una temperatura de $200^\circ C$, y que la cámara de combustión está a una temperatura de $22^\circ C$, por medio de la ecuación 31 se calculara el calor por radiación dentro de la cámara de combustión. [5]

$$Q_{rad} = \varepsilon A_s \sigma (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad \text{Ecuación 31}$$

Donde:

$\varepsilon = 1$, Emisividad asumiendo superficie negra

$\sigma = 5,6704 * 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2K^4} \right]$, Constante de Stefan – Boltzmann

Entonces

$$Q_{rad} = (0,26 * 0,331)[m^2] * 5,6704 * 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2K^4} \right] * (473,2^4 - 295,2^4)[K^4]$$

$$Q_{rad} = 207,5 [W]$$

El máximo calor soportado por la cámara será de $207,5$ W generado por radiación, dicho calor se genera por una temperatura de $200^\circ C$ causado por la probeta crítica, dicho calor no es relevante estructuralmente en ningún metal ferroso.

2.3 DISEÑO ESTRUCTURAL DEL BANCO DE PRUEBAS

Cuando se deforma plásticamente un metal a temperaturas bastante inferiores a la de su punto de fusión, se dice que el metal ha sido trabajado en frío. La mayor parte de la energía empleada en esta deformación se disipa como calor, almacenándose una pequeña fracción como energía de deformación. La temperatura de recristalización corresponde a la temperatura aproximada a la que un material altamente trabajado en frío se recristaliza por completo en una hora. La recristalización es sensible a cambios en la temperatura a la que se realiza, más que a variaciones de tiempo a temperatura constante. En promedio esta temperatura de recristalización en los metales ferrosos esta alrededor de los 500 °C. [21] En los numerales anteriores se determinó una temperatura crítica de 200 ° C. Esta temperatura es lejana de los 500 °C que es el umbral de cambio de estructura de los metales ferrosos, la norma dicta que la estructura del banco de pruebas debe ser de acero inoxidable, por lo cual para la fabricación del mismo se usará un acero AISI-SAE 304 (Anexos 5) en lámina calibre 16.

El banco de pruebas como tal cuenta con cuatro elementos claros que son Cámara de Combustión más accesorios, porta probetas más accesorios, puerta lateral con vidrio templado y un mechero Bunsen más accesorios a continuación se detallará cada uno de estos elementos y como se realizó su fabricación.

2.3.1 Cámara de combustión

La norma FMVSS 302 determina que la cámara de combustión para el banco de pruebas debe ser una estructura en acero inoxidable que cuente con las dimensiones internas relacionadas en la tabla 4.

Tabla 4. Dimensiones internas cámara de combustión.

ALTO	356 [mm]
LARGO	203 [mm]
ANCHO	381 [mm]
VENTILACIÓN EN LA PARTE SUPERIOR	13 [mm]

(Fuente Autor)

Para lograr estas dimensiones internas en lámina calibre 16 de acero inoxidable, se seccionó la cámara de combustión en cuatro elementos diferentes para facilitar su corte y doblado. En la figura 5 se muestra la geometría que se adoptó para las dos primeras secciones de la cámara de combustión estas se denominaron L1 y L2. Los planos de cada una de las secciones se encuentran en los anexos 6. Ficha Técnica del acero inoxidable en el anexo 5.

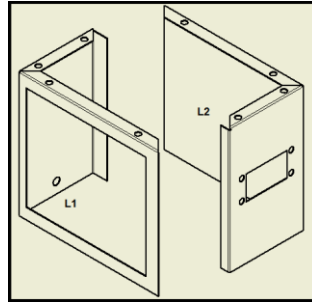


Figura 5. Secciones L1 y L2. (Autor)

La siguiente sección de la cámara de combustión fue la base inferior, que se muestra en la figura 6, esta actúa como piso de la cámara de combustión y es el soporte del mechero Bunsen.

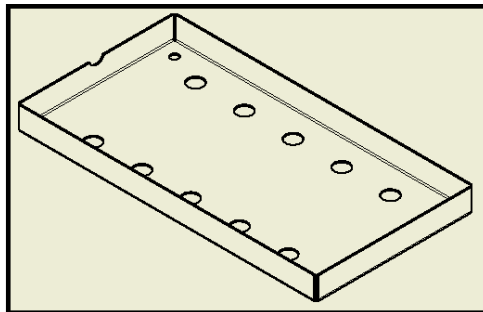


Figura 6. Base Inferior. (Autor)

La última sección para este elemento es la tapa superior figura 7, queda por encima de la cámara de combustión va unida a esta por medio de tornillo y tuerca de $\frac{1}{2}$ [in] grado 5, se usaron unos espaciadores de 13 [mm] de altura para dar la ventilación que pide la norma en la parte superior.

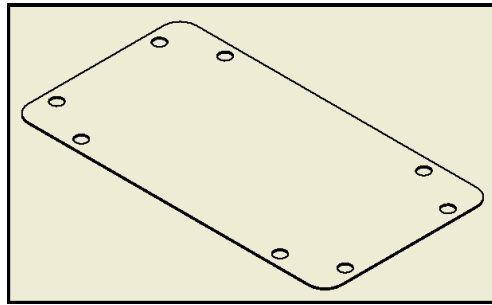


Figura 7. Tapa superior. (Autor)

Los cuatro elementos se unen por medio de soldadura, tornillos en la parte superior para formar la cámara de combustión como se ilustra en la figura 8.

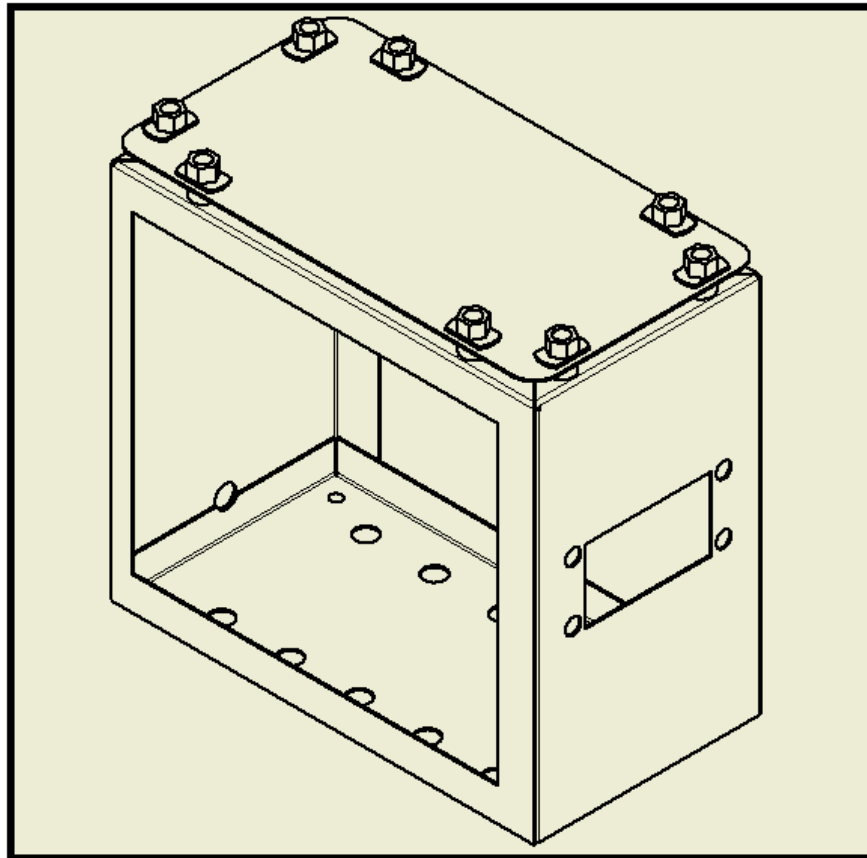


Figura 8. Cámara de combustión. (Autor)

2.3.2 Porta probetas

El porta probetas es un elemento que consta de dos partes en forma de U, que debe tener las dimensiones que se detallan en la tabla 4 y que se relacionan en la figura 8.

Tabla 4. Dimensiones del porta probetas. [9]

A	4 [in]
B	2 [in]
C	13 [in]
D	3/8 [in]

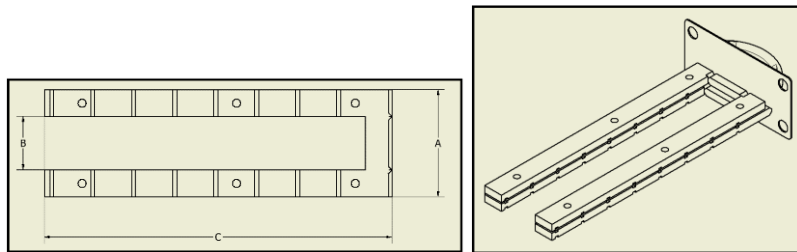


Figura 9. Dimensiones porta probetas. (Autor)

2.3.3 Puerta lateral con vidrio

La puerta se diseñó en un marco de aluminio con un vidrio templado resistente a altas temperaturas, [20] los planos y medidas correspondientes tanto a la puerta como al vidrio se encuentran en los planos en el anexo 6.

2.3.4 mechero Bunsen

El mechero bunsen es un instrumento utilizado en laboratorios para calentar muestras y sustancias químicas. El mechero bunsen está constituido por un tubo vertical que va enroscado a un pie metálico con ingreso para el flujo de gas, el cual se regula a través de una válvula. En la parte inferior del tubo vertical existen orificios y un anillo metálico móvil o collarín también

horadado. Ajustando la posición relativa de estos orificios (cuerpo del tubo y collarín respectivamente), los cuales pueden ser esféricos o rectangulares, se logra regular el flujo de aire que aporta el oxígeno necesario para llevar a cabo la combustión con formación de llama en la boca o parte superior del tubo vertical. [10]

El mechero tiene una conexión para gas propano y sus respectivos accesorios, (la ficha técnica del mechero esta referenciada en el anexo 7), el mechero en cada momento del ensayo debe tener la entrada de aire cerrada. [9] El montaje del mechero dentro del banco de pruebas debe satisfacer las dimensiones que se muestran en la figura 10.

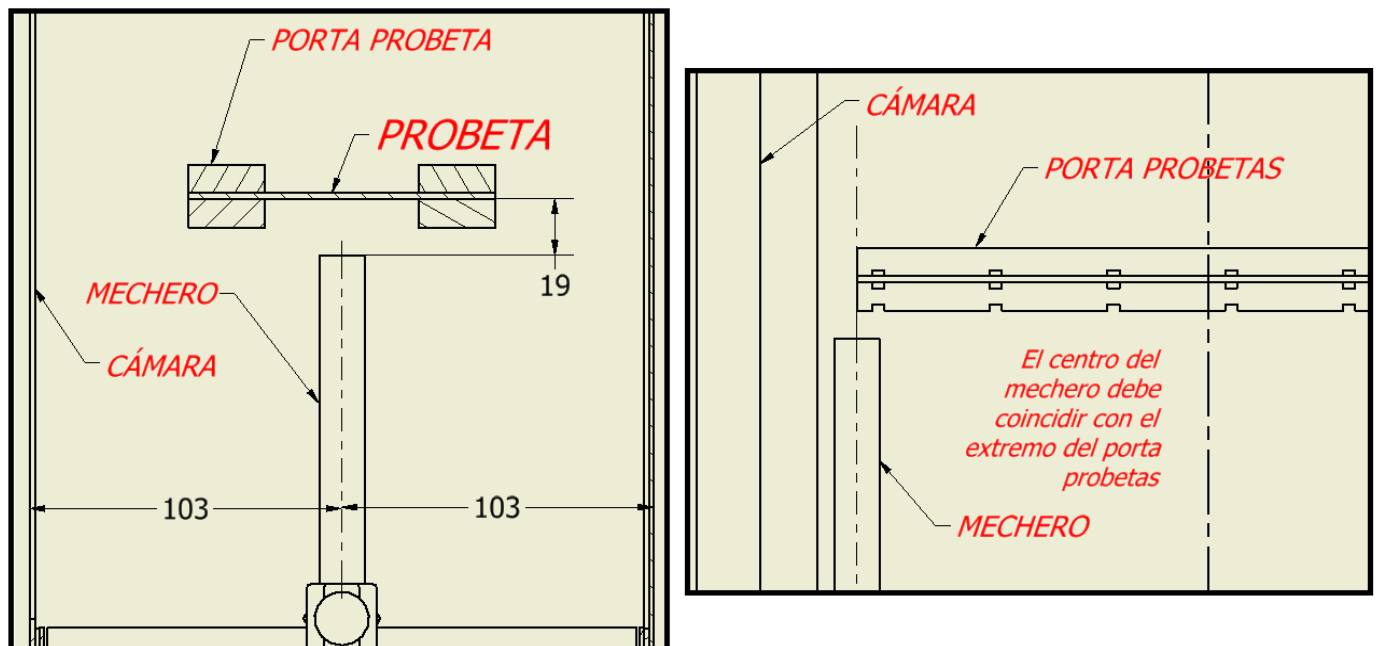


Figura 10. Ubicación del mechero dentro de la cámara, dimensiones en [mm]. (Autor)

Toda la geometría de la cámara de combustión tanto para perforaciones y ubicación del porta probeta deben hacerse considerando los 19 [mm] que tienen que existir entre la probeta en la parte inferior y el mechero. [9]

3 CONSTRUCCIÓN

La construcción del banco de pruebas inició con el corte y doblado del acero inoxidable calibre 16 de las secciones L1 y L2, base inferior y tapa superior. Se realizó en la empresa Bronces y Láminas S.A. ubicado en la ciudad de Dosquebradas. En la figura 11 se muestran los diferentes elementos de la cámara de combustión ya mecanizados. Ficha técnica del acero inoxidable anexo 5.



Figura 11. Elementos mecanizados de la cámara de combustión. (Autor).

Por medio del método de soldadura TIG usando un electrodo de Tungsteno con diámetro de 1/16 in, una varilla de aporte de 1/16 in de diámetro, un amperaje 55 mA y usando gas Argón como protección del charco fusión, se unieron las secciones L1 y L2 con la base inferior, como se muestra en la figura 12.



Figura 12. Secciones soldadas. (Autor)

En la abertura de entrada para el porta probeta, se soldaron cuatro tuercas de $\frac{1}{2}$ [in] grado 5, como se muestra en la figura 13, para sostenerlo y mantenerlo en la distancia y altura establecidas por la norma, como se especifica en los planos, anexo 6. Esta abertura está diseñada para que el porta probeta cumpla con la distancia de 19 [mm] entre la boca del mechero y la parte de bajo de la probeta como se muestra en la figura 10.



Figura 13. Abertura de entrada del porta probeta. (Autor)

En la figura 14 se muestra el porta probeta ya mecanizado. Se fabricó con platina de 3/8 [in], por medio de tres platinas cortadas a la medida y luego soldadas por el método de soldadura TIG. Las dimensiones y las geometrías se especifican en los planos anexo 6.



Figura 14. Porta probeta. (Autor)

La puerta como se mencionó anteriormente tiene un marco de aluminio y un vidrio resistente al calor, en la figura 15 se ilustra la puerta, las especificaciones y medidas se encuentran en el los planos anexo 6.



Figura 15. Puerta lateral. (Autor)

En la figura 16 se muestra el mechero Bunsen adquirido en la empresa Ávila Instrumental en la ciudad de Bogotá, la ubicación dentro de la cámara de combustión se mencionó anteriormente en la figura 10, las especificaciones del mismo se encuentran en el anexo 6.



Figura 16. Mechero Bunsen. (Autor)

La tapa superior de la cámara de combustión se levantó para dar ventilación según lo especifica la norma, por lo tanto se unió por medio de 6 tornillos y tuercas de $\frac{1}{2}$ [in] grado 5 y espaciadores de 13 [mm]. La puerta se unió a la cámara por medio de dos bisagras y se colocó un empaque entre la

puerta y la cámara para impedir la entrada de aire. En la figura 17 se muestra la tapa superior y la puerta unidas a la cámara.



Figura 17. Tapa superior y puerta unidas a la cámara (autor)

En la figura 18 se muestra la ubicación del porta probeta, y el mechero dentro de la cámara de combustión. Las medidas y especificaciones se encuentran en los planos anexo 6.



Figura 18. Cámara de combustión, mechero y porta probeta. (Autor)

4 IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA PUNTO DEL ENSAYO

4.1 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO



Figura 19. Cámara para ensayos bajo la norma FMVSS 302. (Autor)

En la figura 19 se muestra la cámara para realizar los ensayos para determinar la velocidad de combustión de diferentes materiales poliméricos. La norma FMVSS 302 dicta una serie de pasos a seguir durante el ensayo que se citará a continuación:

- A. Se monta la probeta en el porta probetas mirando hacia abajo, figura 20.



Figura 20. Montaje probeta en porta probeta. (Autor)

- B. Se pone el porta probetas con la probeta montada dentro de la cámara de combustión lo más cercano a la puerta lateral.

- C. Se abre el suministro de gas y se enciende el mechero, se ajusta la válvula del mismo para alcanzar una altura de 1,5 [in], permitiendo que la llama se estabilice, figura 21.



Figura 21. Llama mechero Bunsen. (Autor)

- D. La parte superior del mechero debe estar $\frac{3}{4}$ [in] (19 mm) debajo en el centro del extremo de la probeta.
- E. Se expone la probeta a la flama del mechero por 15 [s] se cierra el suministro de gas y se reinicia el tiempo a cero, figura 22.



Figura 22. Inicio de llama en la probeta. (Autor)

- F. Se empieza a contabilizar el avance de la flama, cuando la flama de la probeta que está siendo quemada llegue a 1,5 [in] de la parte libre de la probeta.

- G. Se registra el tiempo que le toma a llama avanzar hasta un punto que este 1,5 [in] de la parte sujeta de la probeta; si la llama no alcanza este punto se toma el tiempo donde la llama se detuvo, si la probeta se quema muy lentamente debe abortarse el ensayo 5 minutos después de haber iniciado.
- H. Se calcula la velocidad de combustión con la ecuación 32.

$$v = 60 * \frac{d}{t} \qquad \text{Ecuación 32}$$

Donde:

v : Velocidad de combustión [mm/s]

d : distancia de quemado [mm]

t : Tiempo de quemado [s]

En el anexo 9 se explica en detalle cada uno de los pasos a seguir durante el ensayo con el manual de operación.

4.2 ANÁLISIS DE REPRODUCIBILIDAD Y REPETIBILIDAD

El primer ensayo que se realizó con el banco de pruebas fue con probetas de fibra de vidrio resina poliéster P 2530 A, en la figura 23 se ve dicha probeta antes durante y después del ensayo (ficha técnica anexos 4); en estudios experimentales anteriores con este material se estimó que la velocidad de combustión era de 15,35 [mm/min]. [11] Por lo tanto, los valores obtenidos con el banco de pruebas deben estar cercanos al antes mencionado.

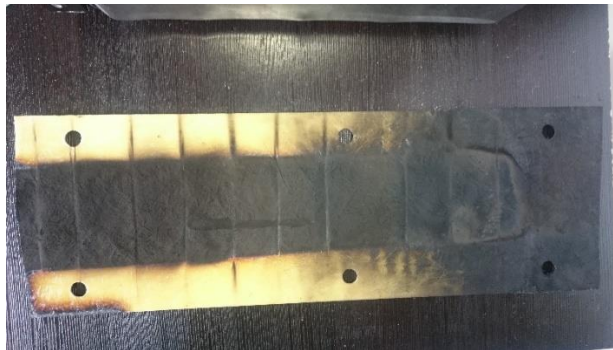
Con el objetivo de darle validez a los ensayos realizados y evaluar estadísticamente la dispersión de los resultados, se realiza un estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad de las mediciones por medio del método de Promedios y Rangos. Para realizar el método se cambió de observador para hacer un segundo ensayo con la fibra de vidrio, la cual contaba con la mismas dimensiones y la misma resina poliéster del primer ensayo, el resto de condiciones de medición se mantuvieron iguales o con cambios despreciables para el método, por ende, el único cambio significativo es el del observador. Se muestran los valores obtenidos durante el ensayo para este material del Observador 1 y del Observador 2, en las tablas 5 y 6 respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 23. Probeta fibra de vidrio: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor)

4.3 FIBRA DE VIDRIO

Del vidrio es posible sacar fibras que puede tejerse como fibras textiles, estirando el vidrio fundido hasta alcanzar fibras de diámetros inferiores a una centésima de milímetro. La fibra de vidrio mezclada con plástico logra unir las propiedades de los dos elementos (la solidez y estabilidad

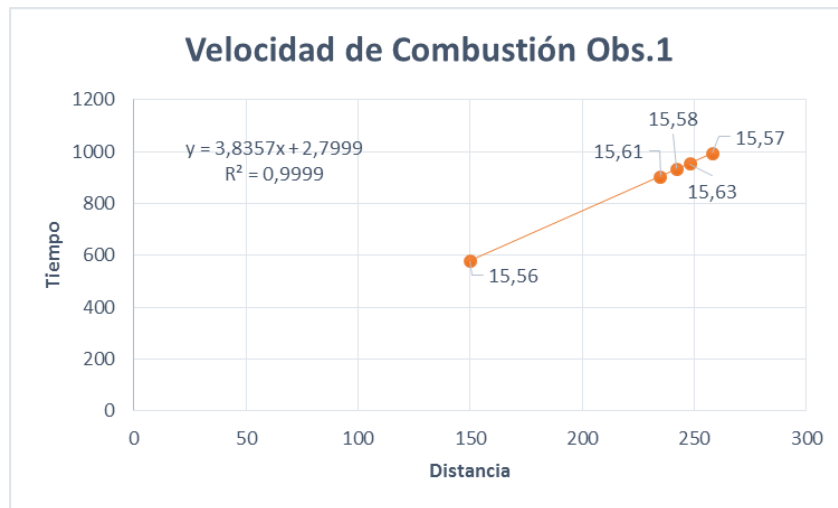
química del vidrio con la capacidad de absorber golpes del plástico), adicionalmente es un muy buen aislante eléctrico, se la usa en tapicería (resistente al fuego y al agua) por sus propiedades químicas y como recubrimiento de grandes espacios en los cuales es necesaria la luz y la capacidad de soportar la fuerzas climáticas, también cuando es necesario por la posibilidad de recibir fuertes impactos, en canchas de fútbol, squash u otro deporte en el que impacten elementos contra una superficie que se quiere conservar transparente. [16]

También se emplean fibras de vidrio en la transmisión de señales ópticas mediante la fibra óptica, industria automotriz, aislamiento acústico. Las ventajas más notables de los artículos fabricados con fibra de vidrio son: la ligereza, resistencia, innovación, practicidad y durabilidad.

Nota: en la tabla 5 y tabla 6 la temperatura que se marca, es la temperatura del ambiente en el momento del ensayo.

Tabla 5. Datos fibra de vidrio Observador 1. (Autor)

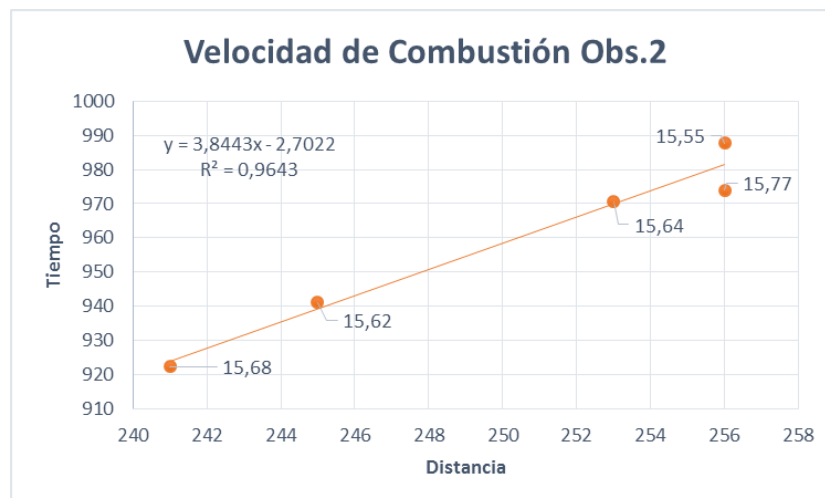
OBSERVADOR 1						
MATERIAL	PROBETA	DISTANCIA QUEMADO (mm)	TIEMPO QUEMADO (s)	VELOCIDAD QUEMADO (mm/min)	TEMPERATURA (°C)	HR %
FIBRA DE VIDRIO + CAPA DE PINTURA	1	235	903,27	15,61	23	65
	2	242	931,96	15,58	23	65
	3	248	952,02	15,63	23	65
	4	150	578,41	15,56	25	65
	5	258	994,22	15,57	25	65



Gráfica 1. Velocidad de combustión fibra de vidrio observador 1. (Autor)

Tabla 6. Datos fibra de vidrio Observador 2. (Autor)

OBSERVADOR 2						
MATERIAL	PROBETA	DISTANCIA QUEMADO (mm)	TIEMPO QUEMADO (s)	VELOCIDAD QUEMADO (mm/min)	TEMPERATURA (°C)	HR %
FIBRA DE VIDRIO + CAPA DE PINTURA	1	256	974	15,77	25	64
	2	253	970,59	15,64	25	64
	3	245	941,1	15,62	25	64
	4	256	987,78	15,55	25	64
	5	241	922,19	15,68	25	64



Gráfica 2. Velocidad de combustión fibra de vidrio observador. 2. (Autor)

Con los datos obtenidos de distancia y tiempo de quemado de las cinco probetas de este material, se procede a hallar la velocidad media de quemado, para esto se realiza un análisis estadístico determinando la media, la desviación estándar y el error estadístico o típico, descrito a continuación. [12]

Modelo matemático: $v = (d/t)$

Media

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde:

x_i : Velocidad de combustión [mm/min]

n : número de ensayos

Usando la ecuación 33 se encuentra la media de la velocidad de quemado:

$\bar{x}_{v1} = 15,59$ [mm/min] Observador 1

$\bar{x}_{v2} = 15,65$ [mm/min] Observador 2

Desviación Estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad \text{Ecuación 34}$$

Usando la ecuación 34 se calcula la desviación Estándar de la velocidad de quemado:

$\sigma_{v1} = 0,03$ [mm/min] Observador 1

$\sigma_{v2} = 0,08$ [mm/min] Observador 2

Error Típico o Incertidumbre Tipo A

$$u_A = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación 35}$$

Usando la ecuación 35 se calcula el error Típico de la velocidad de quemado:

$$u_{v1} = 0,01 \text{ [mm/min] Observador 1}$$

$$u_{v2} = 0,04 \text{ [mm/min] Observador 2}$$

Comparando los datos obtenidos experimentalmente de la velocidad de combustión de la fibra de vidrio por estudios anteriores estimada en 15,35 [mm/min]. [11] con los obtenidos en el banco de pruebas de la Facultad de Ingeniería Mecánica tomando el dato mayor de la media de la velocidad de combustión del mismo material estimado por el Observador 2 de 15,65[mm/min]., tenemos:

$$\Delta\% = \left(\frac{15,65 - 15,35}{15,65} \right) * 100$$

$$\Delta\% = 1,917 \%$$

Determinando la cercanía de los datos con un $\Delta\%=1,917\%$.

Tomando la estimación generada por estudios anteriores de la velocidad de combustión de la fibra de vidrio y la estimación generada por el banco de pruebas, se obtiene un delta de velocidad $\Delta v = 0,3 \text{ [mm/min]}$, con este dato multiplicando a un k de confiabilidad $k=13$ asumido por el autor, se determina la tolerancia de la cámara de combustión $T \approx 4 \text{ [mm/min]}$.

Continuando con el estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad por medio del método de Promedios y Rangos [13]. Se muestran las velocidades de combustión del Observador 1 y 2 en la tabla 7.

Tabla 7. Velocidad de combustión Fibra de vidrio observador 1 y 2

PROBETA	VELOCIDAD QUEMADO (mm/min)	
	OBSERVADOR 1	OBSERADOR 2
1	15,61	15,77
2	15,58	15,64
3	15,63	15,62
4	15,56	15,55
5	15,57	15,68

Rango de cada parte medida, en este caso el número de partes es n=1.

$$R = x_{m\acute{a}x} - x_{m\grave{i}n} \quad \text{Ecuación 36}$$

Rango promedio de cada operador

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad \text{Ecuación 37}$$

Usando la ecuación 36:

$$R_1 = x_{1m\acute{a}x} - x_{1m\grave{i}n} \Rightarrow 0,07 \left[\frac{mm}{min} \right]$$

$$R_2 = x_{2m\acute{a}x} - x_{2m\grave{i}n} \Rightarrow 0,22 \left[\frac{mm}{min} \right]$$

Usando la ecuación 37

$$\bar{R}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_1, n = 1 \Rightarrow 0,07$$

$$\bar{R}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_2, n = 1 \Rightarrow 0,22$$

$\bar{R}_1 = 0,07$ [mm/min] Operador 1

$\bar{R}_2 = 0,22$ [mm/min] Operador 2

Rango promedio de todos los rangos

$$\bar{\bar{R}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{R}_i \quad \text{Ecuación 38}$$

m: número de operadores

\bar{R}_i : rango promedio de cada operador

$$\bar{\bar{R}} = \frac{1}{2} * (0,07 + 0,22)$$

$\bar{\bar{R}} = 0,145$ [mm/min]

Porcentaje de Repetibilidad

$$\% \text{ Repetibilidad} = \frac{K_1 * \bar{\bar{R}}}{T} * 100\% \quad \text{Ecuación 39}$$

K_1 : Constante que depende del número de observaciones realizadas por cada operador, proporciona un intervalo de confianza del 99% para estas características. $K_1 = 2,21$ para 5 ensayos. [13]

T : Tolerancia del instrumento de medida, en este caso de la cámara de combustión

$T = 4[mm/min]$

$$\% \text{ Repetibilidad} = \frac{2,21 * 0,145}{4} * 100\%$$

$$\% \text{ Repetibilidad} = 8,01\%$$

Medición Promedio de cada operador

$$\bar{x}_i = \frac{1}{nr} \sum_{i=1}^n x_i$$

Ecuación 40

n : número de ensayos por operador

r : número de partes medidas

x_i : cada una de las medidas del operador

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{5} (15,61 + 15,58 + 15,63 + 15,56 + 15,57)$$

$$\bar{x}_2 = \frac{1}{5} (15,77 + 15,64 + 15,62 + 15,55 + 15,68)$$

$$\bar{x}_1 = 15,59[mm/min] \text{ Operador 1}$$

$$\bar{x}_2 = 15,65[mm/min] \text{ Operador 2}$$

Diferencia entre promedio mayor y el promedio menor de los operadores

$$\bar{x}_D = x_{imáx} - x_{imin}$$

$$\bar{x}_D = 15,65 - 15,59$$

$$\bar{x}_D = 0,06[mm/min]$$

Porcentaje de Reproducibilidad

$$\% \text{ Reproducibilidad} = \frac{\sqrt{(K_2 * \bar{x}_D)^2 - \frac{(K_1 * \bar{R})^2}{n * r}}}{T} * 100\%$$

Ecuación 41

K_2 : Constante que depende del número de operadores y proporciona un intervalo de confianza del 99% para estas características. $K_2 = 3,65$ para 2 operadores. [13]

$$\% \text{ Reproducibilidad} = \frac{\sqrt{(3,65 * 0,06)^2 - \frac{(2,21 * 0,145)^2}{5 * 1}}}{4} * 100\%$$

$$\% \text{ Reproducibilidad} = 4,38\%$$

Porcentaje de la relación entre Repetibilidad y Reproducibilidad

$$\%R\&R = \sqrt{(\%Repetibilidad)^2 + (\%Reproducibilidad)^2} \quad \text{Ecuación 42}$$

Si $\%R \& R < 10\%$ el sistema de medición es aceptable. [13]

Si $10\% \leq \%R \& R < 30\%$ el sistema de medición puede ser aceptable según su uso, aplicación, costo del instrumento de medición, costo de reparación. [13]

Si $\%R \& R > 30\%$ el sistema de medición es considerado como no aceptable y requiere de mejoras en cuanto al operador, equipo, método, condiciones, etc. [13]

$$\%R\&R = \sqrt{(8,01)^2 + (4,38)^2}$$

$$\%R\&R = 9,13\%$$

$$\%R\&R < 10\%$$

9,13% < 10% por lo tanto el sistema de medición es aceptable.

5 ANÁLISIS DE DIFERENTES MATERIALES POLIMÉRICOS

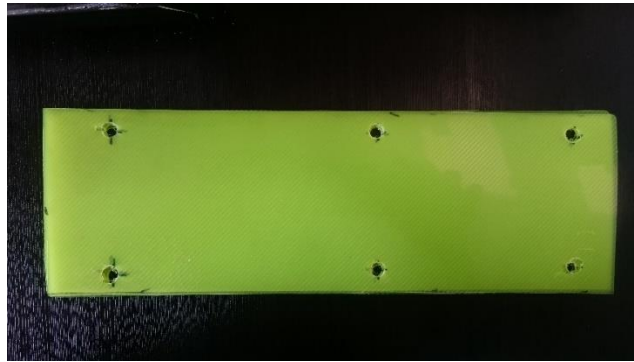
Para el proceso de ensayo de cada una de las probetas de los diferentes materiales poliméricos se seguirá la misma metodología usada en los numerales 4.1 y 4.3, para estimar la velocidad de combustión.

5.1 POLIPROPILENO

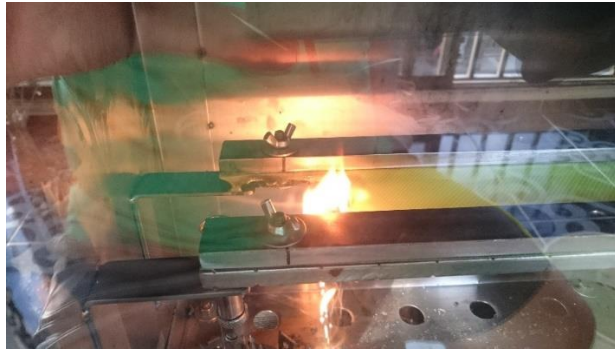
Termoplástico comercial, semicristalino, blanco semiopaco elaborado en una amplia variedad de calidades y modificaciones. Es una poliolefina lineal que puede compararse en varios modos con el polietileno de alta densidad y de fabricación similar. Los catalizadores utilizados controlan la estereoregularidad de tal manera que los polipropilenos comerciales suelen ser isotácticos de modo predominante. El homopolímero polipropileno tiene una dureza y una resistencia térmica superiores a las del polietileno de alta densidad pero una resistencia al impacto inferior y se vuelve quebradizo por debajo de 0 °C. Por lo tanto las calidades copoliméricas son preferidas para aplicaciones que exponen a condiciones de frío/invierno. Estos polímeros tienen una mejor resistencia al impacto. El polipropileno como los polietilenos tiene una buena resistencia química pero una resistencia débil a los rayos UV (salvo estabilización o protección previa). Aplicaciones: para los homopolímero - envueltas de aparatos eléctricos, embalajes, estuches de cintas, fibras, monofilamentos. Para los copolímeros - tubos, casco de barcos, asientos y piezas para el automóvil (p.ej. cofres de baterías y parachoques aunque estos últimos suelen ser fabricados con polipropilenos modificados con elastómeros). Para mas especificaciones del material ficha técnica en anexos 4. [15]

5.1.1 Polipropileno (Espesor 0,5 mm)

En la figura 24 se muestran las probetas del polipropileno espesor de 0,5 [mm] antes, durante y después del ensayo.



(a)



(b)

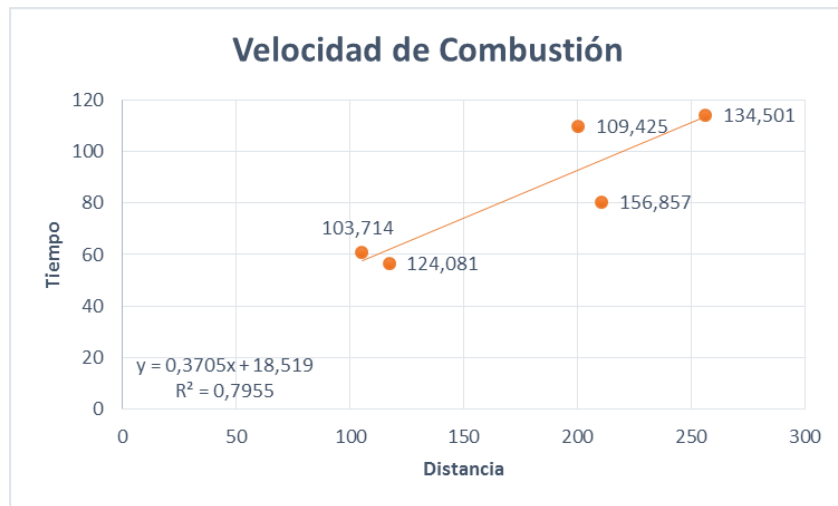


Figura 24. Probeta polipropileno 0,5 [mm]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor)

Nota: de la tabla 8 a la tabla 18 la temperatura que se marca, es la temperatura del ambiente en el momento del ensayo.

Tabla 8. Datos polipropileno espesor 0,5 mm. (Autor)

MATERIAL	PROBETA	DISTANCIA QUEMADO (mm)	TIEMPO QUEMADO (s)	VELOCIDAD QUEMADO (mm/min)	TEMPERATURA (°C)	HR %
POLIPROPILENO (ESPESOR 0,5 mm)	1	210,45	80,5	156,857	26	62
	2	200,12	109,73	109,425	26	62
	3	256	114,2	134,501	26	62
	4	117,05	56,6	124,081	26	62
	5	105,27	60,9	103,714	26	62



Gráfica 3. Velocidad de combustión polipropileno espesor 0,5 mm. (Autor)

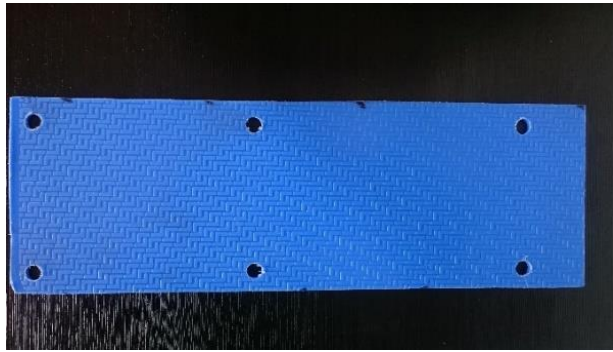
Media, velocidad de quemado: $\bar{x}_v = 125,72$ [mm/min]

Desviación Estándar, velocidad de quemado: $\sigma_v = 21,21$ [mm/min]

Error Típico, velocidad de quemado: $u_v = 9,48$ [mm/min]

5.1.2 Polipropileno (Espesor 3mm)

En la figura 25 se muestran las probetas del polipropileno espesor de 3 [mm] antes, durante y después del ensayo.



(a)



(b)

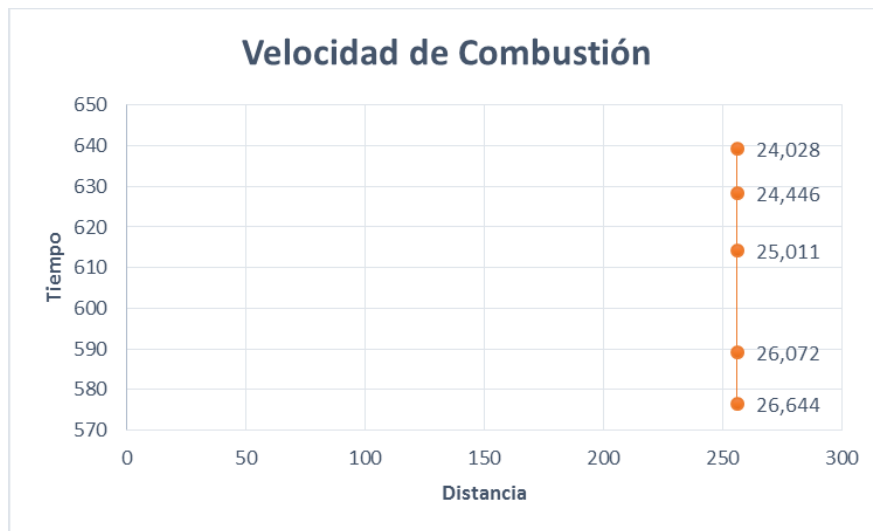


(c)

Figura 25. Probeta polipropileno 3 [mm]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor)

Tabla 9. Datos polipropileno espesor 3 mm. (Autor)

MATERIAL	PROBETA	DISTANCIA QUEMADO (mm)	TIEMPO QUEMADO (s)	VELOCIDAD QUEMADO (mm/min)	TEMPERATURA (°C)	HR %
POLIPROPILENO (ESPESOR 3 mm)	1	256	589,14	26,072	26	62
	2	256	628,32	24,446	25	62
	3	256	614,14	25,011	25	62
	4	256	639,25	24,028	25	62
	5	256	576,5	26,644	25	62



Gráfica 4. Velocidad de combustión polipropileno espesor 3 mm. (Autor)

Media, velocidad de quemado: $\bar{x}_v = 25,24$ [mm/min]

Desviación estándar, velocidad de quemado: $\sigma_v = 1,10$ [mm/min]

Error Típico, velocidad de quemado: $u_v = 0,49$ [mm/min]

5.2 POLIETILENO

Familia de termoplásticos comerciales muy similares fabricados en cantidades industriales y en calidades muy variadas. Suelen diferenciarse por su densidad (una buena medida de la cristalinidad), pero desde un punto de vista científico la mejor distinción es el grado de ramificación de las cadenas. Para mas especificaciones del material ficha técnica en anexos 4. [15]

5.2.1 Polietileno de Baja Densidad

En la figura 26 se muestran las probetas del polietileno de baja densidad espesor de 0,2 [mm] antes, durante y después del ensayo.



(a)



(b)

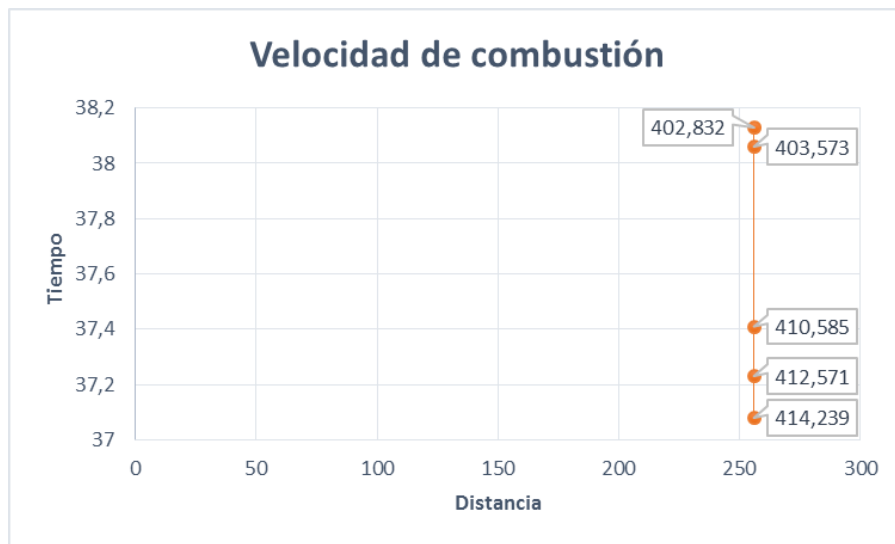


(c)

Figura 26. . Probeta polietileno de baja densidad 0,2 [mm]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor)

Tabla 10. Datos polietileno de baja densidad 0,2 [mm]. (Autor)

MATERIAL	PROBETA	DISTANCIA QUEMADO (mm)	TIEMPO QUEMADO (s)	VELOCIDAD QUEMADO (mm/min)	TEMPERATURA (°C)	HR %
POLIETILENO BAJA DENSIDAD	1	256	37,41	410,585	28	55
	2	256	37,23	412,571	28	55
	3	256	38,06	403,573	28	55
	4	256	38,13	402,832	28	55
	5	256	37,08	414,239	28	55



Gráfica 5. Velocidad de combustión polietileno de baja densidad

Media, velocidad de quemado: $\bar{x}_v = 408,76$ [mm/min]

Desviación estándar, velocidad de quemado: $\sigma_v = 5,24$ [mm/min]

Error Típico, velocidad de quemado: $u_v = 2,34$ [mm/min]

5.2.2 Polietileno de Alta Densidad

En la figura 27 se muestran las probetas del polietileno de a densidad espesor de 2,5 [mm] antes, durante y después del ensayo.



(a)



(b)



(c)

Figura 27. Probeta polietileno de alta densidad 2,5 [mm]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor)

Tabla 11. Datos polietileno de alta densidad 2,5 [mm]. (Autor)

MATERIAL	PROBETA	DISTANCIA QUEMADO (mm)	TIEMPO QUEMADO (s)	VELOCIDAD QUEMADO (mm/min)	TEMPERATURA (°C)	HR %
POLIETILENO ALTA DENSIDAD	1	245	227,66	64,570	26	55
	2	245	232,5	63,226	26	55
	3	245	225,9	65,073	26	55
	4	245	220,8	66,576	26	55
	5	245	230,13	63,877	26	55



Gráfica 6. Velocidad de combustión polietileno de alta densidad 2,5 [mm]. (Autor)

Media, velocidad de quemado: $\bar{x}_v = 64,66$ [mm/min]

Desviación estándar, velocidad de quemado: $\sigma_v = 1,28$ [mm/min]

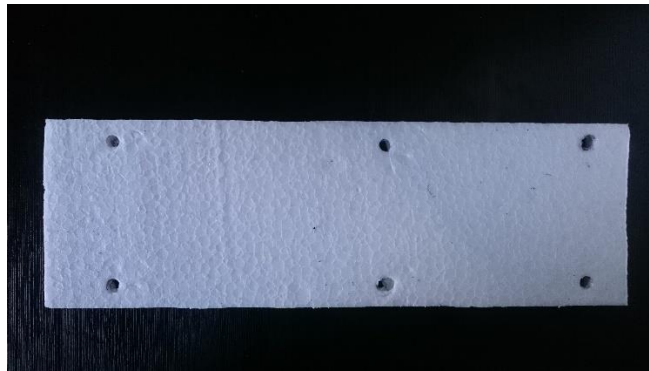
Error Típico, velocidad de quemado: $u_v = 0,57$ [mm/min]

5.3 POLIESTIRENO

Homopolímero poliestireno conocido como poliestireno "cristal". Es un termoplástico comercial amorfo, transparente e incoloro, rígido, relativamente duro y quebradizo. Tiene buenas propiedades eléctricas, una excelente resistencia a la radiación gamma y puede ser esterilizado por rayos X, sin embargo su resistencia química y a los rayos UV es débil. Modificado por incorporación de elastómeros, se vuelve poliestireno de (alto) impacto opaco. Sus aplicaciones incluyen electrodomésticos, contenedores, embalajes, barnices, difusores de luz y para el Poliestireno de

alto impacto, cajones, tazas, cubiertas de cintas musicales, etc. El poliestireno también se utiliza ampliamente como espuma estructural y expandida en esferas para el embalaje y las guarniciones. Para más especificaciones del material ficha técnica en anexos 4. [15]

En la figura 28 se muestran las probetas del poliestireno expandido espesor de 9 [mm] antes, durante y después del ensayo.



(a)



(b)

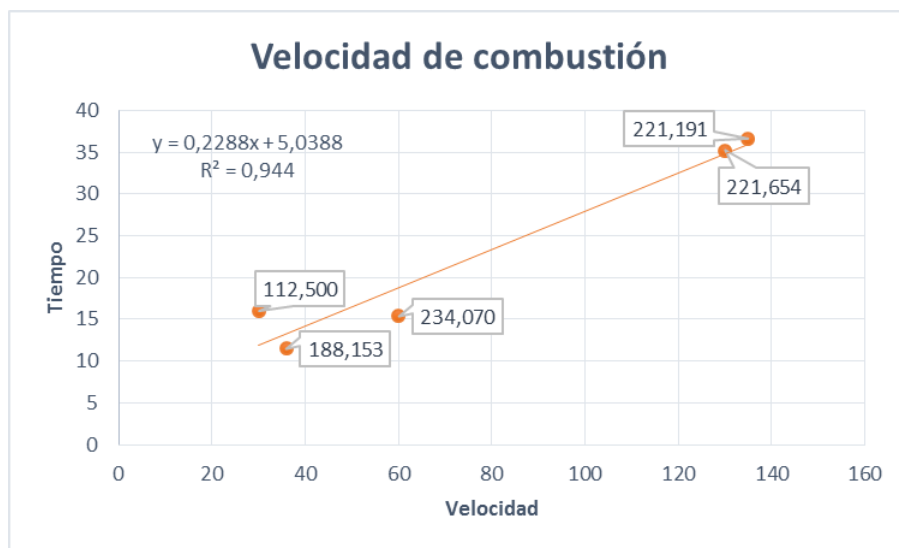


(c)

Figura 28. Probeta poliestireno expandido 9 [mm]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor)

Tabla 12. Datos poliestireno expandido 9 [mm]. (Autor)

MATERIAL	PROBETA	DISTANCIA QUEMADO (mm)	TIEMPO QUEMADO (s)	VELOCIDAD QUEMADO (mm/min)	TEMPERATURA (°C)	HR %
POLIESTIRENO	1	60	15,38	234,070	23	78
	2	130	35,19	221,654	23	78
	3	30	16	112,500	23	78
	4	135	36,62	221,191	23	78
	5	36	11,48	188,153	23	78



Gráfica 7. Velocidad de combustión poliestireno expandido 9 [mm]. (Autor)

Media, velocidad de quemado: $\bar{x}_v = 195,51$ [mm/min]

Desviación estándar, velocidad de quemado: $\sigma_v = 49,43$ [mm/min]

Error Típico, velocidad de quemado: $u_v = 22,11$ [mm/min]

5.4 POLIURETANO

La espuma flexible de poliuretano es un material producido por la reacción de un poliol tipo poliéster y un polisocianato orgánico en presencia de aditivos, tales como catalizadores, colorantes y agentes activos de superficie, entre otros, que se compone principalmente de grupos uretano distribuidos por toda la molécula. Algunas de sus aplicaciones son tapicería de autos, marroquinería y colchonería. Para mayores especificaciones del material ver anexos 4.

5.4.1 Poliuretano Densidad 15 [kg/m³]

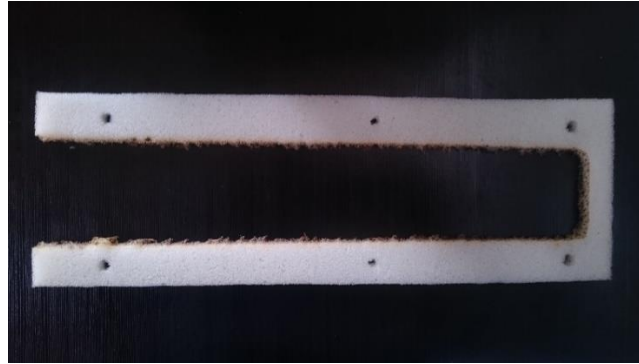
En la figura 29 se muestran las probetas del poliuretano de densidad 15 [kg/m³] antes, durante y después del ensayo.



(a)



(b)

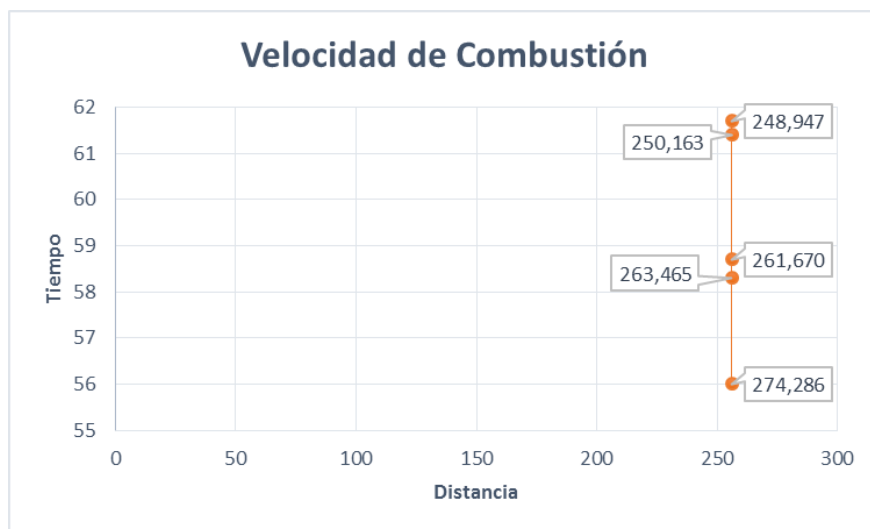


(c)

Figura 29. Probeta poliuretano 15 [kg/ m³]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor)

Tabla 13. Datos poliuretano 15 [kg/m³]. (Autor)

MATERIAL	PROBETA	DISTANCIA QUEMADO (mm)	TIEMPO QUEMADO (s)	VELOCIDAD QUEMADO (mm/min)	TEMPERATURA (°C)	HR %
POLIURETANO (15 [kg/m ³])	1	256	58,7	261,670	22	65
	2	256	56	274,286	22	65
	3	256	58,3	263,465	22	65
	4	256	61,7	248,947	22	65
	5	256	61,4	250,163	22	65



Gráfica 8. Velocidad de combustión 15[kg/m³]. (Autor)

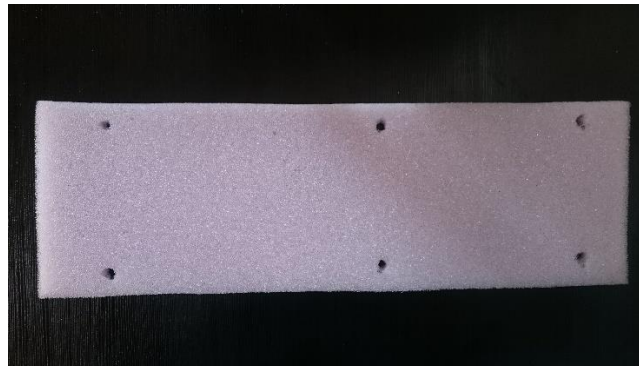
Media, velocidad de quemado: $\bar{x}_v = 259,71$ [mm/min]

Desviación estándar, velocidad de quemado: $\sigma_v = 10,46$ [mm/min]

Error Típico, velocidad de quemado: $u_v = 4,68$ [mm/min]

5.4.2 Poliuretano Densidad 20 [kg/m³]

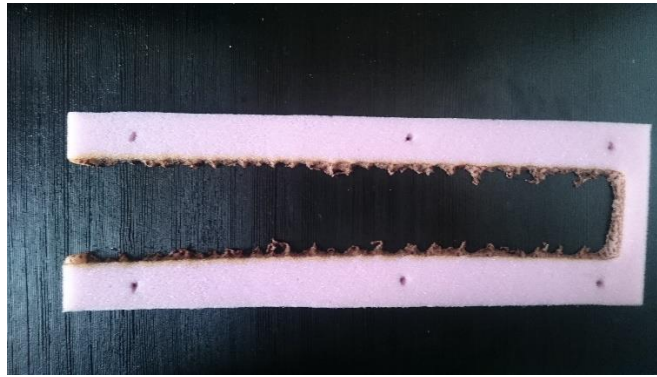
En la figura 30 se muestran las probetas del poliuretano de densidad 15 [kg/m³] antes, durante y después del ensayo.



(a)



(b)



(c)

Figura 30. Probeta poliuretano 20 [kg/ m3]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor)

Tabla 14. Datos poliuretano 20 [kg/ m3]. (Autor)

MATERIAL	PROBETA	DISTANCIA QUEMADO (mm)	TIEMPO QUEMADO (s)	VELOCIDAD QUEMADO (mm/min)	TEMPERATURA (°C)	HR %
POLIURETANO (20 [kg/m ³])	1	256	91,7	167,503	26	70
	2	256	92,2	166,594	26	70
	3	256	88,7	173,168	26	70
	4	256	90,7	169,350	26	70
	5	256	88,3	173,952	26	70



Gráfica 9. Velocidad de combustión poliuretano 20 [kg/ m3]. (Autor)

Media, velocidad de quemado: $\bar{x}_v = 170,11$ [mm/min]

Desviación estándar, velocidad de quemado: $\sigma_v = 3,31$ [mm/min]

Error Típico, velocidad de quemado: $u_v = 1,48$ [mm/min]

5.4.3 Poliuretano Densidad 26 [kg/m³]

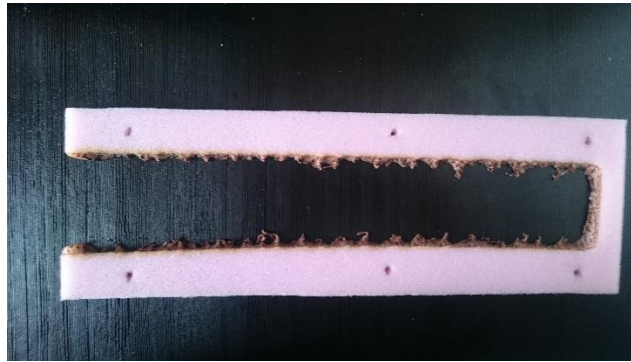
En la figura 31 se muestran las probetas del poliuretano de densidad 26 [kg/m³] antes, durante y después del ensayo.



(a)



(b)

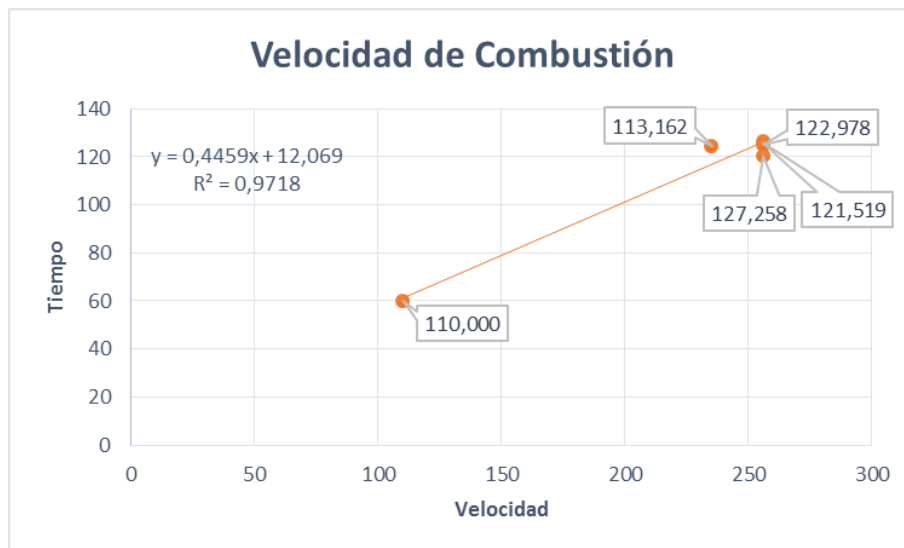


(c)

Figura 31. Probeta poliuretano 26 [kg/m³]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor)

Tabla 15. Datos poliuretano 26 [kg/m³]. (Autor)

MATERIAL	PROBETA	DISTANCIA QUEMADO (mm)	TIEMPO QUEMADO (s)	VELOCIDAD QUEMADO (mm/min)	TEMPERATURA (°C)	HR %
POLIURETANO (26 [kg/m ³])	1	110	60	110,000	26	70
	2	235	124,6	113,162	26	70
	3	256	126,4	121,519	26	70
	4	256	124,9	122,978	26	70
	5	256	120,7	127,258	26	70



Gráfica 10. Velocidad de combustión poliuretano 26 [kg/m³]. (Autor)

Media, velocidad de quemado: $\bar{x}_v = 118,98$ [mm/min]

Desviación estándar, velocidad de quemado: $\sigma_v = 7,17$ [mm/min]

Error Típico, velocidad de quemado: $u_v = 3,21$ [mm/min]

5.5 POLICLORURO DE VINILO PVC (Espesor 0,3 [mm])

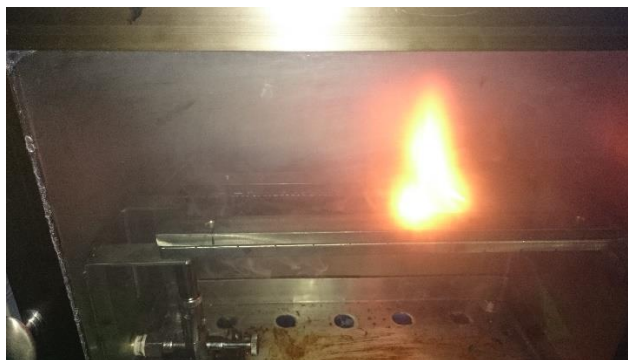
El Policloruro de Vinilo es un moderno, importante y conocido miembro de la familia de los termoplásticos. Es un polímero obtenido de dos materias primas naturales: Cloruro de sodio o sal común (ClNa) (57%) y petróleo o gas natural (43%) siendo por lo tanto menos dependiente de recursos no renovables que otros plásticos.

Es uno de los polímeros más estudiados y utilizados por el hombre para su desarrollo y confort, dado que por su amplia versatilidad es utilizado en áreas tan diversas como la construcción, energía, salud, preservación de alimentos y artículos de uso diario, entre otros, para más especificaciones del material ver ficha técnica en anexos 4. [17]

En la figura 32 se muestran las probetas del PVC espesor 0,3 [mm] antes, durante y después del ensayo.



(a)



(b)

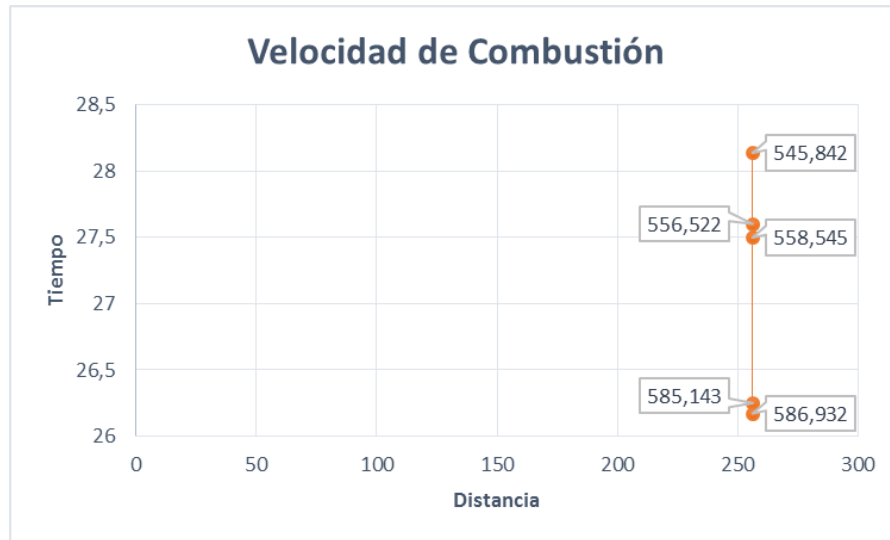


(c)

Figura 32. Probeta PVC espesor 0,2 [mm]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor)

Tabla 16. Datos PVC espesor 0,3 [mm]

MATERIAL	PROBETA	DISTANCIA QUEMADO (mm)	TIEMPO QUEMADO (s)	VELOCIDAD QUEMADO (mm/min)	TEMPERATURA (°C)	HR %
POLICLORURO DE VINILO PVC	1	256	27,6	556,522	27	55
	2	256	28,14	545,842	27	55
	3	256	27,5	558,545	27	55
	4	256	26,25	585,143	27	55
	5	256	26,17	586,932	27	55



Gráfica 11. Velocidad de combustión PVC 0,3 [mm]. (Autor).

Media, velocidad de quemado: $\bar{x}_v = 566,60$ [mm/min]

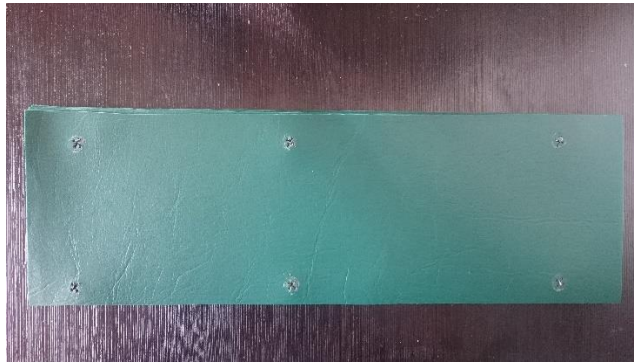
Desviación estándar, velocidad de quemado: $\sigma_v = 18,40$ [mm/min]

Error Típico, velocidad de quemado: $u_v = 8,23$ [mm/min]

5.6 POLIPIEL (Espesor 1,2 [mm])

Es un material sintético que se asemeja a la textura del cuero natural, su composición es 80% PVC, 18% poliéster y 2% poliuretano, el fabricante nacional PROQUINAL S.A. garantiza el cumplimiento de la norma FMVSS 302 en sus productos para la tapicería de automóviles. [18]

En la figura 33 se muestran las probetas de la polipiel espesor 1,2 [mm] antes, durante y después del ensayo. Cada una de las probetas del ensayo fueron hechas con material Ferro Forte de la empresa colombiana PROQUINAL S.A. [18].



(a)



(b)

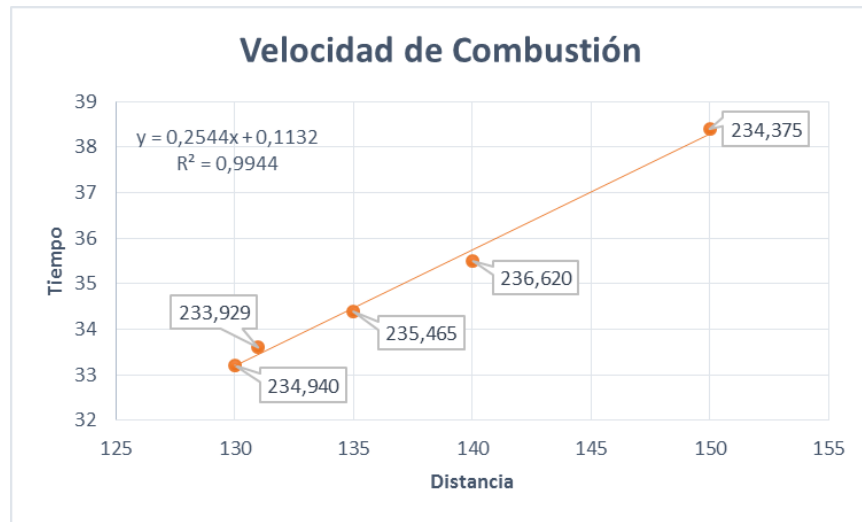


(c)

Figura 33. Probeta polipiel espesor 1,2 [mm]: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor)

Tabla 17. Datos polipiel espesor 1,2 [mm] (Autor)

MATERIAL	PROBETA	DISTANCIA QUEMADO (mm)	TIEMPO QUEMADO (s)	VELOCIDAD QUEMADO (mm/min)	TEMPERATUR A (°C)	HR %
POLIPIEL (80% PVC, 18% polyester, 2% poliuretano)	1	140	35,5	236,620	26	58
	2	135	34,4	235,465	26	58
	3	150	38,4	234,375	26	56
	4	131	33,6	233,929	26	56
	5	130	33,2	234,940	26	56



Gráfica 12. Velocidad de combustión polipiel 1,2 [mm] (Autor)

Media, velocidad de quemado: $\bar{x}_v = 235,07$ [mm/min]

Desviación estándar, velocidad de quemado: $\sigma_v = 1,04$ [mm/min]

Error Típico, velocidad de quemado: $u_v = 0,47$ [mm/min]

5.7 POLIÉSTER

Las fibras de poliéster son 50% cristalinas y el ángulo de sus moléculas puede variar. Sus propiedades son muy sensibles a los procesos termodinámicos. Básicamente el poliéster, a través de modificaciones químicas y físicas, puede ser adaptado hacia el uso final que se le va a dar, como puede ser fibras para ropa, textiles, para el hogar o simplemente filamentos o hilos. Se usa en

prendas, fabricación de empaques para bebidas, componentes eléctricos, cintas adhesivas, carcazas y piezas para la industria automotriz entre otros. [19]

En el ensayo se consideraron dos textiles diferentes a base de poliéster, el primero con un contenido 100% poliéster (fabricante) y el segundo con un contenido de 65% de algodón y 35% de poliéster.

5.7.1 Poliéster 100%

Durante el ensayo se demostró que el poliéster es un polímero ignífugo ya que al momento que la llama se retira del material la combustión de este termina, quedando simplemente la parte del material consumido por la llama del mechero como se muestra en la figura 34, la combustión a lo largo de la probeta no se genera.

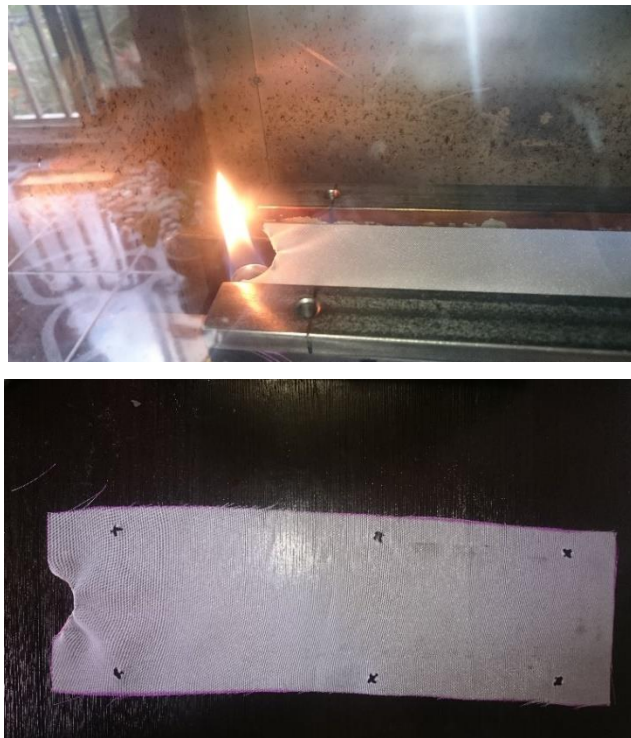


Figura 34. Probeta poliéster 100 %

5.7.2 Poliéster (65% algodón – 35% poliéster)

En la figura 35 se muestran la probeta de poliéster con un contenido del 35 % antes, durante y después del ensayo.



(a)



(b)

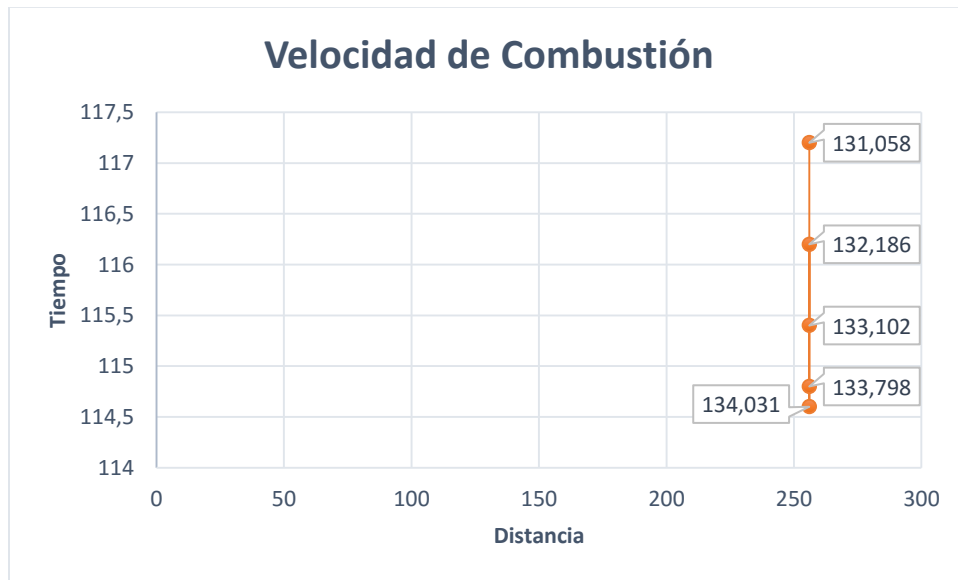


(c)

Figura 35. Probeta poliéster 35%: a) antes del ensayo, b) durante el ensayo, c) después del ensayo. (Autor)

Tabla 18. Datos poliéster 35%. (Autor)

MATERIAL	PROBETA	DISTANCIA QUEMADO (mm)	TIEMPO QUEMADO (s)	VELOCIDAD QUEMADO (mm/min)	TEMPERATURA (°C)	HR %
POLYESTER 35% + ALGODÓN 65%	1	256	117,2	131,058	26	55
	2	256	114,6	134,031	26	55
	3	256	114,8	133,798	26	55
	4	256	116,2	132,186	26	55
	5	256	115,4	133,102	26	55



Gráfica 13. Velocidad de combustión poliéster 35%. (Autor.)

Media, velocidad de quemado: $\bar{x}_v = 132,84$ [mm/min]

Desviación estándar, velocidad de quemado: $\sigma_v = 1,23$ [mm/min]

Error Típico, velocidad de quemado: $u_v = 0,55$ [mm/min]

5.8 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS DIFERENTES ESTIMACIONES DE VELOCIDAD Y COMBUSTIÓN DE LOS MATERIALES POLIMÉRICOS ENSAYADOS

5.8.1 Velocidades de combustión de los diferentes materiales poliméricos

En la tabla 19 se entrega el consolidado del estimado de las velocidades de combustión de diferentes materiales poliméricos durante los ensayos bajo la norma FMVSS 302, donde se obtuvo el menor valor para la fibra de vidrio con resina P-2530 A de 15,62 [mm/min], el máximo se obtuvo con el material polimérico PVC 566 [mm/min]. En la gráfica 14 se puede observar de una manera más intuitiva la diferencia de velocidades entre los materiales

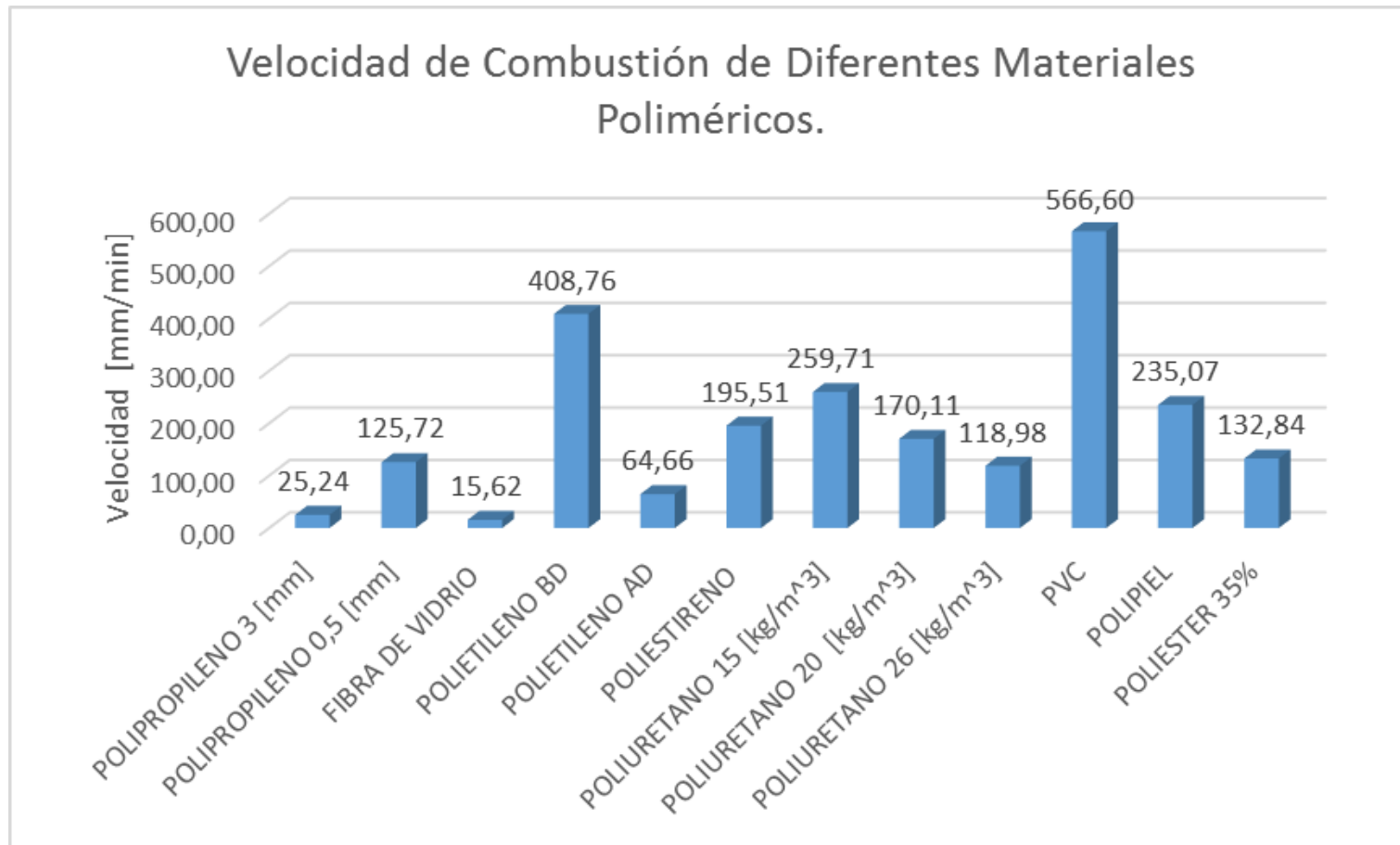
Tabla 19. Velocidad de combustión de materiales poliméricos. (Autor)

MATERIAL	VELOCIDAD QUEMADO (mm/min)
POLIPROPILENO 3 [mm]	25,24
POLIPROPILENO 0,5 [mm]	125,72
FIBRA DE VIDRIO	15,62
POLIETILENO BD	408,76
POLIETILENO AD	64,66
POLIESTIRENO	195,51
POLIURETANO 15 [kg/m ³]	259,71
POLIURETANO 20 [kg/m ³]	170,11
POLIURETANO 26 [kg/m ³]	118,98
PVC	566,60
POLIPIEL	235,07
POLIESTER 35%	132,84

La mayor velocidad de combustión permitida por la norma FMVSS 302 para vehículos de transporte es de 4 [in/min] (102 [mm/min]). [9] Según la velocidad de combustión estimada para los diferentes materiales poliméricos y la norma FMVSS 302, en la tabla 20 se muestra que materiales pasaron el requerimiento de la norma y cuáles no.

Tabla 20. Velocidades de combustión vs. norma FMVSS 302. (Autor)

MATERIAL	VELOCIDAD QUEMADO (mm/min)	NORMA FMVSS 302
POLIPROPILENO 3 [mm]	25,24	PASA
POLIPROPILENO 0,5 [mm]	125,72	NO PASA
FIBRA DE VIDRIO	15,62	PASA
POLIETILENO BD	408,76	NO PASA
POLIETILENO AD	64,66	PASA
POLIESTIRENO	195,51	NO PASA
POLIURETANO 15 [kg/m ³]	259,71	NO PASA
POLIURETANO 20 [kg/m ³]	170,11	NO PASA
POLIURETANO 26 [kg/m ³]	118,98	NO PASA
PVC	566,60	NO PASA
POLIPIEL	235,07	NO PASA
POLIESTER 35%	132,84	NO PASA
POLIESTER 100%	0,00	PASA



Gráfica 14. Velocidad de combustión de materiales poliméricos. (Autor)

5.8.2 Comportamiento de los diferentes materiales poliméricos durante la combustión

Durante los ensayos se prestó atención a las características de quemado que se enuncian en la tabla 20, de la probeta durante la combustión:

Tabla 21. Referencia de características de cada material polimérico durante la combustión. (Autor).

Inicio de llama en la probeta en presencia del mechero	[R] Rápido	[M] Medio	[L] Lento
Comportamiento de la probeta en presencia de la flama	[A] Arde	[D] Derrite	[AE] Auto extingue
Olor	[F] Fuerte	[M] Medio	[B] Bajo
Presencia de Humos	[A] Alta	[M] Media	[B] Baja
Color Humos	[B] Blanco	[G] Gris	[N] Negro
Cenizas	[S] Si		[N] No
Observaciones			

A través de las características enunciadas en la tabla 20 se elaboró la tabla 21, que sirve como sistema comparativo entre los materiales poliméricos ensayados.

Tabla 22. Características en la combustión de los materiales ensayados. (Autor)

CARACTERÍSTICAS / MATERIAL	Inicio de llama en la probeta en presencia del mechero	Comportamiento de la probeta en presencia de la flama	Olor	Presencia de humos	Color humos	Cenizas	Oservaciones
POLIPROPILENO 3 [mm]	L	A - D	F	B	B	N	Gotea a velocidad media, se endurece rápidamente, es frágil y quebradizo
POLIPROPILENO 0,5 [mm]	R	A - D - AE	M	B	B	N	No gotea
FIBRA DE VIDRIO	L	A	F	A	N	S	No gotea, se consume la resina poliéster, la fibra de vidrio se carboniza pero se distinguen las fibras.
POLIETILENO BD	R	A - D	M	B	B	N	Goteo pobre
POLIETILENO AD	L	A - D	M	B	B	N	Gotea a velocidad alta, continua llama con el goteo, se endurese rápidamente, es frágil y quebradizo
POLIESTIRENO	R	A - D - AE	M	B	B	N	No gotea
POLIURETANO 15 [kg/m ³]	R	A - D	F	B	B	N	Goteo puntual, no se contiunua la llama en el goteo, despues de ser quedado queda un material blando y pegajoso
POLIURETANO 20 [kg/m ³]	R	A - D	F	B	B	N	Goteo puntual, no se contiunua la llama en el goteo, despues de ser quedado queda un material blando y pegajoso
POLIURETANO 26 [kg/m ³]	R	A - D - AE	F	B	B	N	Goteo puntual, no se contiunua la llama en el goteo, despues de ser quedado queda un material blando y pegajoso
PVC	R	A	F	A	N	S	No gotea, el material queda carbonizado
POLIPIEL	R	A - AE	F	A	G	S	No gotea, el material queda carbonizado
POLIESTER 100 %	R	A - AE	B	B	B	N	No existe combsuti3n a lo largo de la probeta
POLIESTER 35 % + 65 % ALGOD3N	R	A	M	M	G	N	No gotea, se consume totalmente el material.

5.9 ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Durante el ensayo con fibra de vidrio se pudo notar cómo el combustible usado en la combustión de la probeta, fue la resina poliéster de la que está hecha la misma, ya que la fibra como tal, simplemente se carbonizó. La combustión se mantuvo durante el tiempo que hubo resina poliéster en la probeta; por ende, la resina poliéster usada al fabricar piezas de fibra de vidrio, puede ser un retardante o un acelerador en caso de conflagración dependiendo de las propiedades químicas y físicas de la resina.
- El polietileno de baja densidad fue el material con la segunda más alta velocidad de combustión, con 408,76 [mm/min] después del PVC con 566,5 [mm/min], lo cual los convierte experimentalmente en los materiales menos deseados para usar en lugares con riesgo de conflagración.
- La velocidad de combustión estimada para el poliestireno expandido fue de 195,51 [mm/min], a la luz de la norma es una velocidad alta para pasarla; sin embargo, este material durante los ensayos se auto extinguió, ninguna de las probetas alcanzó a llegar a la marca de 1,5 in desde el extremo sujeto del porta probetas, lo que hace inferir experimentalmente que el material como tal no es suficiente para mantener una combustión, necesita de una llama o flama externa que la mantenga.
- El policloruro de vinilo fue el material con la mayor velocidad de combustión; a la luz de los ensayos puede estimarse que es poco apto para usos industriales dada su fácil propagación de llama; sin embargo, las probetas que se usaron en este ensayo tenían un espesor muy pequeño, que comparado con el caso del polipropileno, haría asumir experimentalmente que a mayor espesor ese valor de velocidad disminuirá.
- En los ensayos de poliéster 100%, se comprobó experimentalmente que es un material ignífugo, ya que en ausencia de llama se auto extingue, para poder mantener combustión

en el poliéster, es necesario que la llama generada por otro factor externo recorra el material y lo consuma.

- En los ensayos se tuvieron dos materiales compuestos, polipiel (80% PVC, 18 % poliéster, 2% poliuretano) y tela (65% algodón, 35% poliéster); estos materiales tuvieron comportamientos de velocidad diferentes a los presentados por su polímero interno en los ensayos: la polipiel con referencia al PVC disminuyó su velocidad en un 58,51%, la tela en referencia al poliéster pudo presentar combustión gracias al algodón presente en ella. Se puede inferir experimentalmente que en el primer caso el poliéster actúa como un retardante y en el segundo caso el algodón actúa como un acelerador de la combustión.
- En algunos ensayos, una o dos probetas de la muestra tuvieron comportamientos diferentes al apagarse, esto puede estar relacionado con una corriente de aire o contaminación interna del material de la probeta, sin embargo, los valores de velocidad fueron congruentes con las probetas que no presentaron estos problemas.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- A través de un análisis de la temperatura de flama adiabática entre el gas natural (CH_4) y el gas propano (C_3H_8), se determinó una diferencia porcentual del 0,8%, al ser dicha diferencia relativamente pequeña, se puede realizar el cambio de combustible al gas propano ya que la norma recomienda usar el gas natural como combustible a usar en el ensayo.
- Se determinó que el máximo calor dentro de la cámara de combustión sería causado por una temperatura de 200°C , valor que sirvió para permitir el uso del acero AISI-SAE 304 como material a usar en la estructura del banco de pruebas.
- El banco de pruebas cumple con las dimensiones y especificaciones recomendadas por la norma FMVSS 302; así mismo, los ensayos realizados están bajo la norma, con la salvedad de la temperatura y humedad relativa que ella recomienda, por tal razón en cada ensayo se llevó un registro de humedad relativa y temperatura del ambiente donde se hizo el ensayo.
- Para hacer la puesta a punto del banco de pruebas se usó un material referenciable con estudios de velocidad de combustión anteriores a éste, en dichos estudios se tenía como referencia la fibra de vidrio con una velocidad de combustión de 15,35 [mm/min]; en el estudio hecho por el autor para el mismo material se estimó un promedio de velocidad de combustión de 15,65 [mm/min], entre estas dos velocidades se obtiene una diferencia porcentual de 1,92 %, que permite usar el banco de pruebas de manera experimental para calcular velocidades de combustión.
- Se hizo un análisis de reproducibilidad y repetibilidad (R & R) por medio del método promedios y rangos, en pro de tener una segunda herramienta que garantizará el banco de pruebas de manera experimental, en este análisis se encontró que el porcentaje de

reproducibilidad y repetibilidad era menor al 10% con un valor de 9,13 % lo cual aprueba los resultados del ensayo realizados por el banco de pruebas.

- Se hizo el ensayo con probetas de polipropileno de diferentes espesores, las velocidades que arrojaron estos ensayos determinó que la diferencia de espesores afecta la velocidad de combustión: a menor espesor el material tuvo una velocidad de combustión mayor.
- Entre el polietileno de baja densidad y el polietileno de alta densidad existe una diferencia porcentual en las velocidades del 84,18 %, lo cual es completamente atribuible a la diferencia de densidades entre los mismos; a mayor densidad menor fue la velocidad de combustión estimada.
- Con el poliuretano se plantearon los ensayos con tres valores de densidad diferentes, cada uno entregó un valor de velocidad de combustión inversamente proporcional a su densidad, intuyendo experimentalmente que en este material, a mayor densidad menor velocidad de combustión
- Se realizaron cinco ensayos por material, por lo tanto los resultados de estimación de la velocidad de combustión representan solo la muestra no se infiere sobre la población, es decir, que la muestra no es representativa de la población en este caso el material ensayado.

6.2 RECOMENDACIONES

- Se debe contar con un suministro continuo y suficiente de combustible para realizar los ensayos, evitando así paradas de los mismos, que pueden influir en los resultados finales.
- Después de cada ensayo debe limpiarse bien la cámara de combustión, con el objetivo de remover cualquier material que haya podido quedarse adherido a las paredes y piso de la cámara y al mechero.

- En materiales que se intuya que pueden gotear durante el ensayo, es importante contar con un dispositivo que proteja la boca del mechero, con el fin de evitar que el quemador que da paso al gas, se pueda tapar.
- Al momento de fabricar las probetas es necesario tener especial cuidado con sus dimensiones, para evitar que éstas estén por fuera del porta probeta en el montaje del ensayo.
- Dadas las altas temperaturas que se tendrán en la cámara de combustión, es necesario que el operador advierta contactos fortuitos con las superficies calientes de las paredes, que pueden generar quemaduras en la piel.
- Los ensayos deben realizarse en espacios abiertos que permitan que los gases y humos de la combustión se volaticen fácilmente, evitando así complicaciones respiratorias para el operador.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] YUNES A ÇENGEL - MICHAEL A. BOLES. Termodinámica. 7ª Edición. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A, 2012.
- [2] MICHAEL J. MORAN – HOWARD N. SHAPIRO. Fundamentos de Termodinámica Técnica. 2ª Edición. Barcelona: Editorial Reverté S.A, 2004.
- [3] TIBAQUIRA J, TREJOS J, VARGAS H. Diseño y construcción de una cámara de combustión para una microturbina de gas. Pereira (Colombia), Universidad Tecnológica de Pereira. {En Línea}. {Consultado 13 de junio de 2016}. Disponible en: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/1559/3847>
- [4] HOLMAN J.P. Transferencia de calor. 10ª Edición. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A, 1999.
- [5] YUNES A ÇENGEL. Transferencia de calor y masa. 3ª Edición. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A, 2007.
- [6] AMERICAN WELDING SOCIETY. Código de soldadura en estructuras de acero. 22^{da} Edición. Miami. AWS, 2010.
- [7] INDURA. Códigos, normas y especificaciones. {En Línea}. {Consultado 14 de junio de 2016}. Disponible en: https://www.academia.edu/8489344/CODIGOS_NORMAS_Y_ESPECIFICACIONES
- [8] FACULTAD DE INGENIERIA INDUSTRIAL. Protocolo soldadura. Bogotá (Colombia), Escuela Colombiana de Ingeniería. {En Línea}. {Consultado 14 de junio de 2016}. Disponible en: http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/3637_soldadura.pdf
- [9] U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION FEDERAL MOTOR VEHICLE SAFETY STANDARD. Laboratory Test Procedure for FMVSS 302 Flammability of Interior Materials. Washington DC. FMVSS 302, 2012.
- [10] TP LABORATORIO QUIMICO. Mechero Bunsen. {En Línea}. {Consultado 14 de junio de 2016}. Disponible en: <https://www.tplaboratorioquimico.com/laboratorio-quimico/materiales-e-instrumentos-de-un-laboratorio-quimico/mechero-bunsen.html>
- [11] PADILLA P. Diego, SERRANO A. Carlos. Estudiantes de Ingeniería Mecánica. Riobamba, 2013, 158 páginas. Diseño y construcción del equipo para ensayos de inflamabilidad aplicado a

materiales de autopartes según la norma ISO 3795. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Mecánica. Escuela de Ingeniería Mecánica.

[12] FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS, Laboratorio de Física I Experimento II, Universidad Tecnológica de Pereira. {En Línea}. {Consultado 16 de junio de 2016}. Disponible en: <http://media.utp.edu.co/facultad-ciencias-basicas/archivos/contenidos-departamento-de-fisica/exp-2-trat-estd-datos-exp-medirectas-2013.pdf>

[13] LLAMOSA L, CONTRERAS L, BOTERO M. Estudio de repetibilidad y reproducibilidad utilizando el método de promedios y rangos para el aseguramiento de la calidad de los resultados de calibración de acuerdo con la norma técnica NTC-ISO/IEC 17025. Scientia et Technica Año XIII, No 35, Agosto de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. {En Línea}. {Consultado 17 de junio de 2016}. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4805090.pdf>

[14] ACADEMIA ONLINE. Rendimiento de la Combustión. {En Línea}. {Consultado 13 de junio de 2016}. Disponible en: <http://www.academiatesto.com.ar/cms/?q=rendimiento-de-la-combustion>

[15] GOODFELLOW, Todos los materiales para Investigación Científica y Fabricación. Catálogo de materiales. {En Línea}. {Consultado 10 de junio de 2016}. Disponible en: http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCat5.php?ewd_token=ludp9cMqF3sY16P8RMbT0WhTNMa62X&n=DvpFr2RYqB1MxEDY5qv6j0Us4MJDnj

[16] SUBGERENCIA CULTURAL DEL BANCO DE LA REPÚBLICA. (2015). Fibra de vidrio. {En Línea}. {Consultado 10 de junio de 2016}. Disponible en: http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/arte/fibra_de_vidrio

[17] TEXTOS CIENTÍFICOS, Especificaciones Policloruro de Vinilo PVC. {En Línea}. {Consultado 15 de junio de 2016}. Disponible en: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/pvc>

[18] PROQUINAL, Tapicería automotriz. {En Línea}. {Consultado 11 de junio de 2016}. Disponible en: <http://www.proquinal.com/>

[19] PELCATEX HILOS DE CALIDAD. Especificaciones Poliéster. {En Línea}. {Consultado 11 de junio de 2016}. Disponible en: http://www.pecaltex.com.mx/Pecaltex/Sobre_el_Poliester.html

[20] VIDRIO DE SEGURIDAD VITELSA. Descripción Temper vidrio templado. {En Línea}. {Consultado 27 de mayo de 2016}. Disponible en: <http://vitelsa.com.co/productos/temper/plano/>

[21] FACULTAD DE INGENIERÍA, Ingeniería de Manufactura, Pontificia Universidad Católica Argentina. {En Línea}. {Consultado 30 de junio de 2016}. Disponible en: <http://www.uca.edu.ar/facultad/clases/ing/m210031/Tema%2011.pdf>