

CARACTERIZACIÓN DE ALUMINIO PLEXO PEGADO CON DENSIDAD RELATIVA DE 0.09

CHARACTERISATION OF CRUMPLED ALUMINIUM FOILS WITH RELATIVE DENSITY OF 0.09

María del Carmen Tinajero Campos

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
m1903034@itcelaya.edu.mx

Álvaro Sánchez Rodríguez

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
alvaro.sanchez@itcelaya.edu.mx

Luis Alejandro Alcaraz Caracheo

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
alejandro.alcaraz@itcelaya.edu.mx

Horacio Orozco Mendoza

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
horacio.orozco@itcelaya.edu.mx

Ignacio Alejandro Irausquin Castro

Florida International University, USA
iirausqu@fiu.edu

Recepción: 28/septiembre/2021

Aceptación: 30/noviembre/2021

Resumen

El objetivo es obtener propiedades mecánicas específicamente modulo elástico y resistencia a la fluencia de aluminio plexo pegado con densidad relativa de 0.09, en una barra Kolsky polimérica y compararlos con un ensayo cuasi estático.

En el presente trabajo, se realizó experimentación al vacío y con probetas de aluminio plexo pegado con una densidad relativa de 0.09. El módulo elástico y resistencia a la fluencia para ensayos dinámicos a diferentes velocidades resultaron mayores a los valores reportados en ensayos cuasi estáticos.

Palabras Claves: barra Kolsky polimérica, material de baja impedancia, módulo elástico, resistencia a la fluencia.

Abstract

The objective is to obtain mechanical properties specifically elastic modulus and yield strength of crumpled aluminium foils with relative density of 0.09, on a polymer Kolsky bar and compare them with a quasi-static test.

In this study, vacuum experiments were carried out with crumpled aluminium foils test specimen with a relative density of 0.09. The elastic modulus and yield strength for dynamic tests at different speeds were higher than the values reported in quasi-static tests.

Keywords: *elastic modulus, polymeric Kolsky bar, soft materials, yield strength.*

1. Introducción

En la actualidad el uso de materiales celulares está en su auge, y el análisis de aluminio plexo pegado a altas tasas de deformación está en sus inicios, es por lo que el estudio de estos materiales es de gran relevancia.

En el Instituto Tecnológico de México en Celaya, se está estudiando materiales plegados a bajas velocidades (ensayos cuasi estáticos), pero el estudio de estos materiales a altas tasas de deformación ha avanzado poco por el momento, hasta este artículo.

Los ensayos con barra Kolsky proporcionan datos sobre la deformación de muestras ensayadas a altas tasas de deformación, figura 1, por medio de micro deformaciones en las barras (barra incidente/entrada y barra transmisora/salida), las micro deformaciones obtenidas respecto al tiempo proporcionan perfiles de pulso incidente y reflejado en la barra incidente y pulso transmitido en la barra transmisora [5,7], estos pulsos sirven para obtener propiedades mecánicas del material ensayado.

Una barra Hopkinson de presión dividida (SHPB) viscoelástica (polimérica) ha sido usada como un medio para determinar características dinámicas de materiales de baja impedancia o materiales suaves [4].

El uso de materiales poliméricos ha estado incrementando en varias industrias como la automotriz, deportiva, y electrónica debido a la resistencia al impacto y capacidad de absorción de energía.

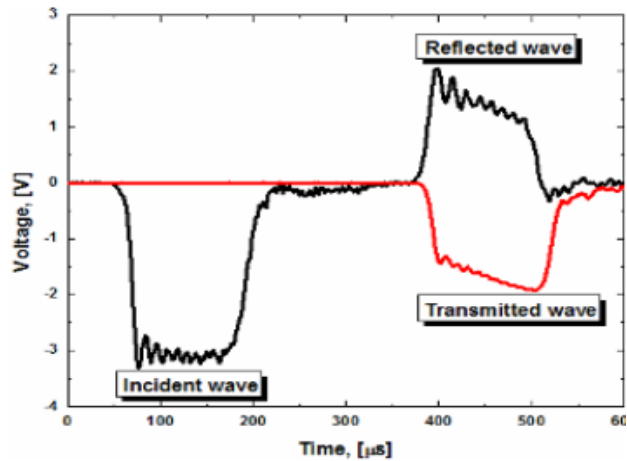


Figura 1 Señal de un perfil de deformación para 1 Barra Kolsky convencional.

La barra Hopkinson o Kolsky, originalmente desarrollada por Kolsky [2] es uno de los experimentos más usados para medir las propiedades mecánicas a altas tasa de deformación. Las barras convencionales metálicas tienen dificultades para caracterizar materiales de baja impedancia, debido al gran desajuste de impedancias entre el espécimen y las barras incidente y transmisora [5].

Si la impedancia mecánica de la probeta resulta ser muy inferior a la de las barras, la onda reflejada se parecerá mucho a la onda incidente y, por lo tanto, la onda transmitida será muy pequeña y probablemente difícil de detectar, figura 2. Esto es lo que suele pasar en sólidos celulares, por lo que ensayar las espumas metálicas en ensayos convencionales resulta complicado [1].

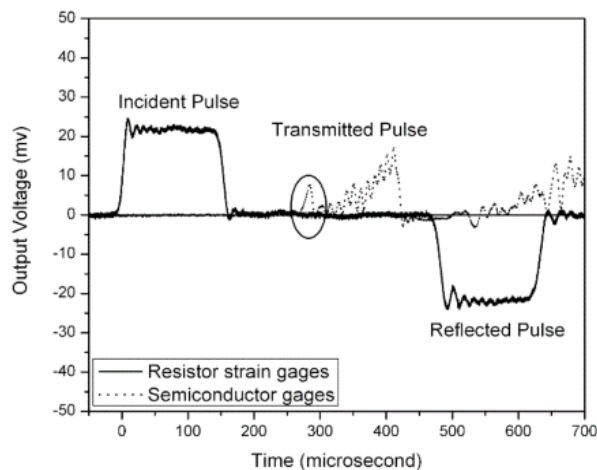


Figura 2 Pulso característico en materiales suaves.

Recientemente investigadores han estado interesados en evaluar materiales de baja impedancia como polímeros, espumas poliméricas, cauchos y tejidos biológicos, para este propósito se han reemplazado la barra incidente y la barra transmisora, que convencionalmente están hechas de metal, por barras viscoelásticas. Esto reduce el desempate de impedancias entre barras y muestras [5].

Al utilizar barras viscoelásticas debemos de tener en cuenta la atenuación y dispersión de las ondas de deformación que se propagan en las barras poliméricas. Para determinar las propiedades mecánicas de manera precisa es corregir las formas de onda que viajan a lo largo de las barras. Wang y compañía (1994) desarrollo una técnica que incorpora los efectos viscoelásticos en una ecuación de onda unidimensional, junto con un modelo de tres elementos (modelo de solido lineal estándar) [6].

Un ejemplo de material de baja impedancia son los materiales celulares como la espuma de aluminio o el aluminio plexo-pegado, el cual fue ensayado en este trabajo con una densidad relativa de 0.09.

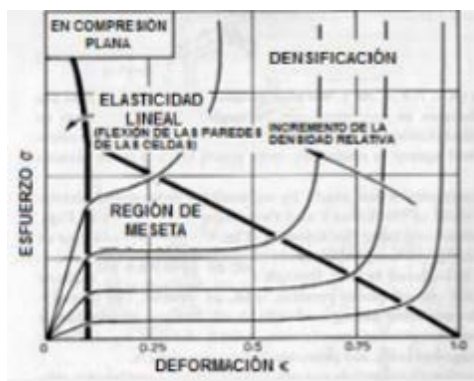
Los materiales plegados son aquellos que se forman por una red de pliegues y pueden encontrarse desde un nivel microscópico como membrana de grafeno, oxido de grafeno o proteínas, hasta una escala macroscópica como una hoja de papel arrugado [3].

El aluminio plegado es un material que se forma a partir de una hoja de aluminio, formando dobleces aleatorios y comprimiendo mediante fuerzas externas hasta llegar a una estructura compuesta de aluminio y aire. El aluminio plegado exhibe una clara plasticidad y una baja histéresis como las espumas ver figura 3, pero no una región de meseta posterior a la resistencia a la fluencia, en lugar de esto ocurre un endurecimiento por deformación después de este punto, como puede apreciarse [3].

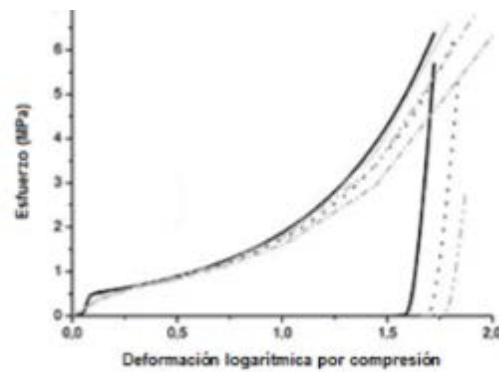
2. Métodos

El dispositivo Kolsky consta de dos barras coaxiales (barra incidente y barra transmisora) de un material linealmente elástico, se coloca una probeta cilíndrica

del material que se presente ensayar, un proyectil cilíndrico del mismo material y diámetro que las barras, impacta el extremo de la barra incidente, el impacto produce un pulso longitudinal de compresión que viaja a través de la barra incidente hasta la probeta, cuando el pulso de compresión llega a este punto de contacto entre la probeta y la barra incidente, la onda de compresión se divide, una parte de la onda de compresión regresa a través de la barra incidente y otra continua a través de la barra transmisora. Mediante galgas extensiométricas montadas en la barra incidente y transmisora se registra la onda de compresión.



a) Comportamiento de materiales celulares



b) Comportamiento de aluminio plegado

Figura 3 Comparación entre espumas (materiales celulares) y material plegado.

La onda de compresión que viaja de ida a través de la barra incidente se llama pulso incidente ε_i , la onda de compresión que regresa a través de la barra incidente se llama pulso reflejado ε_r , y la onda de compresión que se propaga a través de la barra transmisora, se llama pulso transmitido ε_t .

La teoría aplicada a la interpretación de las ondas registradas en el instrumento barra Kolsky, es la teoría elemental de ondas unidimensionales propagadas a través de una barra cilíndrica. Según esta teoría la onda de compresión se propaga por la barra sin sufrir distorsión.

Para obtener el módulo elástico y resistencia a la fluencia graficaremos una curva esfuerzo-deformación del material ensayado, para realizar la curva se utilizan fórmulas matemáticas. La deformación ingenieril o nominal ε_N , la velocidad de deformación nominal $\dot{\varepsilon}_N$ y la tensión ingenieril o nominal σ_N , pueden obtenerse a partir de las ondas reflejada y transmitida mediante las ecuaciones 1 a la 4 [2].

$$\varepsilon_N = \frac{2C}{L_0} \int_0^t \varepsilon_r dt \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_N = \frac{2C}{L_0} \varepsilon_r \quad (2)$$

$$\sigma_N = E \frac{A_b}{A_0} \varepsilon_t \quad (3)$$

$$\sigma_N = E \frac{A_b}{A_0} (\varepsilon_i + \varepsilon_r) \quad (4)$$

La deformación ingenieril o nominal ε_N , la velocidad de deformación nominal $\dot{\varepsilon}_N$ y la tensión ingenieril o nominal σ_N , pueden obtenerse a partir de las ondas reflejada y transmitida mediante las siguientes expresiones [2]. Donde E y ρ son el módulo de Young y la densidad del material de la barra respectivamente, L_0 y A_0 son la longitud y área de la probeta sin ensayar respectivamente y A_b es el área de la sección de la barra.

Hay que considerar que el módulo de Young cambia en ensayos dinámicos, diversos autores señalan que para los materiales viscoelásticos la propiedad elástica es dependiente a la frecuencia y, por ende, de la velocidad de deformación. El módulo de Young tendrá que ser calculado con la ecuación 5 [1].

$$E = C^2 \cdot \rho \quad (5)$$

Se alimentaron las fórmulas 1, 2 y 3 con los datos obtenidos de la adquisición por LabVIEW y constantes, en una hoja de Excel (Tabla 1), con los datos en azul, se graficarán graficas esfuerzo-deformación de los materiales ensayados.

3. Resultados

En el presente trabajo se mostrará un ensayo cuasi estático y tres ensayos dinámicos a diferentes velocidades, el ensayo cuasi estático se realizó en una maquina universal [3] y los ensayos dinámicos en una barra Kolsky polimérica de Nylon, para modificar el parámetro de la velocidad de cada ensayo, se modificó la presión con la que se dispara el proyectil que impacta en la barra incidente.

Tabla 1 Análisis de datos.

	ϵ_1	ϵ_r	ϵ_t	$\int \epsilon_r$	$\int \epsilon_r$	σ (MPa)	e	de/dt
<i>0.0012</i>	0	0	0			0	0	0
0.00122	-2.82E-05	3.81E-05	-5.61E-06	3.81E-10	3.81E-10	3.31E-02	4.86E-05	4.85719298
0.00124	-5.38E-04	5.21E-05	-6.39E-06	1.28E-09	1.283E-09	3.78E-02	1.64E-04	6.6419883
0.00126	-2.75E-03	1.12E-04	-1.43E-05	2.92E-09	2.92348E-09	0.084417866	3.73E-04	14.2717333
0.00128	-6.03E-03	2.68E-04	-4.21E-05	6.72E-09	6.71955E-09	0.248979675	8.57E-04	34.1226094
0.0013	-6.89E-03	6.35E-04	-8.76E-05	1.58E-08	1.57504E-08	0.517861863	0.00200795	81.0076526
0.00132	-6.73E-03	1.36E-03	-1.22E-04	3.57E-08	3.57324E-08	0.722407339	0.00455536	173.733251
0.00134	-6.95E-03	2.49E-03	-1.20E-04	7.43E-08	7.42762E-08	0.710907455	0.00946913	317.643848
0.00136	-5.63E-03	3.92E-03	-1.18E-04	1.38E-07	1.38424E-07	0.695099546	0.01764705	500.148094
0.00138	-6.02E-03	5.33E-03	-1.26E-04	2.31E-07	2.30992E-07	0.746630374	0.02944815	679.962398
0.0014	-6.42E-03	6.29E-03	-1.27E-04	3.47E-07	3.47256E-07	0.749673766	0.04427012	802.234901
0.00142	-6.91E-03	6.56E-03	-1.28E-04	4.76E-07	4.75833E-07	0.75716701	0.06066175	836.927497
0.00144	-6.82E-03	6.15E-03	-1.31E-04	6.03E-07	6.02942E-07	0.775433271	0.0768663	783.527696
0.00146	-5.84E-03	5.70E-03	-1.31E-04	7.21E-07	7.21422E-07	0.776680175	0.09197074	726.916538
0.00148	-4.49E-03	5.79E-03	-1.36E-04	8.36E-07	8.36364E-07	0.802356946	0.10662424	738.433567
0.0015	-2.76E-03	6.05E-03	-1.39E-04	9.55E-07	9.54783E-07	0.819506311	0.1217209	771.231731
0.00152	-1.50E-03	6.08E-03	-1.39E-04	1.08E-06	1.07611E-06	0.822697441	0.13718861	775.539462
0.00154	-1.20E-03	5.77E-03	-1.28E-04	1.19E-06	1.19469E-06	0.754034976	0.1523059	736.189825
0.00156	-1.03E-03	5.02E-03	-9.42E-05	1.30E-06	1.3026E-06	0.556474527	0.16606187	639.406749
0.00158	-1.34E-04	3.64E-03	-4.89E-05	1.39E-06	1.38912E-06	0.288868791	0.17709213	463.619708
0.0016	-1.76E-04	2.21E-03	-2.11E-05	1.45E-06	1.44755E-06	0.12491566	0.18454155	281.321988
0.00162		1.27E-03	-1.51E-05	1.48E-06	1.48235E-06	0.089458669	0.18897789	162.311836
0.00164		6.48E-04	-9.59E-06	1.50E-06	1.50157E-06	0.05667277	0.19142767	82.6662374
0.00166		-7.63E-05	-1.18E-05	1.51E-06	1.50729E-06	0.069443197	0.19215706	-9.7271345
				1.57E-06	1.57062E-06	0	0.20023058	0

Al realizar los ensayos se compara la forma de una gráfica con un ensayo cuasi estático contra los ensayos dinámicos a diferentes velocidades, figura 4, la probeta para ensayo cuasi estático tiene una densidad relativa de 0.1 y las probetas para ensayos dinámicos tienen una densidad relativa de 0.09. Ahora después de realizar el análisis de los datos, se obtiene la gráfica esfuerzo deformación, figura 5, para realizar un ensayo con velocidad de impacto de 36.1 m/s y tasa de deformación de 870 1/s, se suministró una presión de 42 psi al cañón.

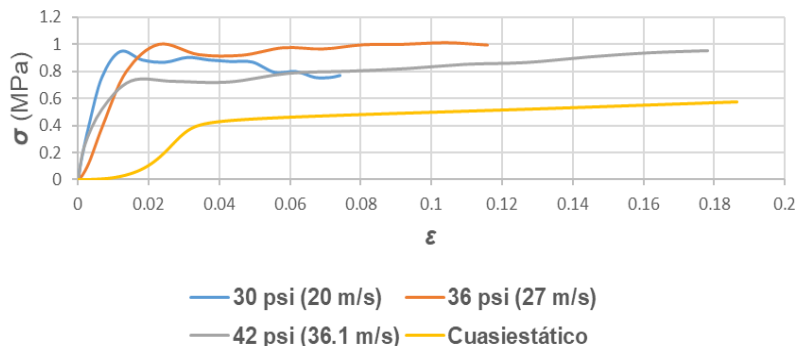


Figura 4 Comparación de graficas.

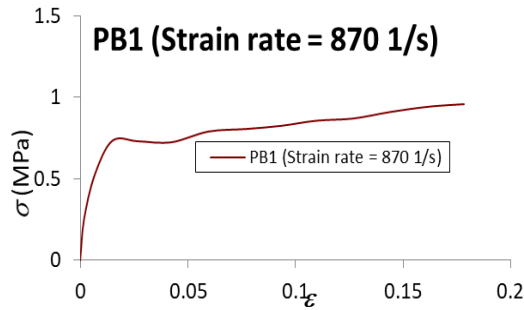


Figura 5 Gráfica esfuerzo deformación para 42 psi.

Para realizar un ensayo con velocidad de impacto de 27 m/s y tasa de deformación de 590 1/s, se suministró una presión de 36 psi al cañón, figura 6.

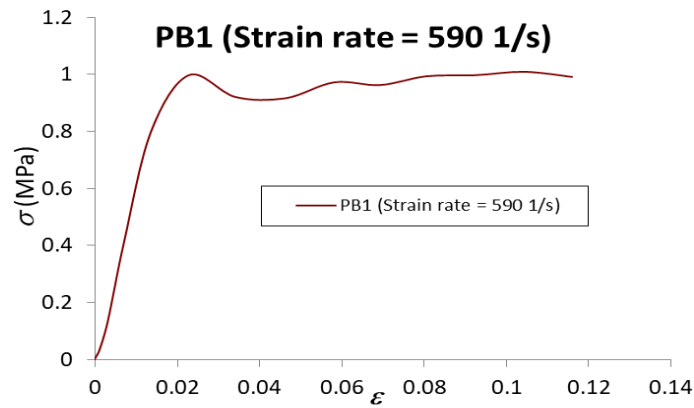


Figura 6 Gráfica esfuerzo deformación para 36 psi.

Para realizar un ensayo con velocidad de impacto de 20 m/s y tasa de deformación de 320 1/s, se suministró una presión de 30 psi al cañón, figura 7.

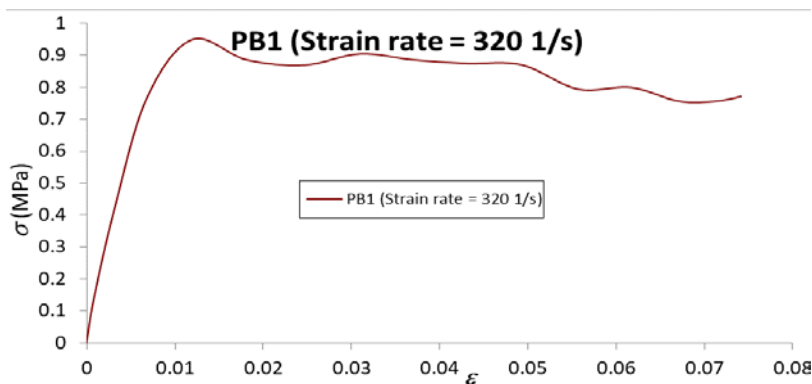


Figura 7 Gráfica esfuerzo deformación para 30 psi.

De las gráficas anteriores se seleccionó la parte lineal (parte elástica), se realiza una aproximación lineal de cada gráfica para obtener la pendiente (módulo elástico). Para un ensayo a 42 psi se obtuvo un módulo elástico de 55.10 MPa y una resistencia a la fluencia de 0.729 MPa, figura 8.

Para un ensayo a 36 psi se obtuvo un módulo elástico de 62.184 MPa y una resistencia a la fluencia de 0.92 MPa, figura 9.

Para un ensayo a 30 psi se obtuvo un módulo elástico de 104.08 MPa una resistencia a la fluencia de 0.88 MPa, figura 10.

Para comparar el módulo elástico y resistencia a la fluencia contra un ensayo cuasi estático se presenta la figura 11 [3].

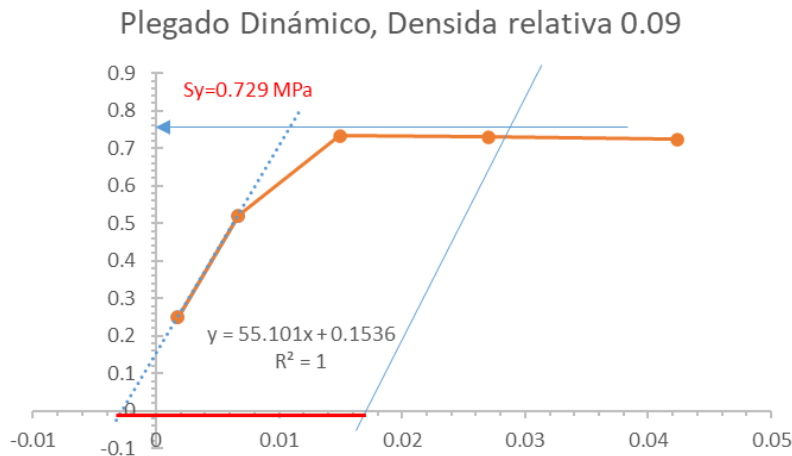


Figura 8 Módulo elástico y resistencia a la fluencia a 36.1 m/s.

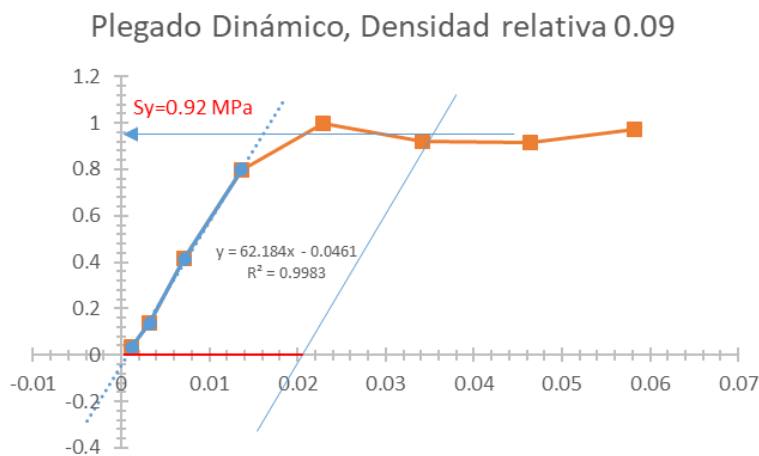


Figura 9 Módulo elástico y resistencia a la fluencia a 27 m/s.

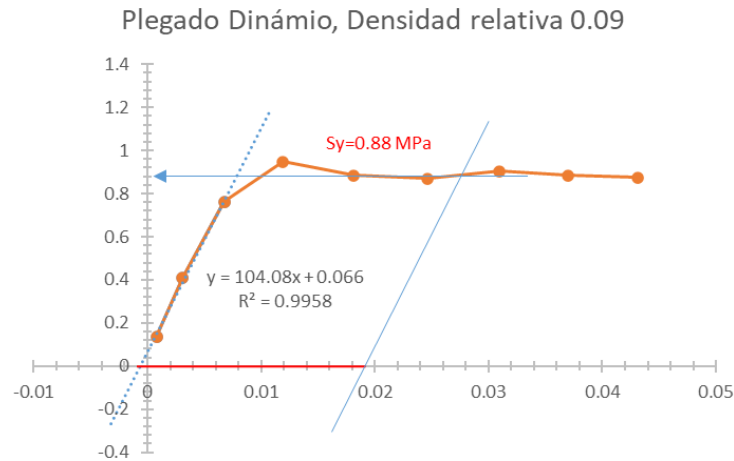


Figura 10 Módulo elástico y resistencia a la fluencia a 20 m/s.

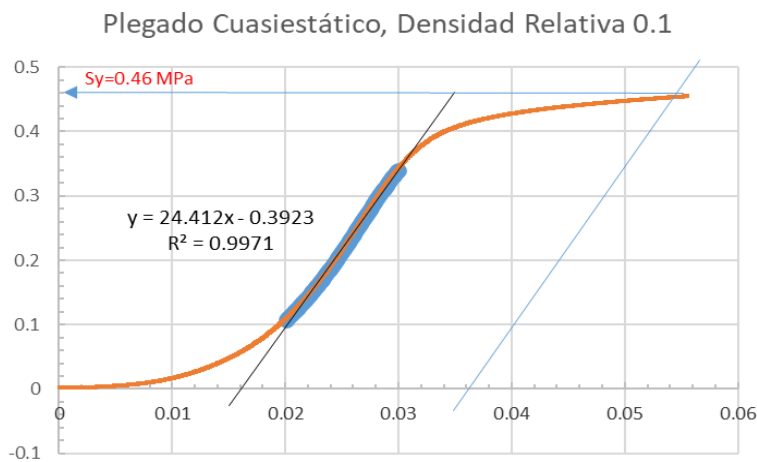


Figura 11 Módulo elástico y resistencia a la fluencia para ensayo cuasi estático.

4. Discusión

Los cálculos de módulo elástico y resistencia a la fluencia fueron calculados, con el software Excel, los resultados podrían mejorar, utilizando una tarjeta de adquisición de datos con mayor umbral de captura, para obtener así más datos y graficar la curva esfuerzo deformación con mayor resolución y por ende así obtener una mejor aproximación a las propiedades buscadas gráficamente.

5. Conclusiones

Se comparó el módulo elástico entre un ensayo cuasi estático de una probeta de aluminio plexo pegado con densidad relativa de 0.1 y un ensayo dinámico a

aproximadamente 36 m/s, de una probeta de aluminio plexo pegado con densidad relativa de 0.09, se observa que el módulo elástico en el ensayo dinámico es de 55.1 MPa, el cual es casi el doble (múltiplo) del módulo elástico en el ensayo cuasi estático (24 MPa). Las resistencias a la fluencia para los tres ensayos dinámicos a diferentes tasas de deformación son mayores comparándolas contra la resistencia a la fluencia en un ensayo cuasi estático.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Irausquin Castro, I. A. (2012). Caracterización mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía.
- [2] Kolsky, H. (1949). An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. *Proceedings of the physical society. Section B*, 62(11), 676.
- [3] Medina, R. E. (2017). Caracterización de propiedades mecánicas del aluminio, acero y óxido de grafeno plegados mediante ensayos de compresión. Celaya.
- [4] Rao, S., Shim, V. P. W., & Quah, S. E. (1997). Dynamic mechanical properties of polyurethane elastomers using a nonmetallic Hopkinson bar. *Journal of Applied Polymer Science*, 66(4), 619-631.
- [5] Tamaogi, T., Sogabe, Y., Wu, Z., & Yokoyama, T. (2017). Identification of mechanical models for golf ball materials using a viscoelastic split hopkinson pressure bar. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 3(3), 377-390.
- [6] Tuazon, B. J.; Bae, K. O., Lee, S. H., & Shin, H. S. (2014). Integration of a new data acquisition/processing scheme in SHPB test and characterization of the dynamic material properties of high-strength steels using the optional form of Johnson-Cook model. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(9), 3561-3568.
- [7] Wang, L., Labibes, K., Azari, Z., & Pluvinage, G. . (1994). Generalization of split Hopkinson bar technique to use viscoelastic bars. *International journal of impact engineering*, 15(5), 669-686.