

## **OBTENCIÓN DE CURVAS $\epsilon$ -T DE ALUMINIO PLEGADO MEDIANTE UN SISTEMA BARRA DE HOPKINSON**

### *OBTAINING CURVES $\epsilon$ -T OF FOLDED ALUMINUM BY MEANS OF A HOPKINSON BAR SYSTEM*

**Alcaraz Caracheo Luis Alejandro**

Tecnológico Nacional de México en Celaya  
*alejandro.alcaraz@itcelaya.edu.mx*

**Orozco Mendoza Horacio**

Tecnológico Nacional de México en Celaya  
*horacio.orozco@itcelaya.edu.mx*

**Arriaga González Efrén**

Tecnológico Nacional de México en Celaya  
*Ing.efren.arriaga.glez@gmail.com*

### **Resumen**

Un Sistema Barra de Hopkinson fue utilizado para medir altas tasas de deformación a compresión de aluminio plegado. Para ello se seleccionó un material adecuado para las barras del Sistema de Hopkinson que fuera cercano a la impedancia del material a estudiar. Se realizó la instrumentación de la barra mediante galgas extensométricas con un arreglo de puente completo de Wheatstone y un adquisidor de datos. Las gráficas obtenidas de deformación ( $\epsilon$ ) en función del tiempo (t) muestran un comportamiento típico de materiales de baja impedancia, tal como es reportado en la literatura. La configuración lograda para el Sistema Barra de Hopkinson permitirá obtener la respuesta dinámica de deformación de materiales suaves o de baja impedancia, así como caracterizar las propiedades mecánicas de los mismos.

**Palabra(s) Clave:** Aluminio plegado, Barra de Hopkinson, Materiales suaves.

### **Abstract**

*A Hopkinson Bar System was used to measure high rates of compression deformation of folded aluminum. For this, a suitable material was selected for the*

*bars of the Hopkinson System that was close to the impedance of the material to be studied. The instrumentation of the bar was performed by strain gauges with a complete Wheatstone bridge arrangement and a data acquisition. The graphs obtained from deformation ( $\epsilon$ ) as a function of time ( $t$ ) show a typical behavior of low impedance materials, as reported in the literature. The configuration achieved for the Hopkinson Bar System will allow to obtain the dynamic deformation response of soft or low impedance materials, as well as to characterize the mechanical properties of them.*

**Keywords:** *Folded aluminum, Hopkinson Bar, Soft materials.*

## **1. Introducción**

Debido al desarrollo tecnológico que se ha logrado en los últimos años, es necesario investigar nuevos materiales que cumplan con los requisitos que obligan los nuevos avances, como lo son la necesidad de materiales cada vez más ligeros y con buena respuesta mecánica, sin dejar de lado la necesidad del bajo costo de estos materiales. Por este motivo se tiene un interés en el estudio de los materiales celulares y en particular en el aluminio plegado, ya que hay estudios que muestran su factibilidad para ser empleados como elementos estructurales (Bouaziz, 2013; Cottrino, 2014; Balankin, 2015).

Los materiales plegados que recientemente se han propuesto como una clasificación de los materiales celulares (Balankin, 2015), han causado gran interés debido a sus características y sus aplicaciones tecnológicas. Bouaziz (2013) publicó la primera investigación empleando probetas cilíndricas de aluminio plegado, donde los resultados muestran que este material puede tener aplicaciones para usos estructurales debido a su buena combinación de propiedades mecánicas entre espumas y materiales fibrosos, así como la ventaja de un proceso de fabricación de bajo costo. Posteriormente, Cottrino (2014) varió diferentes parámetros físicos para su estudio en aluminio plegado, como la densidad relativa, la velocidad de deformación, el proceso de plegado de las hojas. Concluyendo que las propiedades mecánicas de este material, como la rigidez y el esfuerzo, pueden ser fácilmente modificadas variando los parámetros

en el proceso de compactación. Gran parte de los estudios en estos materiales se enfocan en ensayos bajo condiciones estáticas. Por lo que existe la necesidad de entender el comportamiento de estos materiales, no solo en condiciones estáticas, si no en condiciones dinámicas, es decir a altas tasas de deformación, debido a que pueden ofrecer una alternativa de diseño en aplicaciones de absorción de energía.

El aluminio plegado es una presentación del aluminio donde una hoja se dobla y comprime de forma aleatoria hasta que adquiere la densidad relativa deseada. Las propiedades mecánicas de este material, debido a que se fabrica a partir de una hoja, dependen de la configuración aleatoria de los pliegues y de su densidad relativa (Arriaga, 2015). Para conocer el comportamiento dinámico del aluminio plegado, se usará un sistema de barra de Hopkinson y así determinar su respuesta mecánica ante deformaciones a alta velocidad.

## 2. Métodos

La Barra de Hopkinson es un sistema para determinar el comportamiento dinámico de distintos materiales. Este sistema permite obtener valores de deformación a altas tasas, superiores a  $200s^{-1}$  (Montalvo, 2008). El Sistema Barra de Hopkinson junto con sus principales elementos se puede observar en la figura 1, el cual consta de dos barras cilíndricas colocadas longitudinalmente, la primera barra se denomina barra incidente y la segunda barra transmisora, entre ellas se colocan el espécimen o probeta del material a ensayar. También cuenta con un proyectil cilíndrico del mismo diámetro de las barras el cual es impulsado para impactar la barra incidente, provocando la deformación plástica de las barras y la probeta.

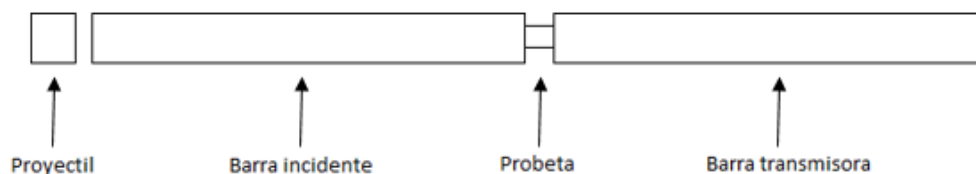


Figura 1 Elementos principales del Sistema Barra de Hopkinson.

Cuando se produce el impacto se propagan ondas mecánicas en las barras como en la probeta, este impulso atraviesa la primera barra. Una parte de él se refleja en el extremo de esta, y otra parte atraviesa la muestra del material hasta alcanzar la barra de transmisión, estas ondas denominadas incidente, reflejada y transmitida, son fundamentales para el principio de funcionamiento del sistema, debido a que valores como el esfuerzo y la deformación se pueden obtener sin la necesidad de medirlos directamente en el material a ensayar. En la figura 2 se presenta la descomposición de una onda típica utilizando el Sistema Barra de Hopkinson, la primera onda corresponde a la onda incidente, seguidos por el onda transmitido y reflejado.

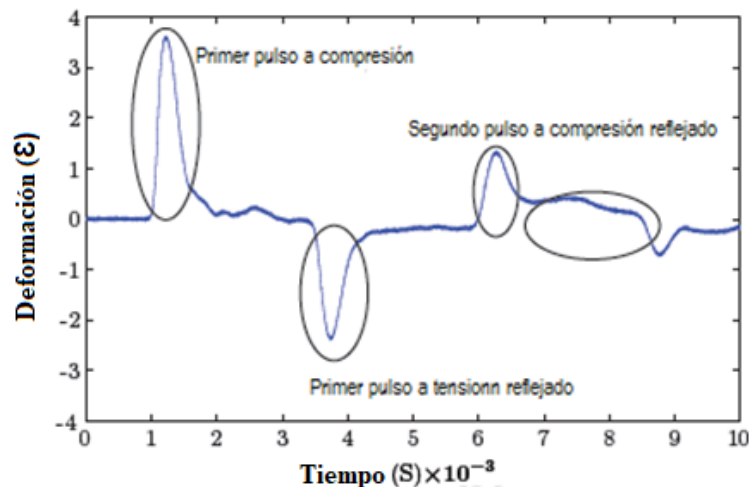


Figura 2 Descomposición de las ondas. (R. Curry,2011)

La impedancia acústica es la resistencia que opone un medio a las ondas que se propagan sobre este, es decir una forma de disipación de energía de las ondas que se desplazan en un medio. Esta debe ser similar entre las barras y la probeta es un elemento determinante para la validez de los ensayos usando el Sistema Barra de Hopkinson. Si la impedancia de la probeta es muy inferior al de las barras la onda reflejada se parecerá a la onda incidente, por lo tanto, la onda transmitida será muy pequeña siendo difícil su apreciación.

El material a ensayar en esta investigación es aluminio plegado, el cual, es un material que recientemente se ha postulado como una alternativa a las espumas

de aluminio, debido a que su respuesta mecánica presenta una combinación entre las espumas y los materiales fibrosos, además de ofrecer la ventaja de su fácil fabricación (Bouaziz, 2013; Cottrino, 2014). Para su fabricación se siguió la metodología propuesta por (Arriaga, 2018). Se corrugó papel de aluminio aleatoriamente y se introdujo en un molde cilíndrico para formar probetas de 32 milímetros de diámetro y 30 milímetros de altura, para mayor referencia de este proceso se puede consultar a Arriaga (2018). La impedancia del aluminio plegado de acuerdo con Cronin (2006) es  $0.1073 \text{ Kg}/\mu\text{s} * \text{m}^2$ , Por lo que uno de los propósitos de este trabajo es seleccionar un material para las Barras de Hopkinson con una impedancia similar o cercana.

Generalmente, el Sistema Barra de Hopkinson utiliza barras metálicas para ensayar materiales con una impedancia alrededor de  $40 \text{Kg}/\mu\text{s} * \text{m}^2$ , como es el acero (Cronin, 2006). Estas barras metálicas dificultan los ensayos cuando el objetivo es caracterizar materiales de baja impedancia. Por lo que se seleccionó un material para las barras con impedancia muy cercana al aluminio plegado. La tabla 1 muestra una lista de algunos materiales de acuerdo con su impedancia acústica. Donde se observa que los materiales con la impedancia más baja y factibles para fabricar las barras son el PMMA (polimetilmetacrilato) y el Nylon. En primera instancia se fabricaron barras de PMMA, sin embargo, por su proceso de fabricación que extrusión presenta cierta curvatura, lo cual, al realizar los ensayos en el Sistema de Hopkinson, se presentaron dificultades como una elevada fricción con los soportes y continuas fracturas de las barras.

Tabla 1 Comparación de impedancia acústica de diferentes materiales (Pastrana,2016).

Material	Impedancia acústica
Acero	40.28
Aluminio	13.64
Magnesio	8.84
Nylon	2.18
PMMA	2.02
Músculo	1.66
Grasa	2.34

Por lo que posteriormente se tomó la decisión de emplear barras de Nylon, como lo muestra la figura 3. Las barras tienen un diámetro de 3.81 cm, la barra incidente tiene una longitud de 180 cm y la barra transmisora de 100 cm.



Figura 3 Sistema Barra de Hopkinson con barras de Nylon.

Para medir las deformaciones en las barras se instrumentaron con galgas extensiométricas del tipo EA – 06 – 062AQ - 350/W con un factor de galga de 2.13 de la marca Vishay®. Estas galgas fueron pegadas de acuerdo con la metodología recomendada por la distribuidora Vishay®, siguiendo el diagrama de puente completo, con la diferencia de colocar R1 y R3 en dirección longitudinal midiendo así la deformación de la barra mientras que R2 y R4 fueron colocadas diametralmente opuestas para compensar el error de pandeo y equilibrar la resistencia del puente. Una vez colocada las galgas se pasó calibraron por medio del P3 el cual es un dispositivo que permite medir las micro deformaciones de las galgas de acuerdo con el puente de Wheatstone.

Para adquirir las deformaciones de las galgas se utilizó un sistema de adquisición de datos NI 9237, el cual es un módulo de entradas y salidas digitales de National Instrument, dado que la tarjeta NI9237 específicamente se utiliza para su uso con galgas, las unidades de la señal procesada en un software de adquisición de datos, corresponden a unidades de deformación, de manera que también es posible prescindir de las ecuaciones que establecen una relación entre la deformación y los valores de los elementos resistivos, del voltaje de alimentación del circuito y del voltaje de salida que forma parte de la respuesta del medio puente (Pastrana, 2016). Para visualizar la salida de la tarjeta se utilizó el programa LabVIEW, en la figura 4 se muestra el VI responsable de registrar las señales durante el ensayo.

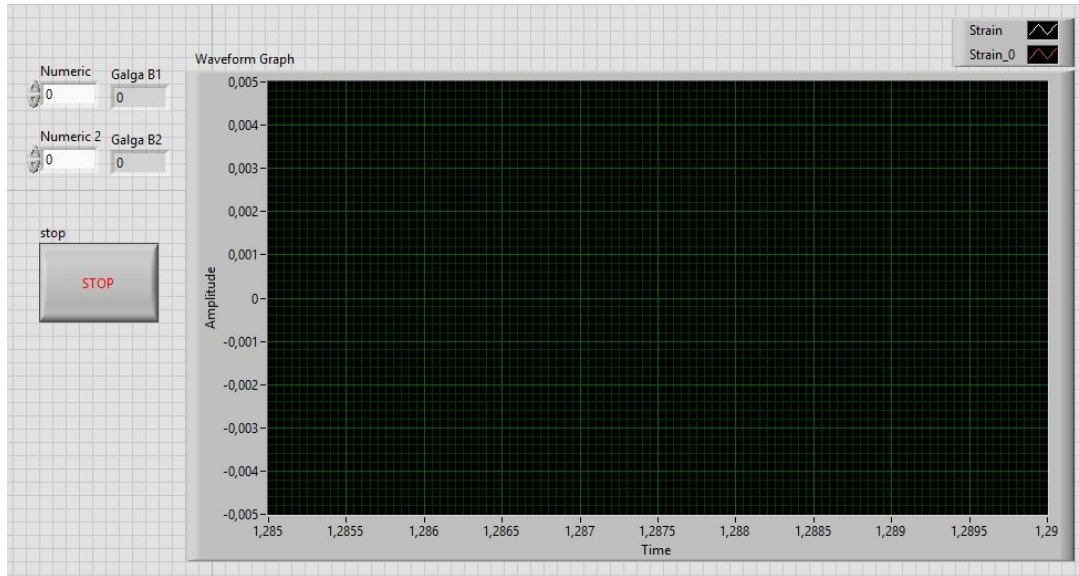


Figura 4 VI para el registro de las señales de una prueba del Sistema Barra de Hopkinson.

Con el fin de poder obtener curvas suaves se utilizó una frecuencia de muestreo de 50 kHz y 100000 muestras, de modo que la ejecución del programa sólo durará 2 segundos, tiempo en el cual se tiene que realizar el disparo, dejando que la tarjeta de adquisición capture la información proporcionada por las galgas.

### 3. Resultados

Se realizaron por lo menos 5 disparos en las probetas de aluminio plegado, en la figura 5 se puede apreciar una probeta antes del ensayo y posterior al mismo.



Figura 5 Probetas de aluminio plegado previo y posterior a los ensayos.

Una de las gráficas que se obtuvieron se muestra en la figura 6. La primera onda se refiere a la primera onda a tensión, la cual corresponde a la onda incidente, mientras que la primera onda a compresión se refiere a la onda reflejada.



Figura 6 Respuesta de la barra incidente.

Logrado este primer objetivo, se prosiguió a sacar la onda transmitida, como se vio anteriormente solo se necesita la primera onda generado en la barra transmisora. Al realizar diferentes disparos se obtuvo la gráfica que se muestra en la figura 7 donde se observa que es la gráfica que se esperaba obtener. La onda señalada en color rojo es la única onda que se requiere para el análisis.

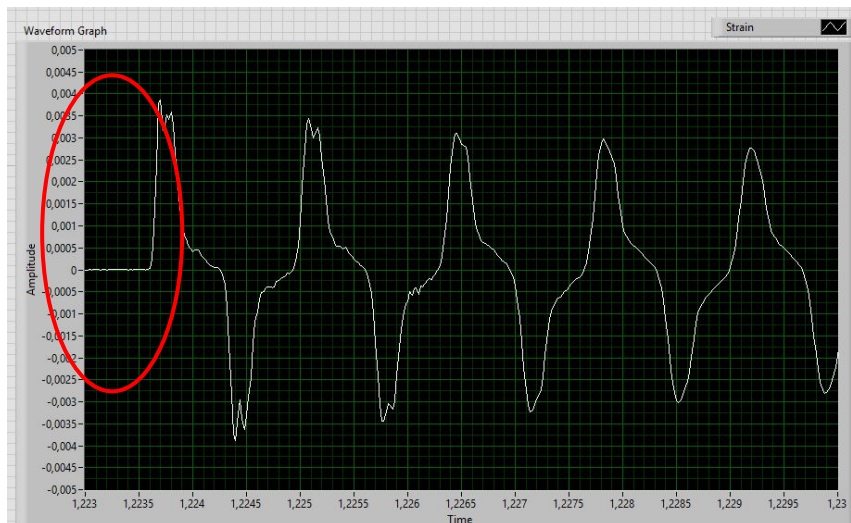


Figura 7 Respuesta de la barra transmisora.



Una vez logrado obtener ambas ondas, se realizan pruebas conectando ambas barras, la gráfica de esta prueba demuestra que el Sistema Barra de Hopkinson funciona correctamente, permitiendo observar las tres ondas principales (incidente, transmitido y reflejado) que se requieren para los ensayos usando este equipo de barras.

En la figura 8 se pueden observar las tres ondas que se han explicado a lo largo del trabajo. Como se observa, y siguiendo la teoría explicada, la primera onda que se obtiene es la onda incidente proveniente de la barra incidente, seguidos por la descomposición de este en la onda reflejada y la onda transmitido.

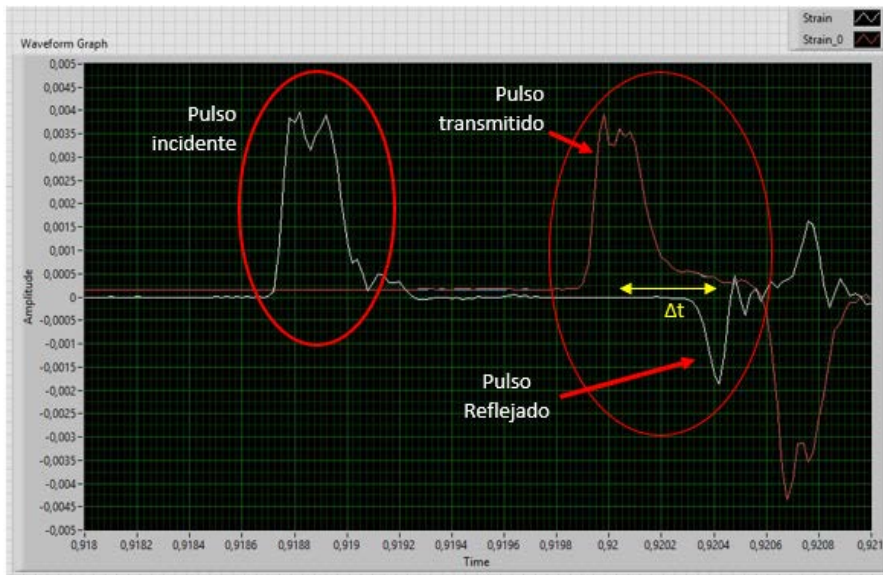


Figura 8 Respuesta de las ondas del Sistema Barra de Hopkinson.

Se observó que la gráfica muestra un comportamiento adecuado según la literatura sobre respuestas de las gráficas usando barras de material viscoelástico en un Sistema Barra de Hopkinson, la comparación de la gráfica con los ensayos según (R. Curry, 2011) se muestra en la figura 2.

#### 4. Discusión

Conforme a lo visto en los puntos anteriores podemos concluir que para poder trabajar el aluminio plegado, el cual es un material de baja impedancia, dentro del

Sistema Barra de Hopkinson, debemos de tomar en cuenta que las impedancias tanto del aluminio plegado como de las barras deben de ser muy similares, en este caso en particular se optó por dos materiales, siendo el de mejor características el Nylon, con este material nos permitirá poder ver con claridad las ondas transmitida, incidente y reflejada, dentro de nuestro sistema de adquisición de datos y al compararlos con la literatura, podemos corroborar que nuestro Sistema Barra de Hopkinson está a punto para poder realizar ensayos dinámicos y poder caracterizar las propiedades mecánicas de nuestro material.

## **5. Bibliografía y Referencias**

- [1] Arriaga R. (2015). Efecto de la densidad relativa en las propiedades mecánicas de materiales plegados; Tesis de licenciatura; Instituto Tecnológico de Celaya.
- [2] Bouaziz, O.; Masse, J. P.; Allain, S.; Orgeas, L.; Latil, P. (2013). Compression of crumpled aluminum thin foils and comparison with other cellular materials; *Materials Science & Engineering A* 570; pp.1-7.
- [3] Cottrino, S., P. Viviés, D. Fabrègue, and E. Maire (2014). Mechanical properties of crumpled aluminum foils.; *Acta Materialia* 81; 98-110.
- [4] Balankin, A. (2015). Mechanical properties and relaxation behavior of crumpled aluminum foils, *Journal of Materials Science*, N° 50, 13 pág. 4749-4761.
- [5] Montalvo M. (2008). Implementación de barra de Hopkinson para prueba de materiales a altas velocidades de deformación; Tesis de maestría; Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial.
- [6] Curry R. (2011). Implementation of viscoelastic Hopkinson bars; Tesis de maestría; University of Cape Town.
- [7] Arriaga R. E., Cisneros, C. B., & Caracheo, L. A. (2018). Análisis del comportamiento mecánico de materiales plegados a compresión. *Pistas Educativas*, 38(118).
- [8] Cronin, C. P. Salisbury, C. R. Horst (2006). High rate characterization of low impedance materials using a polymeric split Hopkinson pressure bar. In

Proceedings of the 2006 Society for Experimental Mechanics (SEM) Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics (pp. 314-322).

- [9] Pastrana García L. G. (2016). Diseño y construcción de una barra de Hopkinson para caracterización de materiales celulares; Tesis de maestría; Instituto Tecnológico de Celaya.