

# **Diseño conceptual de un dispositivo de compresión de barra de Hopkinson**

## ***Luis Alejandro Alcaraz Caracheo***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*alejandro.alcaraz@itcelaya.edu.mx*

## ***Horacio Orozco Mendoza***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*horacio.orozco@itcelaya.edu.mx*

## ***Álvaro Sánchez Rodríguez***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*alvaro.sanchez@itcelaya.edu.mx*

## ***Luis Guillermo Pastrana García***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*raven5250@gmail.com*

## ***Omar Gonzalo López Beltrán***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*omar1369v12@gmail.com*

## **Resumen**

Este trabajo expone la metodología seguida y la revisión bibliográfica necesaria para el diseño conceptual de una barra de Hopkinson de compresión, en donde se revisarán los aspectos y componentes más importantes de este dispositivo, así como los materiales elegidos para su construcción y su futura puesta en marcha, a fin de poder caracterizar dinámicamente probetas de materiales de baja impedancia mecánica.

**Palabra(s) Clave(s):** Alta tasa de deformación, barra de Hopkinson, impedancia mecánica, propagación unidimensional.

## 1. Introducción

Los materiales desarrollados por las grandes industrias se transforman en un producto enfocado al uso cotidiano, y es bien sabido que el uso regular de algún material es la prueba más severa a la cual se someten. Es poco frecuente que un material sea expuesto a una carga cuasiestática (como los ensayos más comunes de caracterización que se realizan en laboratorios mecánicos), de modo que el diseño de dispositivos que apliquen una carga de manera súbita, ayuda a los ingenieros en materiales a conocer el comportamiento de éstos para poder analizar su comportamiento ante una carga dinámica, los ejemplos más comunes son el choque de un automóvil a alta velocidad o las corrientes de aire impactando al fuselaje de un avión.

La barra de Hopkinson es una máquina que aplica una carga a una probeta, produciendo una tasa de deformación muy superior a la de un ensayo cuasiestático, dicha tasa de deformación alta oscila entre los 100 y los 10000  $s^{-1}$  [1]. En la Fig. 1 se expone de manera general la configuración comúnmente utilizada para la construcción de una barra de Hopkinson a compresión.



**Fig. 1. Esquema básico para la construcción de la barra de Hopkinson.**

La barra de Hopkinson se compone principalmente de 3 subsistemas: el disparador, el sistema de barras y el sistema de adquisición de datos. El disparador consiste en un depósito de aire (o algún gas a presión como nitrógeno), un regulador de presión, una válvula rápida, una camisa para el proyectil (cañón) y sensores para medir la velocidad del disparador. Las dos barras principales se denominan barra incidente y barra transmisora. El proyectil, viaja por el tubo e impacta la barra incidente. El impacto de estos dos elementos produce una onda que se transmite al espécimen de prueba, soportado entre las dos barras largas. La barra transmisora se encuentra en el otro lado de la probeta. Los desplazamientos elásticos medidos en las barras son utilizados para determinar las condiciones de tensión-deformación en cada extremo de la muestra.

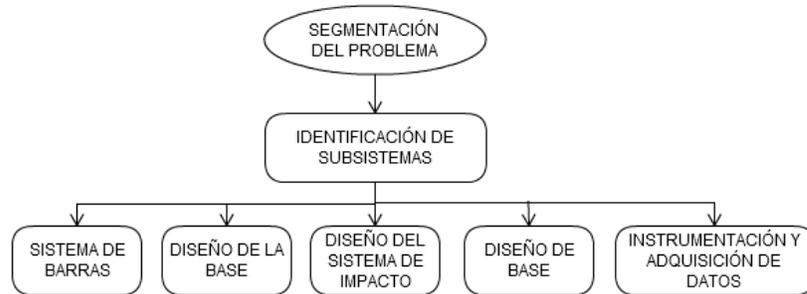
Para realizar la medición de esta onda se utilizan galgas extensiométricas, que son transductores resistivos sensibles a las deformaciones presentes en un cuerpo. Estas se adhieren a las barras transmisora e incidente cerca de la zona donde se ubica la probeta, con el fin de medir la onda de impacto y procesar los datos de la tarjeta de adquisición utilizando un software como LabVIEW para poder obtener el comportamiento dinámico de las muestras y sus curvas de esfuerzo-deformación.

## **2. Desarrollo**

La construcción de este dispositivo debe cumplir con algunos requerimientos técnicos como:

- Alcanzar una tasa de deformación de entre 100 y 10000 s<sup>-1</sup>.
- Obtener la curva esfuerzo-deformación de los especímenes de prueba.
- Capacidad de poder realizar modificaciones al sistema con relativamente pocos cambios (por ejemplo, cambio de soportes, sustitución de válvulas, reemplazo de sistema de barras).
- Facilidad de uso.
- Construcción y mantenimiento simple.
- Ensayos de materiales con impedancia mecánica baja.

Como parte del proceso de diseño se revisaron diferentes etapas, de acuerdo a la segmentación del problema, la manera en cómo se dividió el diseño se expone en la Fig. 2. Para el desarrollo de este diseño se siguió la metodología mostrada en la Fig. 3.



**Fig. 2. Proceso de segmentación del diseño de la barra de Hopkinson.**

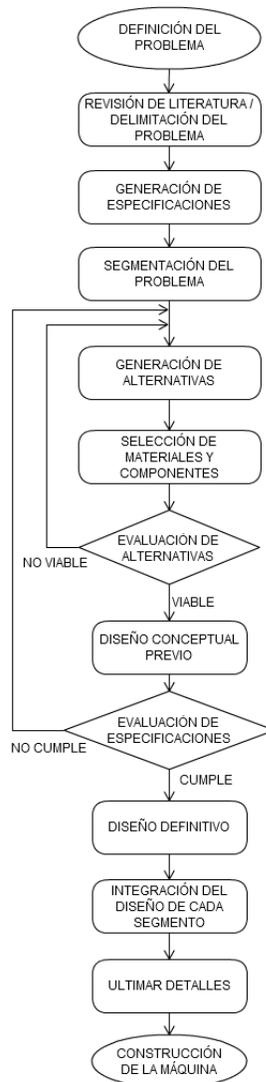


Fig. 3. Metodología para el diseño conceptual de la barra de Hopkinson.

## 2.1. Sistema de barras

### 2.1.1. Impedancia mecánica

Un parámetro determinante en la validez de los ensayos con barra Hopkinson es la impedancia mecánica,  $Z$ , de las barras y de las probetas. Se denomina impedancia acústica de un material al producto de su densidad ( $\rho$ ) y la velocidad de propagación de las ondas elásticas longitudinales a través del mismo,  $C$ . La impedancia mecánica ( $Z$ )

de la barra o de la probeta es el producto de la impedancia acústica y del área de su sección transversal ( $A$ ), como lo muestra la ecuación (1).

$$Z = A \cdot C \cdot \rho \quad (1)$$

Para conocer la velocidad de la onda ( $C$ ) de un material cualquiera basta con conocer su módulo elástico y la densidad, como se muestra en la ecuación 2.

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

Es importante tener en cuenta que la impedancia mecánica de los materiales es un factor determinante para poder observar la onda de impacto que corre a través de las barras, dado que si la impedancia de la probeta es inferior a la de las barras, la onda reflejada será muy parecida a la onda incidente y, por lo tanto, la onda transmitida será muy pequeña y difícil de detectar [1].

Puesto que las probetas que se ensayarán son de un material celular (aluminio plexoplegado), estas cuentan con una impedancia mecánica muy baja, por lo que las barras deberán de tener una impedancia similar al espécimen de prueba. De acuerdo a lo descrito por Zhao [2], es importante considerar el Nylon o el PMMA (polimetilmetacrilato, o comúnmente conocido como acrílico) para la fabricación de las barras, a pesar de que cuentan con una desventaja, la cual es que presentan un comportamiento viscoelástico, a diferencia de barras de acero o aluminio (barras usadas comúnmente para pruebas en metales) cuyo comportamiento es meramente elástico.

### **2.1.2. Dimensionamiento de las barras**

Contamos con probetas cilíndricas fabricadas con hojas de aluminio plexoplegado, las cuales poseen un diámetro de 32 mm, por lo que es importante que el diámetro de las barras (que en este caso serán de PMMA, dado que la dureza del nylon suele ser inferior a la del PMMA) sea mayor al de las probetas. Así mismo se debe cumplir con una relación establecida en [3], mostrada en la ecuación (3).

$$\frac{L}{d} \geq 20 \quad (3)$$

Considerando que las barras comercialmente se manejan en sistema inglés, se optó por utilizar un diámetro de 1.5 pulgadas o 38.1 mm, a su vez, se propuso fabricar las barras incidente y transmisora de 1 metro de longitud, de modo que de la relación expuesta en (3) se obtiene un valor de 26.24, lo cual es un valor aceptable y cumple con lo requerido por el manual ASM para pruebas en barra de Hopkinson.

## **2.2. Diseño de la base**

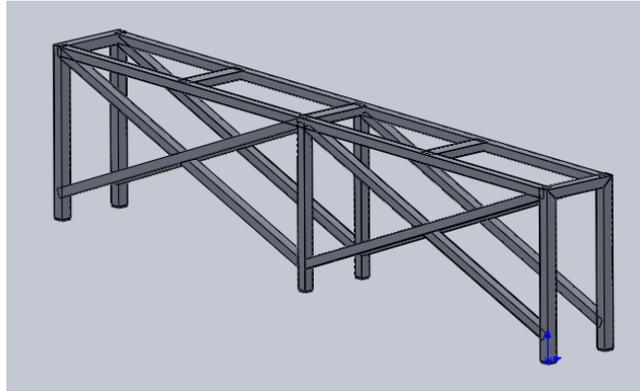
### **2.2.1. Mesa**

La base sobre la cual se soportará el sistema completo, juega un papel importante para la construcción del equipo, puesto que sobre ella reposará todo el conjunto de elementos que harán posible el ensayo en su debido momento, por lo que se generaron los siguientes requerimientos para el diseño de la estructura:

- Que sea lo suficientemente rígida para evitar que las vibraciones producidas afecten la cimentación de la estructura.
- Que sea fabricada de un material común, barato y resistente.
- Que posea estabilidad geométrica.

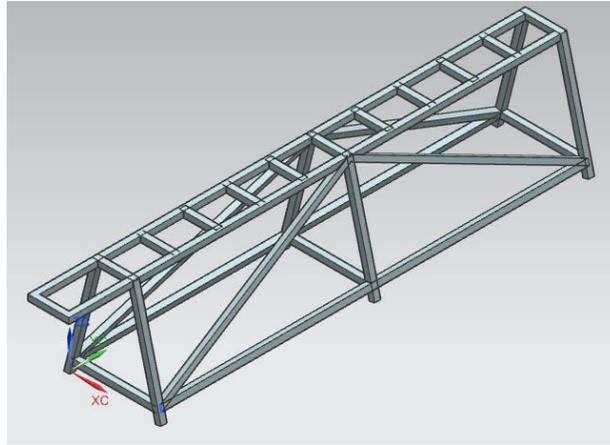
- Que sea capaz de compensar los cambios de nivel del suelo del recinto donde se instale.
- Que sea lo suficientemente larga como para poder instalar la máquina de ensayos.

En función de estas características se propuso un diseño expuesto en la Fig. 4.



**Fig. 4. Primer diseño de la mesa para la barra de Hopkinson.**

El modelo propuesto en la Fig. 4 no cumple con los requerimientos necesarios, expuestos en líneas anteriores, dado que la forma cuadrada de la estructura no brinda estabilidad en su totalidad, por lo que se desarrolló otro prototipo, el cual se muestra en la Fig. 5.



**Fig. 5. Diseño final de la base para la barra de Hopkinson.**

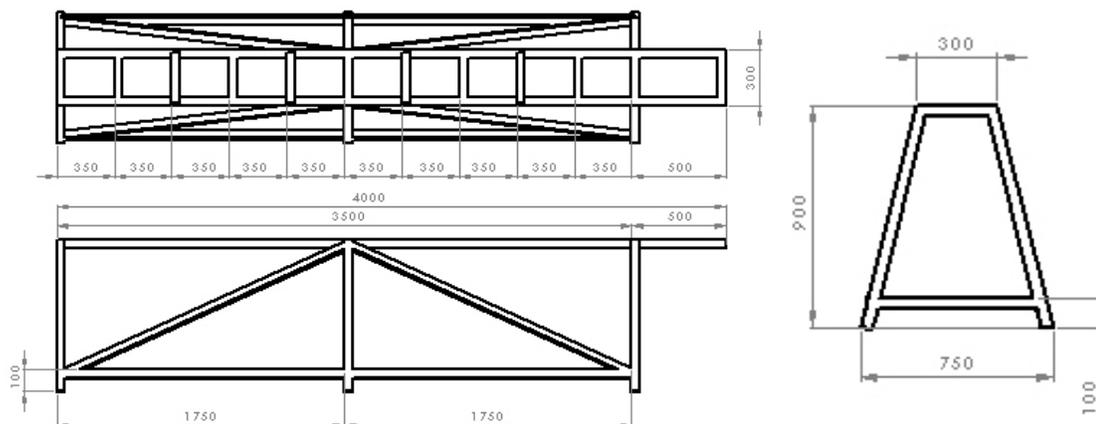
La propuesta de la Fig. 5 cumple con el requerimiento de estabilidad geométrica, dada la forma trapezoidal de la estructura; la rigidez que le aporta el tirante en diagonal ayuda demasiado para no ser afectada por los constantes impactos que se generarán durante los ensayos. Para compensar algún desnivel en el suelo se colocaron patas niveladoras, las cuales se ajustarán a la altura necesaria, de modo que en la parte superior de la mesa se logre el mismo nivel en toda la superficie.

Para la fabricación de este prototipo se utilizará perfil tubular rectangular (PTR) cuadrado de 2 pulgadas por 2 pulgadas de calibre 12, cuyas especificaciones se exponen en la tabla 1 y fueron obtenidas del catálogo del proveedor.

<b>PTR CALIBRE 12</b>			
	<b>PULGADAS</b>	<b>MILIMETROS</b>	<b>PESO (kg/m)</b>
<b>DIMENSIONES EXTERIORES</b>	2x2	51x51	4.17
<b>ESPESOR</b>	0.1046	2.7	

**Tabla 1. Especificaciones del PTR para la fabricación de la base.**

Las dimensiones de la mesa se muestran en la Fig. 6, donde se puede observar que la longitud total es de 4 metros, de los cuales 2 metros serán ocupados por la longitud de cada una de las barras y también se ocupará otro tramo más para ubicar el cañón.



**Fig. 6. Dimensiones de la base (unidades en milímetros).**

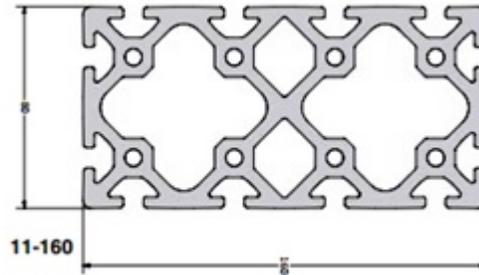
### 2.2.2. Componente para el montaje de componentes

Para la colocación de los componentes que conforman la barra de Hopkinson, se pueden utilizar diferentes elementos, los más comunes son las vigas estructurales en “I”, donde los componentes se sujetan utilizando mordazas de tornillo; mientras que la otra alternativa es el uso de perfiles de aluminio de tipo IPS, donde se atornillan los componentes utilizando los accesorios comunes para estos perfiles.

En este caso se hará uso de un perfil de aluminio Parker IPS modelo 11-160, mismo que se atornillará en la mesa diseñada para este dispositivo (ver Fig. 7) y cuyas especificaciones se muestran en la tabla 2.

Parker IPS 11-160				
Modelo	Sección transversal	Longitud	Área de la sección	Peso
11-160	160 mm x 80 mm	3.5 m	48.23 cm <sup>2</sup>	13.07 kg/m

**Tabla 2. Especificaciones del perfil Parker.**



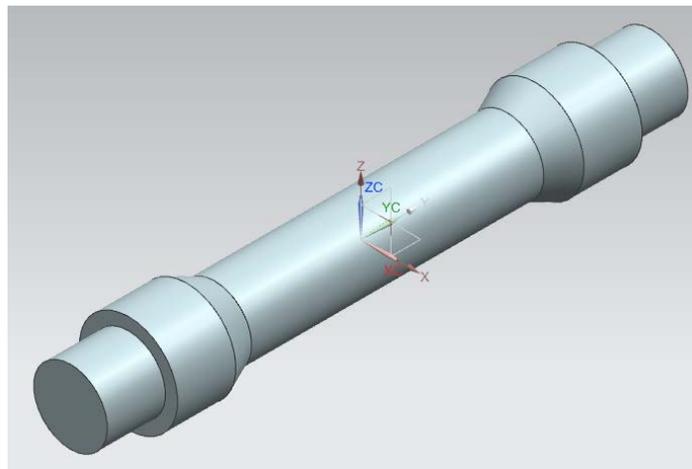
**Fig. 7. Sección transversal del perfil Parker 11-160.**

Este perfil fue elegido puesto que la forma en T de los slots hace posible el fácil deslizamiento de componentes para la sujeción de elementos como los soportes de las barras o tornillería en general, además de ser muy estables y de que ya se cuenta con uno de ellos en la institución.

### **2.3. Diseño del sistema de impacto**

Como tal, no existe un diseño ya establecido para construir el disparador, puesto que en algunos trabajos utilizan pistones neumáticos o incluso sistemas mecánicos de resorte [4] mediante el cual se acciona una palanca y un vástago aplica el impacto sobre la barra transmisora, sin embargo en este caso se utilizará uno de los métodos más comunes, el cual consiste en un cañón fabricado con un tubo de acero inoxidable. Dentro de este tubo se coloca un “proyectil” fabricado de un material con una impedancia similar a la de las barras, en este caso dicho proyectil será fabricado

también de un polímero (Nylamid), con el mismo diámetro de las barras, en el extremo que entrará en contacto con la barra incidente (ver Fig. 8); este proyectil se alinea y se coloca al fondo del cañón. Por su parte un pequeño compresor de aire se conecta al cañón y se acciona una válvula por la cual circulará el aire del compresor, y este empujará el proyectil por el cuerpo del cañón, impactando una cara de la barra transmisora.



**Fig. 8. Propuesta de diseño para el proyectil.**

Para determinar la velocidad que tendrá el proyectil al momento de accionar el sistema neumático, se colocarán un par de sensores fotoeléctricos en la boca del cañón, los cuales registrarán el momento en el cual el proyectil pasa a través de ellos y mediante software se podrá calcular la velocidad a la que viaja, dicha velocidad se obtiene en función de la presión a la cual sale el aire del compresor, este dato es muy importante ya que ayudará a determinar la tasa de deformación que sufre la probeta durante el ensayo.

Hay técnicas matemáticas que aproximan la velocidad y la tasa de deformación obtenida en cada ensayo, las cuales están reportadas en [5] y brindan una idea de cuál es la presión necesaria para poder obtener cierta tasa de deformación en función de la

presión de aire utilizada en el sistema, la ecuación (4) es un modelo obtenido por el método de conservación de la energía y se observa en las Fig. 9 y 10, respectivamente, las curvas de velocidad vs. presión en el disparador y las curvas de tasa de deformación vs. presión obtenidas para el diseño de este sistema, considerando la determinación de la tasa de deformación como se expone en la ecuación (5).

$$v_{st} = \sqrt{\frac{2}{m_{st}} \frac{P_1 V_1}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]} \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2}{m_{st}} \frac{P_1 V_1}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]} \quad (5)$$

Donde:

$v_{st}$ : Velocidad del proyectil.

$m_{st}$ : Masa del proyectil.

$P_1$ : Presión proveniente del compresor.

$V_1$ : Volumen de aire aplicado.

$\gamma$ : Constante de expansión isentrópica del gas utilizado (aire).

$P_2$ : Presión atmosférica.

$L$ : Longitud de la probeta.

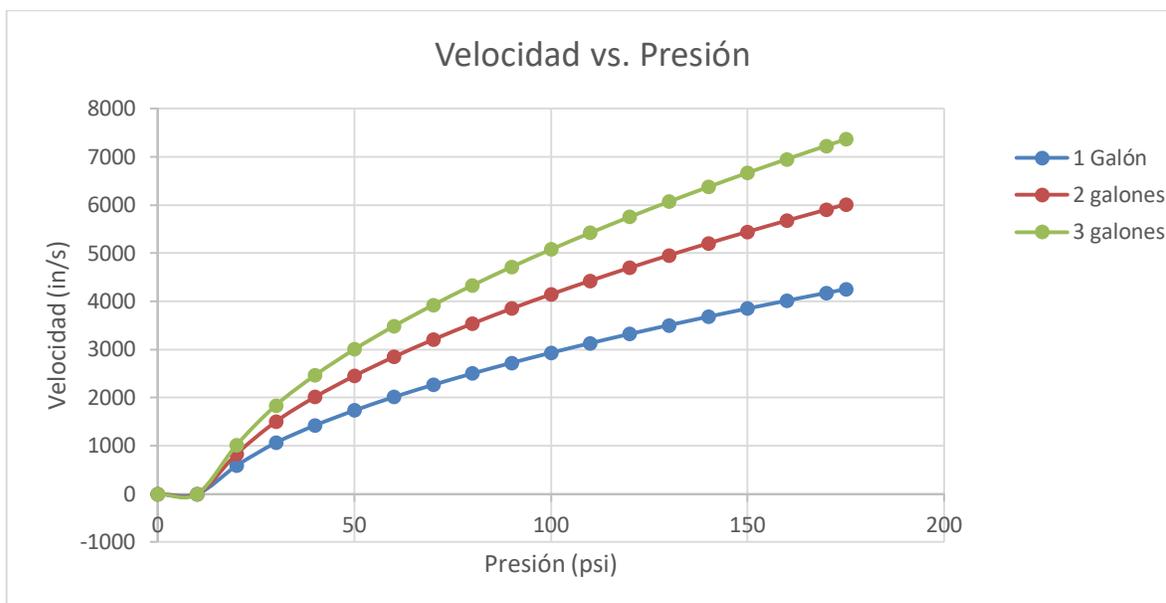


Fig. 9. Gráfico velocidad vs. presión para el proyectil del disparador.

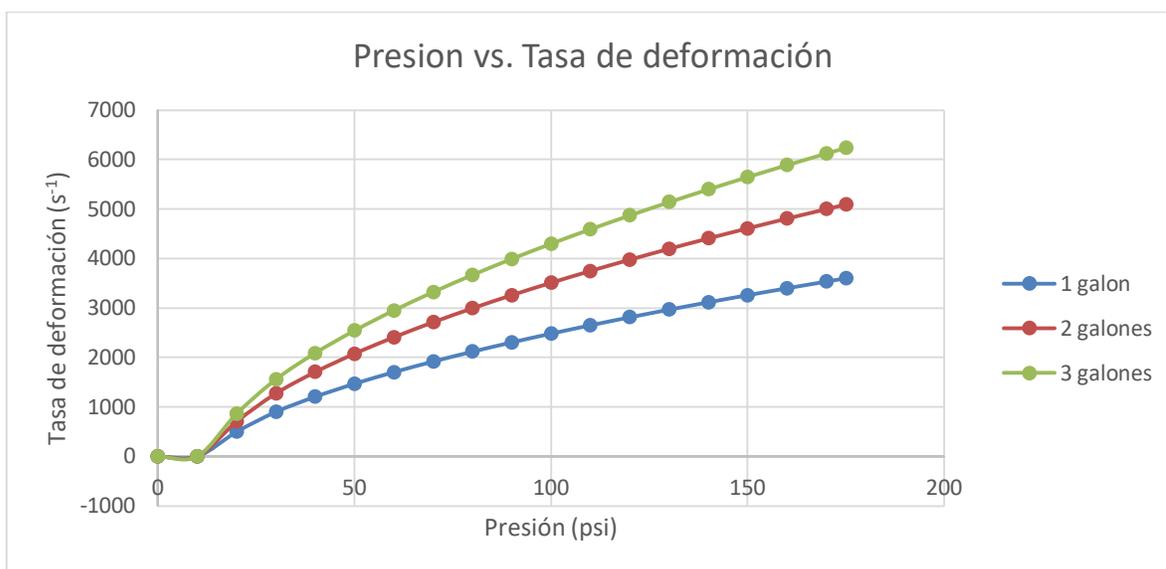


Fig. 10. Gráfico de tasa de deformación vs. presión para la probeta.

Como se mencionó anteriormente, se colocarán un par de sensores fotoeléctricos en la boca del cañón, los cuales registrarán el paso de un extremo del proyectil a través del

haz de luz producido por un LED infrarrojo, una vez ocurrido este evento, vía software se contará el tiempo transcurrido hasta que ese mismo extremo atraviese el segundo haz de luz del segundo LED, este dato servirá para determinar de manera experimental la velocidad de la barra del cañón, sabiendo que habrá una distancia fija entre ambos sensores, la Fig. 11 muestra el circuito propuesto para implementar el medidor de velocidad, a su vez que en la Fig. 12 se exponen las dimensiones del cañón y la ubicación de los barrenos para colocar los sensores fotoeléctricos.

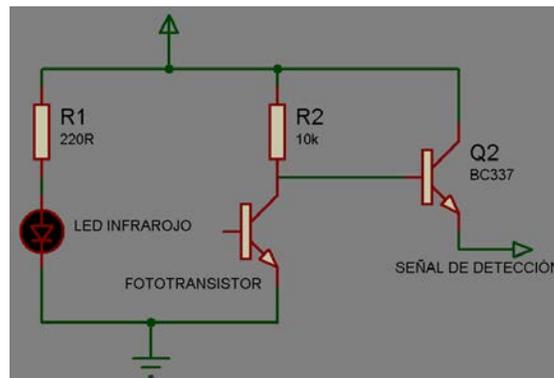


Fig. 11. Circuito para la detección del proyectil a través del cañón.

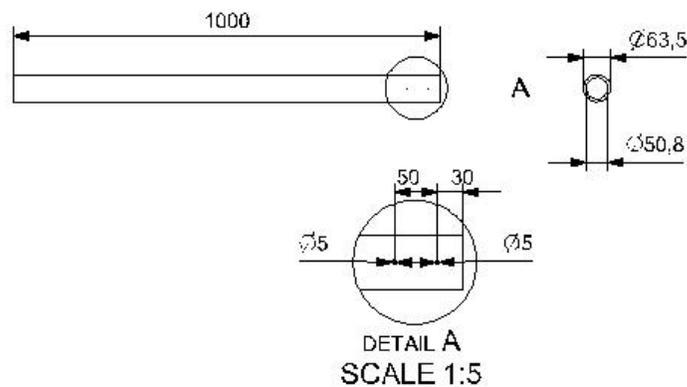


Fig. 12. Dibujo del diseño del cañón (medidas en milímetros).

Como parte del proceso de diseño del disparador se seleccionó un actuador que se encargue de hacer pasar el aire del compresor al cañón de modo que la válvula utilizada en este modelo es de la marca FESTO modelo CPE14-M1BH-5L-1/8 cuyo tiempo de activación es de 20 milisegundos y tiene un caudal de hasta 350 litros/minuto, por lo que esta válvula es ideal para esta aplicación ya que puede ser activada por medio de una señal eléctrica de 24 volts de corriente directa.

#### **2.4. Soporte de barras**

El soporte de las barras y del cañón del disparador es un tema de vital importancia cuando se considera realizar el diseño de un dispositivo de esta naturaleza, dado que la alineación es de vital importancia para la correcta propagación de la onda de impacto a través de la probeta. Análogamente, los componentes de soporte juegan un papel muy importante, ya que deben de permitir el libre desplazamiento de las barras al momento del impacto, además de evitar, lo más posible, la presencia de fricción entre la superficie del soporte y la barra.

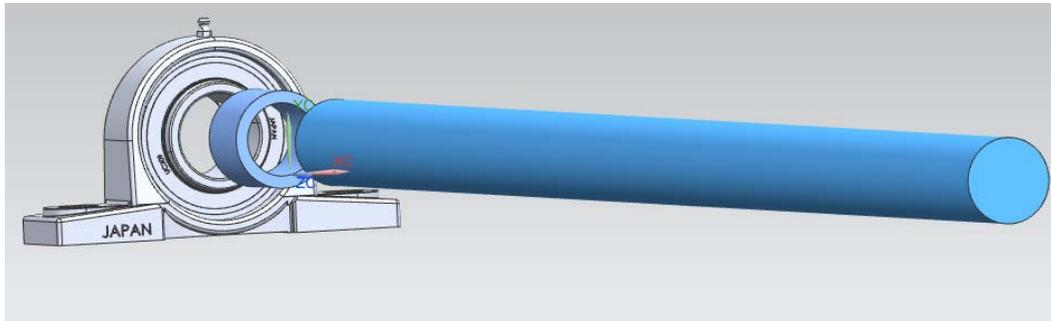
#### **Evaluación de alternativas para soportes**

Se contemplaron tres propuestas para soportar las barras:

- a) Cojinetes neumáticos: estos cojinetes ofrecen una alternativa muy eficaz para poder reducir la fricción, puesto que a lo largo del buje interior hay orificios por los cuales circula aire, de modo que la flecha que sostienen se suspende debido a la acción del aire.
- b) Rodamientos lineales: estos componentes sujetan la barra por medio de un arreglo lineal de balines que corren a lo largo del buje, dichos balines internamente están acomodados de modo que el único movimiento permitido es el movimiento lineal.

- c) Chumaceras autoalineables con bujes de nylamid: estas chumaceras compensan cualquier desalineación de la barra, y la inserción de un buje de nylamid reduce también la fricción en la interfaz barra-buje, sin embargo se tiene que asegurar la correcta manufactura del buje, de modo que se asegure una buena traslación lineal de la barra al momento del impacto.

Tanto los cojinetes neumáticos como los rodamientos lineales son una buena solución para soportar las barras y permitir la existencia de traslación longitudinal, sin embargo ambos componentes son muy caros por sí solos, además, es necesario comprar más accesorios para su instalación, por lo que para este proyecto se utilizarán chumaceras autoalineables y bujes, esta idea no es para nada descartable dado que ha habido trabajos en los cuales la presencia de los bujes no impide el desplazamiento lineal, y la fricción entre las superficies no afectó significativamente la señal de interés debido al material con que fueron fabricados [1] y [6]. En la Fig. 13 se expone el ensamble propuesto para soportar las barras incidente y transmisora.



**Fig. 13. Sistema de soporte de barras.**

## **2.5. Instrumentación y adquisición de datos**

Para lograr el objetivo propuesto, es necesario instrumentar las barras y enviar la señal resultante a través de algún dispositivo que pueda convertir dicho pulso en una gráfica donde se registre lo que se busca obtener, por lo que las barras se instrumentarán con

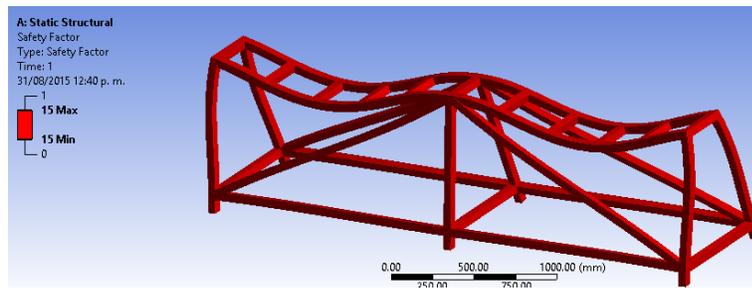
galgas extensiométricas y las señales que arrojen pasarán a través de un sistema de adquisición de datos para su posterior procesamiento y análisis.

Las galgas que se usarán son las Vishay EA-06-062AQ-350/P que son unas galgas de propósito general con una resistencia de  $350 \Omega$  (tolerancia de  $\pm 0.15\%$ ). Aún se está evaluando si conectar las galgas formando un puente completo (lo cual ofrece una mejor lectura de la señal) o si construir únicamente medio puente, dada la limitación de potencia de 150 miliwatts con la que cuenta el módulo de adquisición de datos [7].

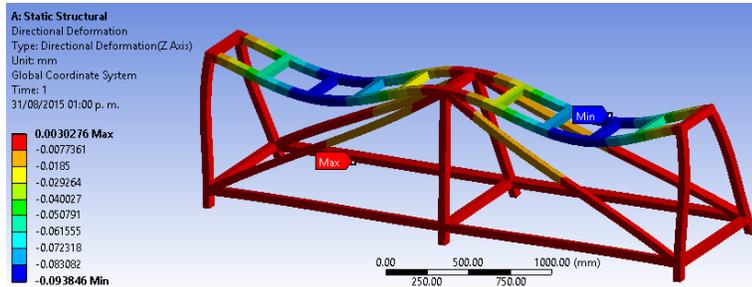
Por su parte el módulo a utilizar es el NI 9237 de National Instruments, el cual es una tarjeta con 4 canales digitales enfocada a leer señales provenientes de puentes de Wheatstone. La alta velocidad de muestreo y ancho de banda del NI 9237 ofrecen un sistema de medida de tensión de alta calidad a alta velocidad sin desfase entre canales. Así mismo, en caso de elegir construir medio puente o un cuarto de puente, este módulo es capaz de completar dichas configuraciones internamente, según sea el caso de la construcción elegida. Los datos registrados por este módulo se procesarán posteriormente utilizando LabVIEW, donde se obtendrá la curva de esfuerzo-deformación de las probetas ensayadas.

### **3. Resultados**

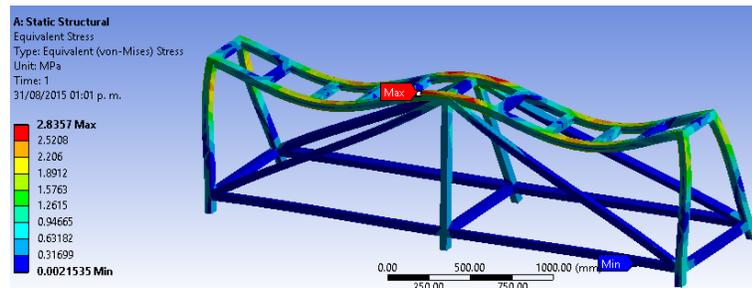
Para poder validar el diseño de la base, se realizó un análisis de elemento finito utilizando ANSYS, donde se simuló únicamente la carga del perfil sobre la superficie superior de la mesa y se utilizó un soporte fijo en la cara inferior de las patas de la mesa. El objetivo de este análisis era el comprobar que la estructura fuera capaz de soportar el peso de los componentes y sobre todo del perfil de aluminio, la Fig. 14 expone los resultados obtenidos.



a)



b)



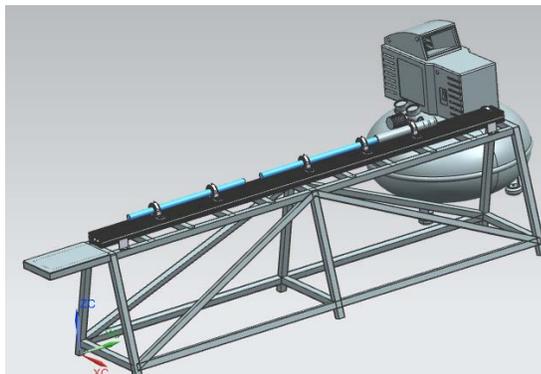
c)

**Fig. 14. a) Factor de seguridad de análisis estático, b) deformación direccional a lo largo del eje z (donde se apoyan los componentes), c) esfuerzos presentes en la base.**

Al ver que se obtuvo un valor de 15 como factor de seguridad, se puede concluir que es un diseño seguro y es factible construirla con el material propuesto. Una vez que se han seleccionado los materiales, componentes y que se han realizado la propuesta de diseño de las diferentes estaciones de la barra de Hopkinson, se realizó un modelo de

ensamble para tener una idea de cómo realizar la construcción del aparato, dicho ensamble se observa en la Fig. 15.

En este esquema se aprecia un modelo similar al compresor que se utilizará para la construcción del dispositivo, el cual posee una presión máxima de hasta 175 psi, sin embargo de acuerdo a la gráfica de la Fig. 10, es posible alcanzar una tasa de deformación de  $1000 \text{ s}^{-1}$  aplicando aproximadamente 1 galón de aire a 50 psi de presión.



**Fig. 15. Ensamble completo del sistema de barra de Hopkinson.**

Algunos componentes ya se tienen físicamente como la mesa y el perfil, el cual ya fue atornillado en la superficie de la mesa utilizando las tuercas especiales que se insertan en los rieles del perfil como se ilustra en la Fig. 16. Así mismo ya se tienen los componentes para el soporte de las barras y las barras, que se observan en la Fig. 17, el buje que va insertado en la chumacera, fue fabricado de nylamid azul dado que este posee un coeficiente de fricción bajo, requerimiento importante cuando se realice el movimiento traslacional de la barra.

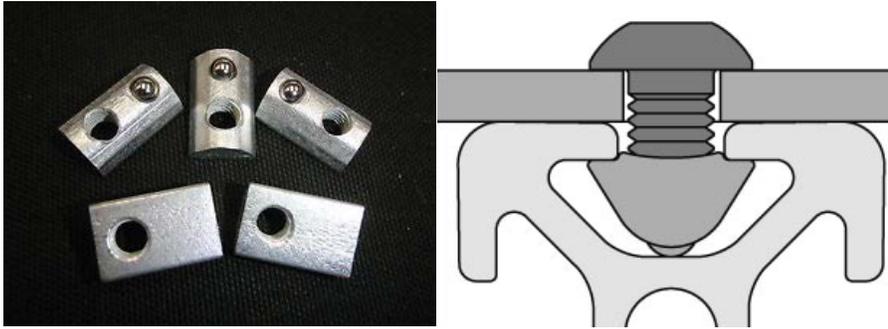


Fig. 16. Tuercas T para el perfil IPS y forma de instalación.



Fig. 17. Barras y elementos para el soporte de las mismas.

#### 4. Conclusiones

Es importante tomar muchas consideraciones cuando se parte desde cero en el diseño de una máquina para ensayar materiales, puesto que deben de cumplirse una serie de requerimientos muy específicos para que posteriormente los resultados obtenidos sean válidos y capaces de aportar al usuario la información necesaria para determinar si el material ensayado es el indicado para la aplicación que se requiera. En función de esto, los requerimientos del diseño propuesto se han cumplido para las partes que involucran la construcción del dispositivo (desde la base, el disparador, el sistema de soportes y la selección y diseño de las barras de impacto), sin embargo el apartado de alcanzar la

tasa de deformación deseada (y por consiguiente la curva esfuerzo-deformación) se comprobará experimentalmente, hasta que el dispositivo sea construido en su totalidad, ya que es importante ensayar el material para poder determinar si los cálculos realizados fueron correctos y brindan la certeza de que el diseño propuesto es capaz de lograr una tasa de deformación que entre en la categoría de un ensayo dinámico.

De acuerdo a lo revisado en la bibliografía hay dos cosas que impactan directamente, y en mayor magnitud, en el diseño de una barra de Hopkinson, y esto es la alineación y los soportes; si se considera que hay infinidad de teoría que habla acerca de la propagación de una onda unidimensional a través de un medio continuo, es de vital importancia que la alineación entre el disparador, las barras y la probeta sea precisa, ya que a partir de los datos registrados por los sensores, se puede obtener la información deseada, de no ser así no se tendrá la certeza de lo que se va a leer. De manera similar, los soportes de las barras son un factor determinante, ya que depende de estos no inyectar ruido a la onda de interés, puesto que cualquier carga o pandeo de la barra por una mala instalación hace que el eje de transmisión de la onda se deforme, introduciendo una componente de esfuerzo adicional, la cual será difícil de filtrar para poder obtener la señal deseada.

## **5. Referencias**

- [1] I. A. Irausquín Castro, “Caracterización mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía”, Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Febrero de 2012.
- [2] H. Zhao, G. Gary, J. R. Klepaczko, “On the use of a viscoelastic split Hopkinson pressure bar”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 19, No. 4, Abril 1997, pp. 319-330.
- [3] *Mechanical testing and evaluation*. ASM. Estados Unidos. Octubre 2000.

- [4] J.F. Barrera, “Diseño conceptual de una barra de Hopkinson para generar choques de alta aceleración”, Tesis de maestría en ciencias de la ingeniería mecánica, Instituto Tecnológico de Celaya/Centro Nacional de Metrología, Febrero 2014.
- [5] S. Lang, “Design of a split Hopkinson Bar apparatus for use with fiber reinforced composite materials”, Tesis de maestría en ciencias de la ingeniería mecánica, Utah State University, Julio 2012.
- [6] M. Montalvo, “Implementación de barra de Hopkinson para prueba de materiales a altas velocidades de deformación”, Tesis de maestría en ciencias de la ingeniería mecánica, Centro de ingeniería y desarrollo industrial, Julio 2003.
- [7] Operating instructions and specifications NI 9237, National Instruments, Estados Unidos, Junio 2009.