UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Facultad de Ingeniería
Departamento de Mecánica

CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO A BASE DE ACIDO POLILÁCTICO (PLA) CON REFUERZOS DE FIBRA DE CABECINEGRO (MANICARIA SACCIFERA) A ALTAS TASAS DE DEFORMACIÓN UNITARIA EN EL BANCO DE PRUEBAS DE BARRA DIVIDIDA DE HOPKINSON

Proyecto de Grado
Para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Juan Sebastián Peña Fandiño
Código: 200822348

Asesor
Alejandro Marañón León, Ingeniero Mecánico. Ph. D.

Bogotá, D. C, Colombia
Julio 11 de 2014

Agradecimientos

Quiero agradecer con la culminación de mis estudios de pregrado a todas las personas que me acompañaron y apoyaron hasta llegar a este. A todo el departamento de Ingeniería Mecánica por su ayuda y su apoyo durante el desarrollo de mi carrera.

A Miguel, a Manuel y a Rafael por ser mi apoyo incondicional desde el momento que los conocí. Empezamos nuestras carreras siendo amigos y las terminamos como hermanos. A Luz Alba por darme su cariño, su incondicionalidad y su incuestionable amistad durante todos estos años. Te adoro mi hermanita.

Por último quiero agradecer a mi familia por todo su amor y por todo su apoyo durante todas las etapas de mi vida y en especial a mi mamá: eres el mejor ejemplo de vida que pude haber tenido, gracias por levantarme con fuerza en los momentos que me sentía caído, gracias por tu amor, tu sacrificio y por ser mi más grande confidente. Todo lo que soy hoy te lo debo a ti mamá te adoro.

Tabla de contenido

Lista de Ilustraciones 5

Lista de Tablas 6

1. Introducción 1

2. Objetivo General 2

3. Marco Teórico 2

3.1 Barra Dividida de Hopkinson 2

4 Metodología 9

4.1 Materiales del Compuesto 9

4.1.1 Cabecinegro 9

4.1.2 Ácido Poliláctico 11

4.2 Equipos 12

4.3 Manufactura del Compuesto 16

4.4 Maquinado de las probetas 19

4.5 Alineación de la Barra Dividida de Hopkinson 21

4.6 Pruebas cuasi estáticas en banco de pruebas Instron 23

4.7 Pruebas Preliminares 24

4.8 Análisis de las Impedancias de las barras y el compuesto 26

4.9 Diseño y Manufactura del *Pulse Shaper* 27

5 Resultados 31

6. Conclusiones 36

7. Trabajos futuros y recomendaciones 37

Bibliografía 37

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1 Esquema del ensayo de John Hopkinson *2*
Ilustración 2 Esquema del banco de pruebas moderno (Uribe, 2011) *3*
Ilustración 3 Pulsos incidente, transmitido y reflejado en gráfica de distancia vs tiempo (Chen & Song, 2011)4
Ilustración 4 Respuesta característica de la barra dividida de Hopkinson (REL, 2014) *5*
Ilustración 5 Variables del ensayo en la SHPB (Chen & Song, 2011) *6*
Ilustración 6 Puente de Wheatstone en configuración de cuarto de puente (Chen & Song, 2011) *7*
Ilustración 7 Palma de Manicaria saccifera (Palmiers, 2014) *9*
Ilustración 8 Brácteas pedúnculares de la manicaria saccifera *10*
Ilustración 9 Polimerización del ácido láctico (ChemVista.net, 2014) *11*
Ilustración 10 1.Extrusora Bamberg 2.Horno Thermolyne 3.Prensa Dake *12*
Ilustración 11 Sierra vertical Sinfín y CNC Fadal *12*
Ilustración 12 Banco de pruebas cuasi estáticas Instron *13*
Ilustración 13 Barra dividida de Hopkinson Universidad de los Andes *14*
Ilustración 14 Galgas extensiométricas, sistema de adquisición de datos National Instruments y amplificador Vishay *15*
Ilustración 15 3 Foto sensores, caja de control y servo válvula del banco de pruebas *15*
Ilustración 16 Secado de pellets de PLA y lámina extruida *16*
Ilustración 17 Capas de cabecinegro y PLA *17*
Ilustración 18 Bloque del compuesto en prensa Dake *18*
Ilustración 19 Curva de temperatura vs tiempo en el prensado del compuesto *18*
Ilustración 20 Esquema de las direcciones del compuesto *19*
Ilustración 21 Maquinado de las probetas *20*
Ilustración 22 Probetas de fibras de cabecinegro en matriz de PLA *20*
Ilustración 23 Señal ideal de un banco de pruebas alineado (Chen & Song, 2011) *21*
Ilustración 24 Señal del banco de pruebas alineado *22*
Ilustración 25 Ensayos cuasi-estáticos a compresión en el banco de pruebas Instron *23*
Ilustración 26 Prueba preliminar del compuesto *25*
Ilustración 27 Simulación del pulso incidente con un pulse shaper de radio: 4,4 mm y un espesor de 2 a 4.1 mm *28*
Ilustración 28 Moldeo del estaño para su maquinado en el torno *29*
Ilustración 29 Maquinado en torno del estaño *30*
Ilustración 30 Pulso incidente y reflejado de los ensayos en la barra dividida *31*
Ilustración 31 Pulso transmitido de los ensayos en la barra dividida *32*
Ilustración 32 Curvas esfuerzo-deformación unitaria de los ensayos en la barra dividida *33*
Ilustración 33 Curvas de esfuerzo-deformación unitaria de PLA *34*

Lista de Tablas

Tabla 1 Propiedades del aluminio 7075-T6 ..... *14*
Tabla 2 Dimensiones del proyectil y las barras del banco de pruebas *14*
Tabla 3 Peso y número de capas en cada bloque prensado *17*
Tabla 4 Módulos de elasticidad del compuesto en condiciones cuasi estáticas *24*
Tabla 5 Densidades e impedancias de las barras y el espécimen *26*
Tabla 6 Módulos de elasticidad de metales candidatos del pulse shaper *27*
Tabla 7 Propiedades mecánicas del estaño *27*
Tabla 8 Coeficientes del modelo Ramberg-Osgood del estaño *28*
Tabla 9 Esfuerzo máximo y tasa de deformación de los ensayos del compuesto en la barra dividida *34*
Tabla 10 Esfuerzo máximo y tasa de deformación promedio del PLA *35*

1. Introducción

La caracterización dinámica a altas tasas de deformación unitaria es un área de cada vez mayor importancia en la industria debido a los últimos avances que se han generado en la modelación numérica aplicada a la deformación plástica por cargas dinámicas en materiales de distintos tipos. En este proyecto se analizará el comportamiento del compuesto natural biodegradable de palma de cabecinegro o Manicaria Saccifera en matriz de ácido poliláctico a altas tasas de deformación unitaria utilizando el banco de pruebas de barra dividida de Hopkinson.

La industria de los compuestos es un campo de la ingeniería de los materiales que se encuentra en un prominente desarrollo durante los últimos años. Una familia de este tipo de materiales son los compuestos generados a partir de fibras naturales con matrices poliméricas. Debido a los avances en los polímeros utilizados para aplicaciones estructurales, los compuestos con este tipo matrices han reemplazado muchos de los componentes que se producían anteriormente con metales o cerámicos.

Las ventajas que ofrecen los polímeros de hoy en día son: la facilidad y la reducción de costos de manufactura y la velocidad de producción. Para que sus propiedades mecánicas puedan competir con los metales y los cerámicos en cuanto a las propiedades mecánicas y viabilidad económica en el proceso de manufactura, los investigadores han adicionado refuerzos de distintos tipos.

Entre estos se encuentran las fibras naturales las cuales presentan ciertas ventajas sobre otros tipos de refuerzos utilizados para reforzar las matrices poliméricas. Algunas de las ventajas de las fibras naturales son su bajo costo, su baja densidad y a diferencia de la fibra de vidrio o la fibra de carbono, las fibras naturales son biodegradables contribuyendo de esta manera con el medio ambiente. (Saheb, 1999).

Los trabajos previos que se han desarrollado con este compuesto en la Universidad de los Andes se han basado en el desarrollo de las propiedades e investigación del material bajo propiedades cuasi estáticas y con distintas configuraciones geométricas. Los estudiantes Carolina Delgado y Camilo Arias desarrollaron sus proyectos de grado en las investigaciones de perfiles estructurales de construcción con el compuesto y el estudiante Carlos Iván Medina investigó en su proyecto de grado sobre la influencia de distintos colorantes en el desempeño y las propiedades mecánicas del este.

2. Objetivo General

Utilizando el banco de pruebas de la barra dividida Hopkinson, caracterizar las propiedades en la fase de deformación permanente o plasticidad del compuesto de fibras de Cabecinegro en una matriz de PLA (Ácido Poliláctico) en compresión a altas tasas de deformación unitaria.

3. Marco Teórico

3.1 Barra Dividida de Hopkinson

La barra dividida de Hopkinson también conocida como barra de Kolsky es una alternativa a los bancos de pruebas de impacto utilizados para estudiar el comportamiento y las propiedades de distintos materiales cuando se someten a altas tasas de deformación. El primer prototipo del banco fue desarrollado por John Hopkinson quien a finales del siglo XIX, estudió la propagación de las ondas a través de un alambre de hierro deformado por una masa en caída libre la cual impactaba un peso sujeto al final del alambre como se muestra en el siguiente esquema.

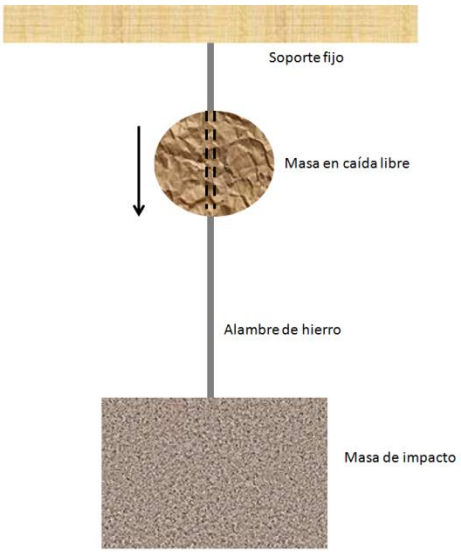

Ilustración 1 Esquema del ensayo de John Hopkinson

Su hijo Bertram Hopkinson, estudió el fenómeno de impacto pero se centró más en los métodos de medición de la presión sometida a un espécimen impactado por un proyectil. Hopkinson hijo

utilizó como método de medición un sistema de péndulos los cuales generaban un momentum medible cuando el proyectil impactaba una barra sujetada a estos.

Se realizaron distintos avances en medición y en el mejoramiento del dispositivo anteriormente desarrollado por Hopkinson pero fue Herbert Kolsky quien a mediados del siglo XX utilizó los conceptos de propagación de ondas a través de materiales y mediciones de impactos a altas velocidades para crear un banco de pruebas con el objetivo de caracterizar materiales a altas tasas de deformación. Los siguientes años al desarrollo del dispositivo de Kolsky se centraron en la mejora de los instrumentos de medición como lo fue el caso de Krafft quien en 1954 reemplazó los condensadores por galgas extensiométricas las cuales miden con mayor precisión las micro deformaciones de las barras que componen el sistema. (Chen & Song, 2011).

Se han generado mínimas modificaciones desde entonces en la estructura básica de la barra dividida de Hopkinson y a continuación se muestra el esquema general de los bancos de pruebas utilizados hoy en día:

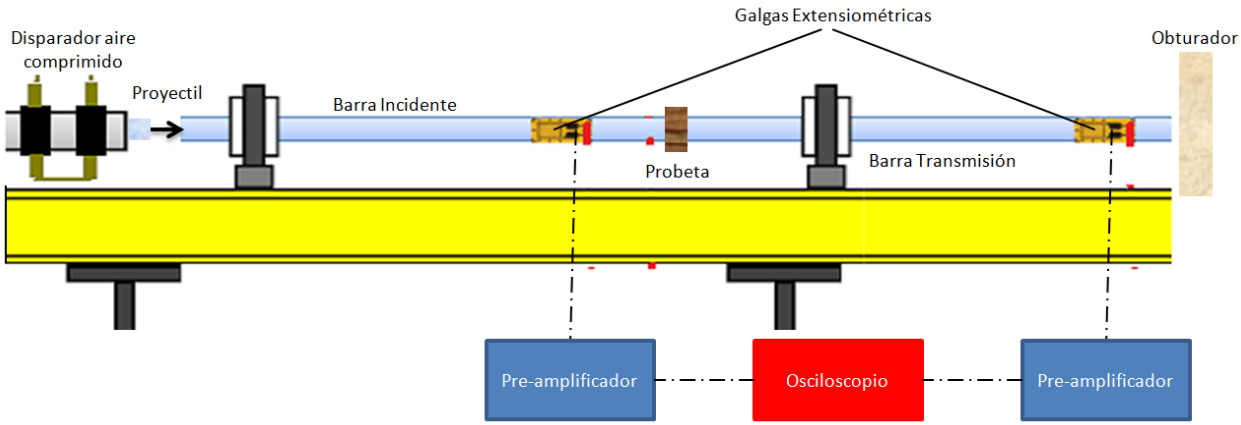

Ilustración 2 Esquema del banco de pruebas moderno (Uribe, 2011)

El sistema posee un disparador de aire comprimido el cual es contralado por una servo válvula accionada electrónicamente. Este impulsa un proyectil que atraviesa un cañón con una serie de orificios los cuales mantienen constante la velocidad del proyectil generando una medida repetible.

El proyectil impacta la barra incidente generando una onda la cual viaja a través de la barra. Esta debe poseer la suficiente longitud para permitir que la onda se estabilice y alcance una magnitud constante. En el extremo final de la barra incidente se encuentra la probeta o espécimen del

material a caracterizar el cual a su vez se encuentra fija a una barra de transmisión. En general el proyectil y las barras incidente y de transmisión se fabrican del mismo material y el mismo diámetro con el objetivo de que la onda que propagan no sea afectada por una diferencia de las impedancias entre los componentes del banco de pruebas.

Las dos barras poseen galgas extensiométricas en su superficie las cuales, miden las micro deformaciones generadas por la onda de esfuerzo y se encuentran equidistantes a la probeta. Las galgas se encuentran acondicionadas con un arreglo de puente de Wheatstone tipo cuarto de puente o medio puente. Debido a que la transducción de las micro deformaciones en voltaje posee de un orden de magnitud mínimo es necesario que cada una de las galgas posea un amplificador electrónico y a su vez un osciloscopio que capten adecuadamente los resultados generados.

En la siguiente imagen se muestra la propagación de las ondas de esfuerzo a través de los componentes del banco de pruebas:

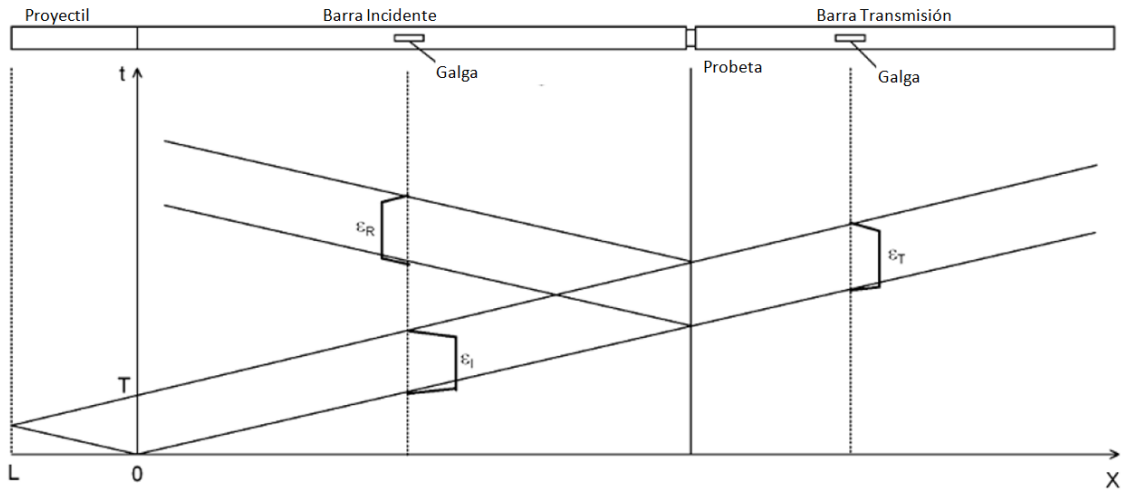

Ilustración 3 Pulsos incidente, transmitido y reflejado en gráfica de distancia vs tiempo (Chen & Song, 2011)

Como se puede observar en la gráfica de posición contra tiempo, se generan tres ondas durante la realización del experimento. La primera con el símbolo de ε_I (pulso incidente) es la onda virgen generada por el impacto del proyectil y que pasa a través de la barra incidente hasta alcanzar la probeta. Al pasar el espécimen, se generan las dos ondas restantes, la primera ε_R (pulso reflejado) es la onda que por efectos de la diferencias entre las impedancias del material y la barra se refleja

nuevamente hacia la barra incidente y ε_T (pulso transmitido) la cual es la energía restante que no se reflejó y atraviesa la barra de transmisión.

La señal característica emitida por los tres pulsos en el dispositivo de adquisición se muestra a continuación. Como se observa, si las galgas se encuentran equidistantes de la probeta, los pulsos reflejado y transmitido iniciarán en el mismo instante durante el experimento.

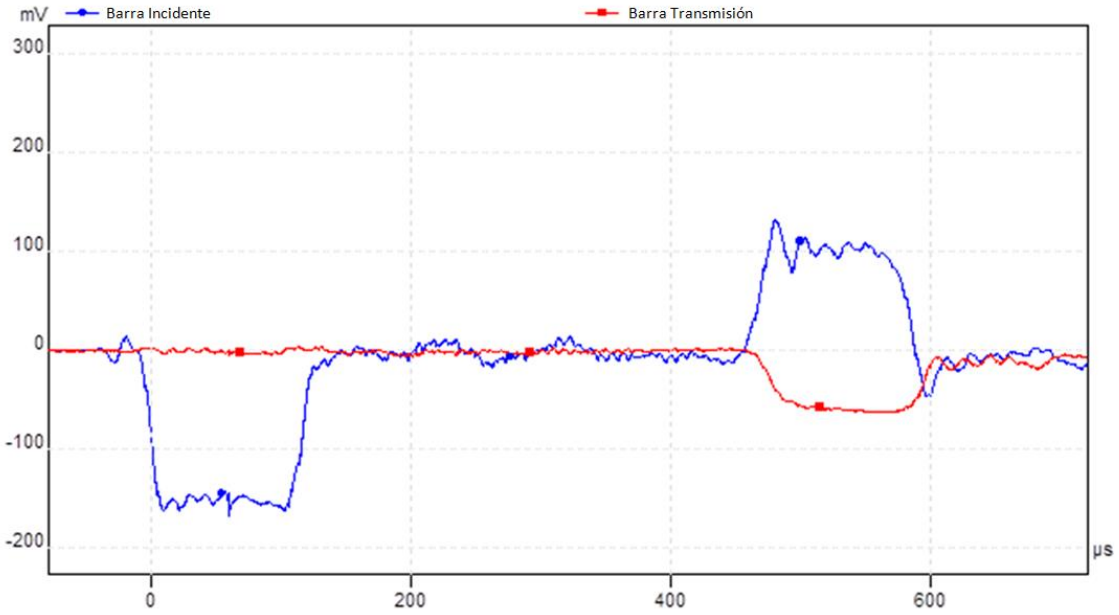

Ilustración 4 Respuesta característica de la barra dividida de Hopkinson (REL, 2014)

El pulso incidente viene dado por la siguiente relación:

$$\varepsilon_I = \frac{v_p}{2C_B} \qquad \textbf{(1)}$$

Donde v_p es la velocidad constante del proyectil al impactar la barra incidente y C_B es la velocidad del sonido característica de la barra. Durante el impacto de las dos barras y la probeta, la barra incidente y de transmisión alcanzan dos velocidades distintas v_1 y v_2 las cuales dependen en la primera, de los pulsos incidente y reflejado y la segunda del pulso transmitido:

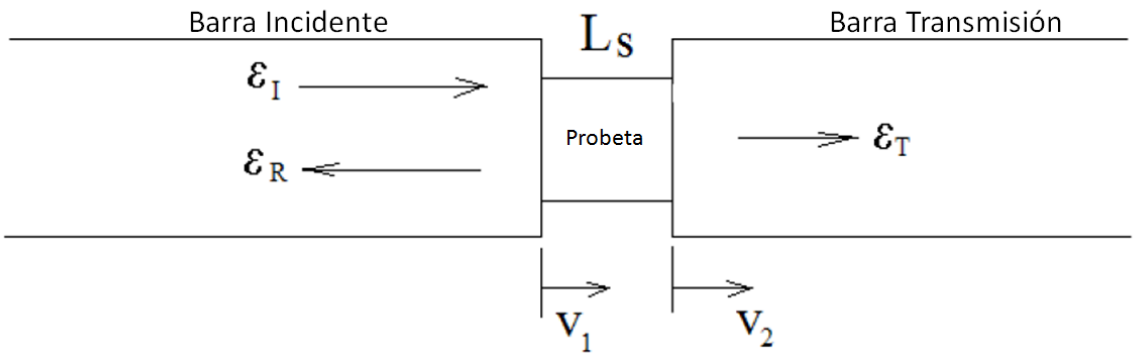

Ilustración 5 Variables del ensayo en la SHPB (Chen & Song, 2011)

$$v_1 = C_B\ (\varepsilon_I - \varepsilon_R) \qquad \textbf{(2)}$$

$$v_2 = C_B\ \varepsilon_T \qquad \textbf{(3)}$$

Con las expresiones (2) y (3) se pueden obtener la tasa de deformación (4) , la deformación (5) y los dos esfuerzos a los que se somete la probeta en sus caras (6) y (7) (ASM, 2000):

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_1 - v_2}{L_s} = \frac{C_B}{L_s}(\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) \qquad \textbf{(4)}$$

$$\epsilon = \int_0^t \dot{\epsilon}\, dt = \frac{C_B}{L_s}\int_0^t (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T)\, dt \qquad \textbf{(5)}$$

$$\sigma_1 = \frac{A_B}{A_p} E_b(\varepsilon_I + \varepsilon_R) \qquad \textbf{(6)}$$

$$\sigma_2 = \frac{A_B}{A_p} E_b \varepsilon_T \qquad \textbf{(7)}$$

Donde A_B y A_p son las áreas transversales de las barras y la probeta respectivamente, E_b es el modulo de elasticidad de las barras y L_s es el espesor de la probeta. Asumiendo que el espesor de la probeta es lo suficientemente pequeño como para mantener un equilibrio en los esfuerzos de las dos caras, se pueden igualar las expresiones (6) y (7) generando de esta manera las siguientes simplificaciones con ayuda de la expresión (8):

$$\varepsilon_I + \varepsilon_R = \varepsilon_T \qquad \textbf{(8)}$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 \qquad \textbf{(9)}$$

$$\dot{\epsilon} = -2\frac{C_B}{L_s}\varepsilon_R \quad \textbf{(10)}$$

$$\epsilon = -2\frac{C_B}{L_s}\int_0^t \varepsilon_R dt \quad \textbf{(11)}$$

$$\sigma = \frac{A_B}{A_p}E_b\varepsilon_T \quad \textbf{(12)}$$

Las anteriores expresiones son solo validadas si las ondas de propagación en las barras son constantes y uniformes. Esta uniformidad se cumple si las barras tienen una longitud lo suficientemente alta para estabilizar las ondas y un diámetro mínimo para evitar la presencia de efectos de inercia radial y garantizar la propagación únicamente en la dirección longitudinal deseada. Otro de los factores más importantes a tener en cuenta es el esfuerzo de fluencia de las barras, el cual debe ser los suficientemente alto para garantizar que no existan fenómenos de plasticidad que afecten los resultados y la integridad de los componentes del banco de pruebas. (Kolsky, 1949)

El último de los aspectos más importantes durante la experimentación en el banco de pruebas de barra dividida de Hopkinson es el arreglo de puente de Wheatstone para la transducción de voltaje a micro deformaciones en las galgas extensiométricas. Para evitar la mayor presencia de ruido se ha optado por la configuración de cuarto de puente. Esta configuración consiste en configurar las resistencias de las galgas en serie dentro del puente:

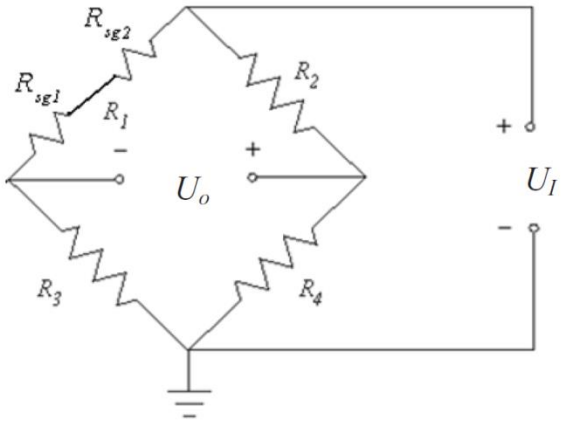

Ilustración 6 Puente de Wheatstone en configuración de cuarto de puente (Chen & Song, 2011)

Las resistencias de cada una de las galgas deben tener la misma magnitud de manera que:

$$R_{sg} = R_{sg1} = R_{sg2} \qquad \textbf{(13)}$$

$$R_1 = 2R_{sg} \qquad \textbf{(14)}$$

Tomando las resistencias R_2, R_3 y R_4 con una misma magnitud, se denominan las tres como R. En el caso del cuarto de puente la resistencia de las demás ramas deben ser equivalentes a la suma de las resistencias de las galgas con el propósito de que el puente se encuentre correctamente balanceado.

$$R = 2R_{sg} \qquad \textbf{(15)}$$

Cuando la barra se somete a una deformación, el cambio total de la resistencia en el puente se denomina como ΔR donde cada una de las galgas contribuye con un medio de tal cambio:

$$R_1 = R + \Delta R \qquad \textbf{(16)}$$

Según la teoría de los puentes de Wheatstone, el voltaje de salida V_0 de un puente cuando es excitado con un voltaje de entrada V_I es:

$$V_0 = \left(\frac{R_4}{R_2+R_4} - \frac{R_3}{R_1+R_3}\right) V_I \qquad \textbf{(17)}$$

Reemplazando los valores de las resistencias en la ecuación (17) se obtiene la siguiente expresión:

$$V_0 = \left(\frac{R}{2R} - \frac{R}{R+\Delta R+R}\right) V_I = \left(\frac{1}{2} - \frac{R}{2R+\Delta R}\right) V_I \qquad \textbf{(18)}$$

Aplicando la definición del factor de galga, un valor constante se obtiene la ecuación de transducción de voltaje a deformación reemplazando la siguiente expresión en la ecuación (18):

$$G_F = \frac{\Delta R}{R}\frac{1}{\varepsilon} \qquad \textbf{(19)}$$

$$\varepsilon = \frac{4V_0}{G_F V_I} \qquad \textbf{(20)}$$

4 Metodología

4.1 Materiales del Compuesto

4.1.1 Cabecinegro

La palma de Cabecinegro conocida también como *Manicaria Saccifera Gaetner* se encuentra clasificada dentro del reino vegetal en la división Magnoliophyta, la Clase Liliopsida y la Subclase Arecide. Consiste morfológicamente de un tronco de aproximadamente 6m de largo y un diámetro que varía entre los 15 y 30 cm.

Ilustración 7 Palma de Manicaria saccifera (Palmiers, 2014)

Cada espécimen posee alrededor de 5 a 10 hojas suberectas y péndulas que se componen de una vaina fibrosa de aproximadamente 70 cm de longitud y aproximadamente 40 pinnas (divisiones de los limbos de cada hoja también conocidas como foliolo) en cada uno de los bordes del peciolo o continuación de la vaina. Cada hoja posee una inflorescencia de aproximadamente 1.7 m de longitud que poseen brácteas pedúnculares color pardo de hasta un metro de longitud, fusiformes y compuestas por fibras entretejidas. Estas brácteas pueden alcanzar hasta un 50 cm

de longitud y son el componente principal del compuesto. Cada palma puede producir de 3 a 10 florescencias.

Ilustración 8 Brácteas pedúnculares de la manicaria saccifera

La familia de la manicaria crece principalmente en unidades de formación aluvial como zonas inundadas, ríos y bosques húmedos. En Colombia, el cabecinegro habita alrededor de los ríos Negro y Amazonas y en departamentos como el Cauca, Nariño, Amazonas y Chocó.

El cabecinegro ha sido utilizado principalmente por comunidades como la Wuanana para aplicaciones de uso artesanal y de uso cotidiano. Las hojas de la palma son utilizadas para techar los tambos o casas de la comunidad. También se producen en menor grado artículos como canastos, escobas y sustratos para el cultivo de tubérculos como el ñame. Las fibras son utilizadas en la creación de bolsos y otros artículos para transportar instrumentos de caza y agricultura. La amplia ventaja frente a otras fibras naturales es impermeabilidad y fácil manipulación durante la manufactura de los artículos (Francisco, 2011).

4.1.2 Ácido Poliláctico

El ácido poliláctico (PLA) es un polímero que pertenece a la familia de los termoplásticos y se produce principalmente a partir de fuentes primarias renovables como el maíz y la caña de azúcar. Estos productos se fermentan para formar ácido láctico. El ácido láctico se polimeriza por medio de dos procesos paralelos, condensación directa y ROP (Ringopening Polimerization) el cual consiste en la formación del diester cíclico conocido como lactida que a continuación se abre con ayuda del estaño como catalizador para formar la cadena polimérica. Por último se le generan modificaciones finales para reducir la cantidad de monómeros y entregarle mayor estabilidad a la integridad estructural del polímero de alto peso molecular.

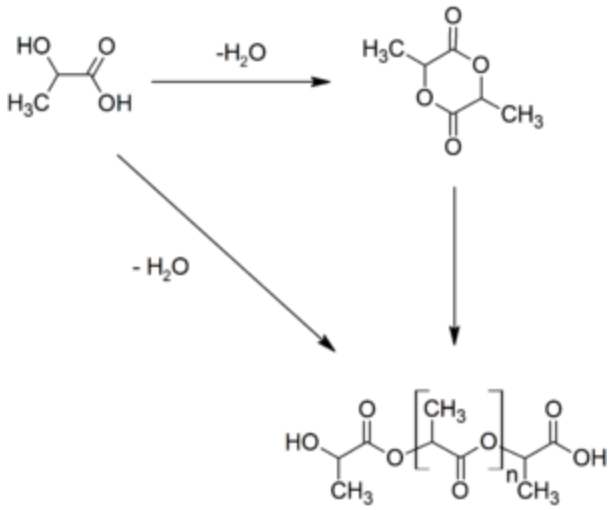

Ilustración 9 Polimerización del ácido láctico (ChemVista.net, 2014)

Ya que se produce a partir de fuentes primarias orgánicas, el PLA es completamente biodegradable y ocurre por medio de la hidrolisis del ácido láctico el cual es reducido a sus monómeros. Estos son aprovechados y metabolizados por distintos microorganismos y su residuo final es monóxido de carbono en bajos porcentajes. Cuando se agrega al compostaje su degradación tarda alrededor de dos semanas (Oksman, Skrifvars, & Selin, 2003).

Además de servir para matrices en compuestos de fibras naturales, el PLA es aplicable en la industria de productos desechables como vasos, pañales y bolsas. El PLA es el segundo polímero biodegradable más producido a nivel mundial.

4.2 Equipos

Durante el desarrollo del material se utilizaron para su manufactura y maquinado distintos equipos pertenecientes al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes. Para generar las láminas a de ácido poliláctico se utilizó la extrusora de polímeros Bamberg PLE 331 del laboratorio ML 036. Para prensar y generar el laminado de las fibras naturales y el polímero se utilizaron los hornos Thermolyne Oven y Blue B-2730-Q del laboratorio de polímeros ML 204 y la prensa Dake 44-251.

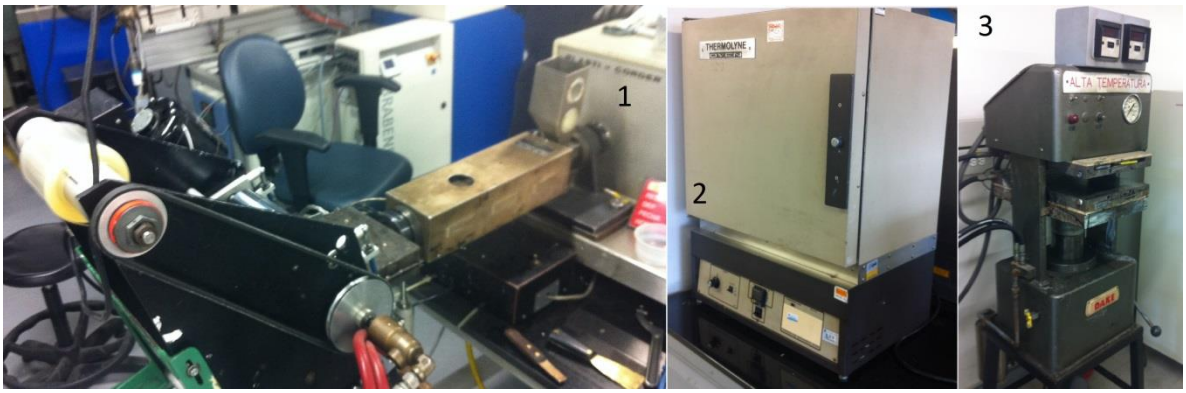

Ilustración 10 1.Extrusora Bamberg 2.Horno Thermolyne 3.Prensa Dake

En el maquinado de las probetas se utilizó el CNC Fadal VMC 2216 y la sierra vertical sinfín del laboratorio de manufactura ML 027.

Ilustración 11 Sierra vertical Sinfín y CNC Fadal

Para las pruebas mecánicas que se realizaron durante el desarrollo del proyecto de grado se utilizaron el sistema de ensayos de pruebas axiales a tensión y compresión en estado cuasi estático Instron.

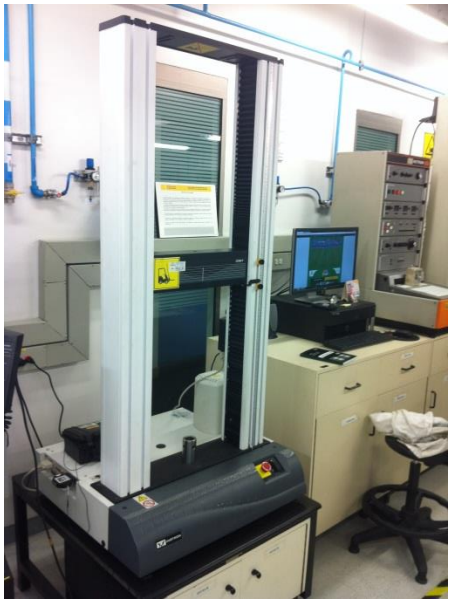

Ilustración 12 Banco de pruebas cuasi estáticas Instron

Las pruebas de caracterización dinámica se realizaron en el sistema de barra dividida de Hopkinson del laboratorio ML 007 desarrollado por el estudiante de maestría Álvaro Geovany Ramírez asesorado por el profesor asociado del departamento Luis Mario Mateus.

Ilustración 13 Barra dividida de Hopkinson Universidad de los Andes

El sistema se encuentra sobre una base de vigas de acero las cuales soportan el cañón, las barras y el obturador que amortigua la barra de transmisión al ser impactada por el proyectil. Las barras y el proyectil del banco de pruebas fueron fabricadas en aluminio 7075-T6 con las siguientes propiedades (Acosta, 2013):

Tabla 1 Propiedades del aluminio 7075-T6

Esfuerzo de Tensión (MPa)	572
Esfuerzo de Fluencia (MPa)	503
Coef. De Poisson	0,33
Dureza Rockwell B	87
Densidad (kg/m^3)	2810
V. Sonido (m/s)	5030

A continuación se muestran las dimensiones de los tres componentes:

Tabla 2 Dimensiones del proyectil y las barras del banco de pruebas

	Diámetro (mm)	Longitud (mm)
Proyectil	19,5	300
Barra Incidente		2600
Barra Transmisión		2000

Cada una de las galgas se encuentra equidistante del extremo donde se sitúa la probeta a 1300 mm. Las galgas utilizadas poseen una resistencia de galga equivalente a $120\,\Omega$ con un factor de

galga G_F igual a 2.095. Las muestras son tomadas con una tasa de muestreo de $200\ MS/s$ en un tiempo de muestreo equivalente de $2\ ms$. Cada una de las galgas se encuentra conectada al amplificador Referencia Vishay 2300 encargado de acondicionar las señales y transmitirlas al sistema de adquisición de datos NI de National Instruments.

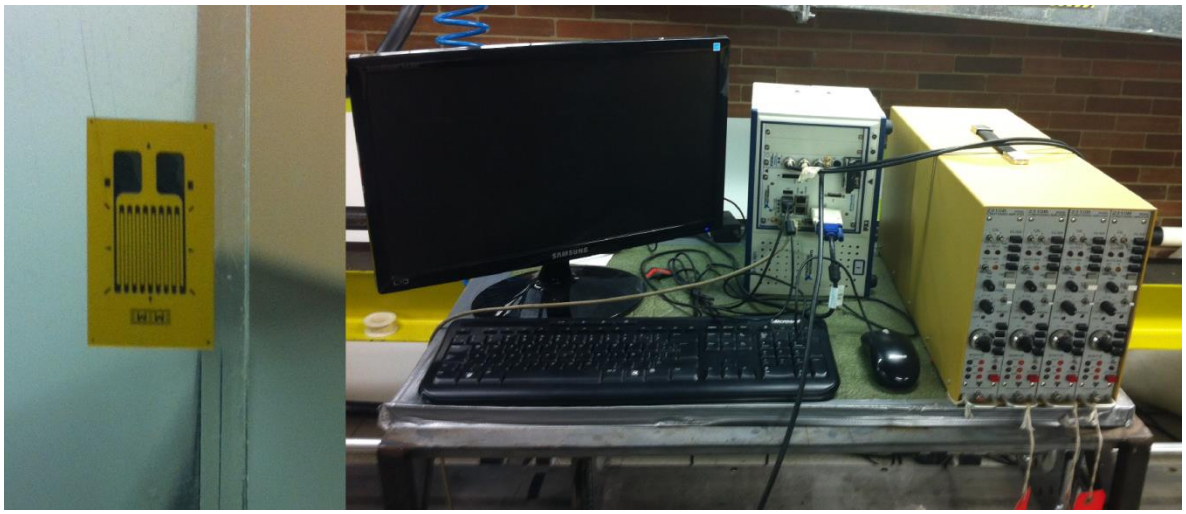

Ilustración 14 Galgas extensiométricas, sistema de adquisición de datos National Instruments y amplificador Vishay

La presión que alimenta el disparador de aire comprimido se controla mediante una servo válvula en configuración AC referencia RS 232. Al atravesar el cañón, la medición de la velocidad del proyectil se mide a través de un par de foto sensores con una distancia cada uno de $20\ mm$. La servo válvula y los foto sensores se encuentran conectados a la caja de control la cual se encarga de activar los componentes electrónicos del sistemas, además de iniciar el sistema de adquisición de datos. La interfaz de adquisición de datos se diseñó en la plataforma de Simulink del Software Matlab. (Uribe, 2011)

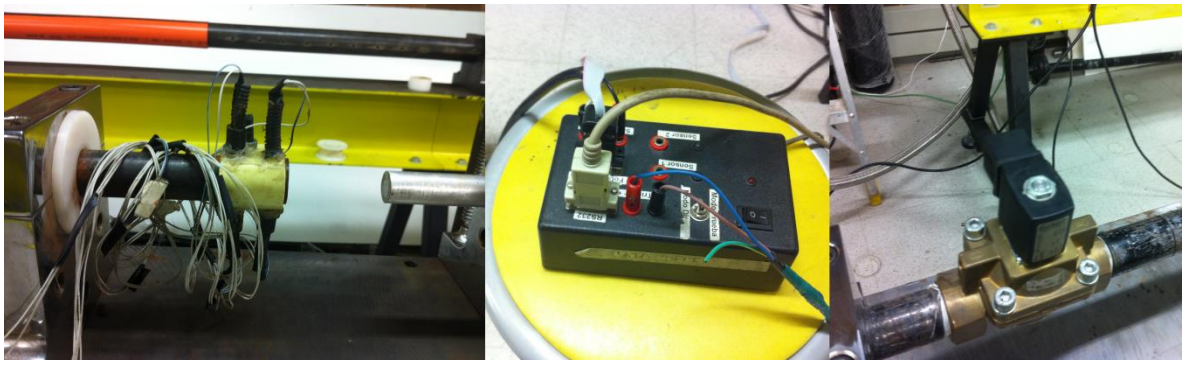

Ilustración 15 3 Foto sensores, caja de control y servo válvula del banco de pruebas

4.3 Manufactura del Compuesto

Las fibras de cabecinegro en matriz de láminas de ácido poliláctico (PLA) se producen utilizando presión a la temperatura de de fusión del PLA. La manufactura se inicia con la extrusión de pellets o pequeñas fracciones del polímero para generar una lámina continua de aproximadamente 11 cm de ancho y 4 mm de espesor en la extrusora. Los pellets son previamente secados durante 3 horas en el horno a una temperatura de 100 °C para la presencia de agua y así evitar la formación de burbujas durante la extrusión del polímero. En la ilustración 16 se observa la lámina continua del PLA el cual será utilizada para manufacturar el compuesto.

Ilustración 16 Secado de pellets de PLA y lámina extruida

A continuación se procede al corte de las fibras del cabecinegro. Se cortan en formas geométricas cuadradas de 10 cm X 10 cm para que no sobrepasen el ancho de la lámina de PLA. El PLA también se corta con dimensiones de 10 cm X 10 cm. Las capas cortadas deben ser previamente secadas para evitar los mismos problemas que se pueden presentar durante la extrusión del PLA. Las láminas del polímero se sitúan en bandejas cubiertas por aluminio para su eliminar su curvatura y así facilitar su apilado con el cabecinegro. El secado se genera por dos horas a una temperatura de 103°C. Inmediatamente después de secarse, las capas se apilan y se cubren con teflón y aluminio para no quemar el cabecinegro durante su prensado.

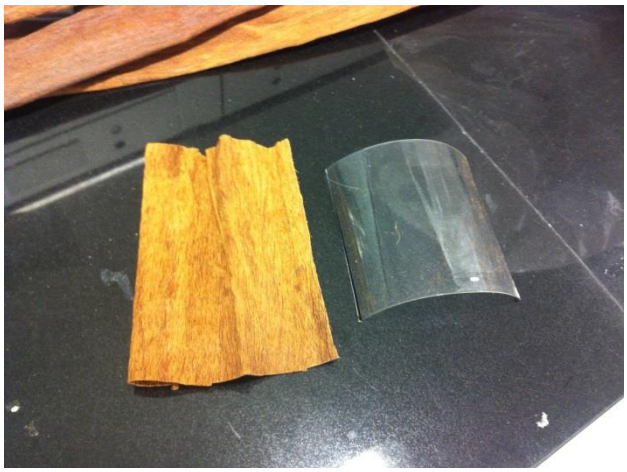

Ilustración 17 Capas de cabecinegro y PLA

Para lograr un bloque de $1in$ de espesor se utilizan 35 capas de cabecinegro y 36 capas de PLA manteniendo siempre que la dirección de las fibras sea la misma que la dirección de extrusión del polímero. En la siguiente tabla se muestra el peso de cada una de las capas utilizadas para el prensado de los bloques.

Tabla 3 Peso y número de capas en cada bloque prensado

	Capas	Bloque 1 (g)	Bloque 2 (g)
PLA	36	85,39	195,16
Cabecinegro	35	81,47	188,87

Se utiliza la prensa y se genera una compresión manual progresiva a medida que aumenta la temperatura interna del bloque, la cual es medida con termopar. Cuando se alcanza el espesor y la temperatura deseada de 160 °C, se mantiene encendida la prensa por un tiempo aproximado de 3 minutos y a continuación se apaga sin desmontar el bloque para evitar un choque térmico que afectaría negativamente las propiedades del compuesto.

Ilustración 18 Bloque del compuesto en prensa Dake

La temperatura medida con el termopar se muestra a continuación. Como se aprecia, el tiempo que tardan los dos bloques en disminuir su temperatura hasta alcanzar los $25\ °C$ son equivalentes y mayores al decrecimiento de la prensa.

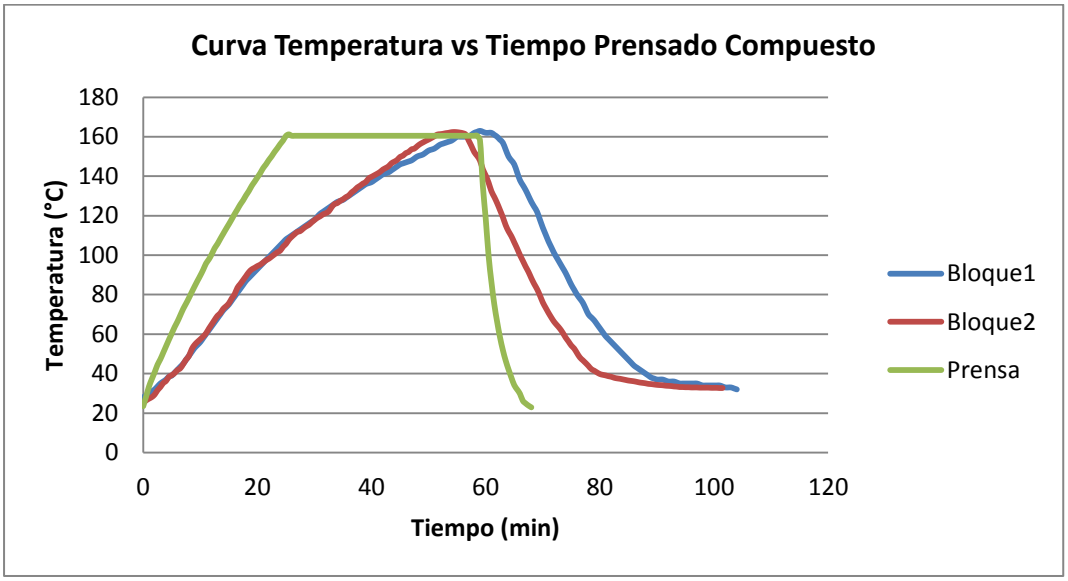

Ilustración 19 Curva de temperatura vs tiempo en el prensado del compuesto

4.4 Maquinado de las probetas

Como el objetivo del proyecto de grado es someter el compuesto a deformaciones unitarias es necesario definir las direcciones que del material. Puesto que posee un comportamiento multidireccional heterogéneo, sus propiedades varían en sus tres direcciones. En el siguiente esquema se muestran las direcciones del material según la posición y dirección de las fibras del cabecinegro:

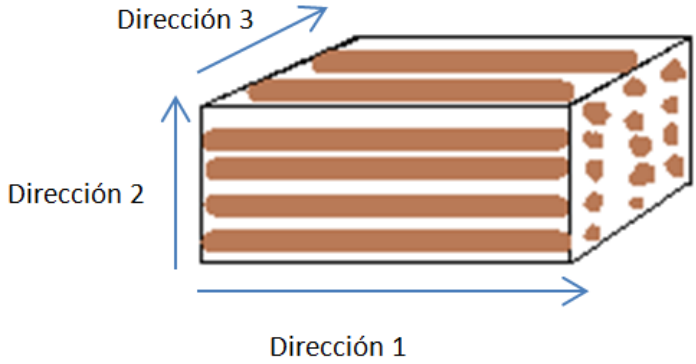

Ilustración 20 Esquema de las direcciones del compuesto

La dirección elegida para generar los ensayos es la dirección #1 es decir, las superficies transversales de las probetas serán perpendiculares a la dirección de las fibras de la palma. El diámetro de las probetas que se someterán en el banco de de pruebas de la barra dividida de Hopkinson deben tener mínimo un 75% del diámetro de las barras del banco de pruebas. Se eligen como dimensiones de las probetas un diámetro de 15 mm y un espesor de 7.5 mm puesto que las barras poseen un diámetro de 19.5 mm.

El bloque del compuesto se corta en secciones de 12 mm de espesor utilizando la sierra sinfín del laboratorio de manufactura ML 027. Las secciones son a continuación refrentadas en el CNC Fadal generando el grosor deseado de 7,5 mm. Con las dos caras refrentadas se procede a maquinar la geometría cilíndrica de las probetas. El CNC utilizando la escariadora de 2 mm genera una interpolación circular a una velocidad de 5000 rpm con un anvance de rampa a 100 mm/min. Al generar el giro de 360 °, el algoritmo detiene el proceso en el CNC para generar la limpieza de la escariadora. Se limpia la escariadora de residuos que el PLA genera sobre la pieza de corte ya que

el polímero se funde y se adhiere evitando un corte limpio del material en la siguiente interpolación.

Ilustración 21 Maquinado de las probetas

Para pulir las probetas y garantizar su geometría cilíndrica, se genera un proceso de refrentado sobre las caras laterales de cada probeta con el torno y se pulen las caras frontales con lijas de 180, 250 y 400 $granos/m^2$.

Ilustración 22 Probetas de fibras de cabecinegro en matriz de PLA

4.5 Alineación de la Barra Dividida de Hopkinson

Antes de obtener resultados finales, es prioritario que la barra incidente se encuentre correctamente alineada con la barra transmitida. La alineación se realiza con las dos barras en contacto sin ningún espécimen o probeta en el medio. Se alinean manualmente los componentes del banco de pruebas que sujeten las barras y se mide su altura con respecto a un punto de referencia evitando de esta manera inclinaciones no deseadas. A pesar de que las barras se encuentren visualmente alineadas, es posible que durante la prueba su trayectoria no tenga la misma dirección generando de esta manera efectos de disipación energética por fricción cuando el pulso se transmite de una barra a otra. La siguiente imagen muestra un pulso el pulso incidente y un pulso transmitido ideal.

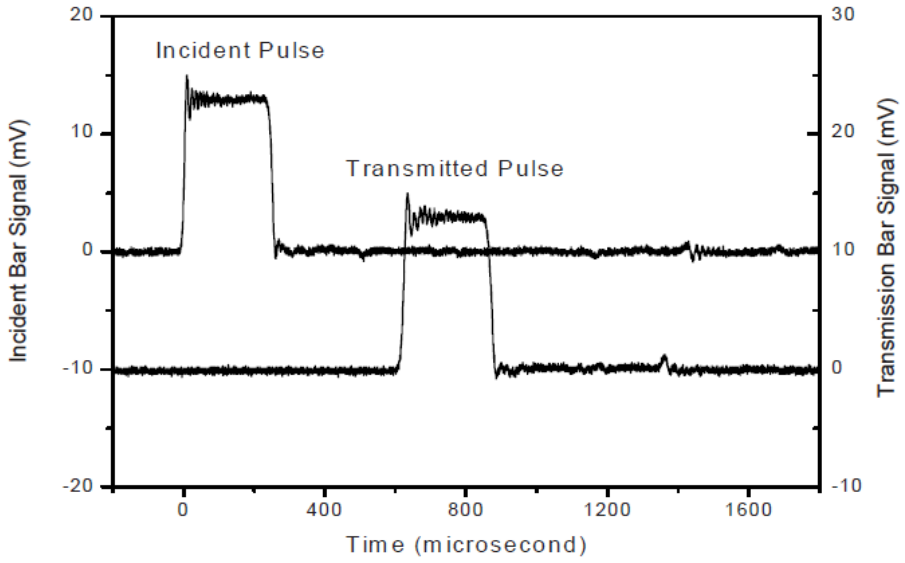

Ilustración 23 Señal ideal de un banco de pruebas alineado (Chen & Song, 2011)

Como se aprecia en la anterior gráfica, el pulso incidente y pulso transmitido poseen una magnitud y un intervalo temporal similar de manera que se disipó la mínima cantidad de energía de una barra hacia otra. En el caso real es muy difícil evitar la disipación de energía debido a que las barras se encuentran sostenidas por distintos componentes que minimizan este efecto mas no lo evitan en su totalidad. Por lo tanto, a pesar de que el banco de pruebas se encuentre correctamente alineado, el pulso incidente no tendrá la misma magnitud que el pulso transmitido.

También se puede observar que la señal ideal de las dos barras alineadas carece de un pulso reflejado hacia la barra incidente. Esta última característica es el parámetro cualitativo de mayor importancia al determinar la correcta alineación de la barra dividida ya que en caso de existir un pulso reflejado, las caras frontales de las barras se encontrarían generando fricción y disipando energía hacia la barra incidente por efectos inerciales, lo cual no es deseable (Forrestal, Wright, & Chen, 2007). Sin embargo, como en el caso de la magnitud de los pulsos incidente y transmitido, la disipación de energía se encontrará presente debido a la alta dificultad de evitar este fenómeno. De manera que se determinó como parámetro de correcta alineación una relación entre la magnitud del pulso incidente y del pulso reflejado menor a un 20%. Después de una serie de ajustes y disparos se logró obtener la siguiente gráfica.

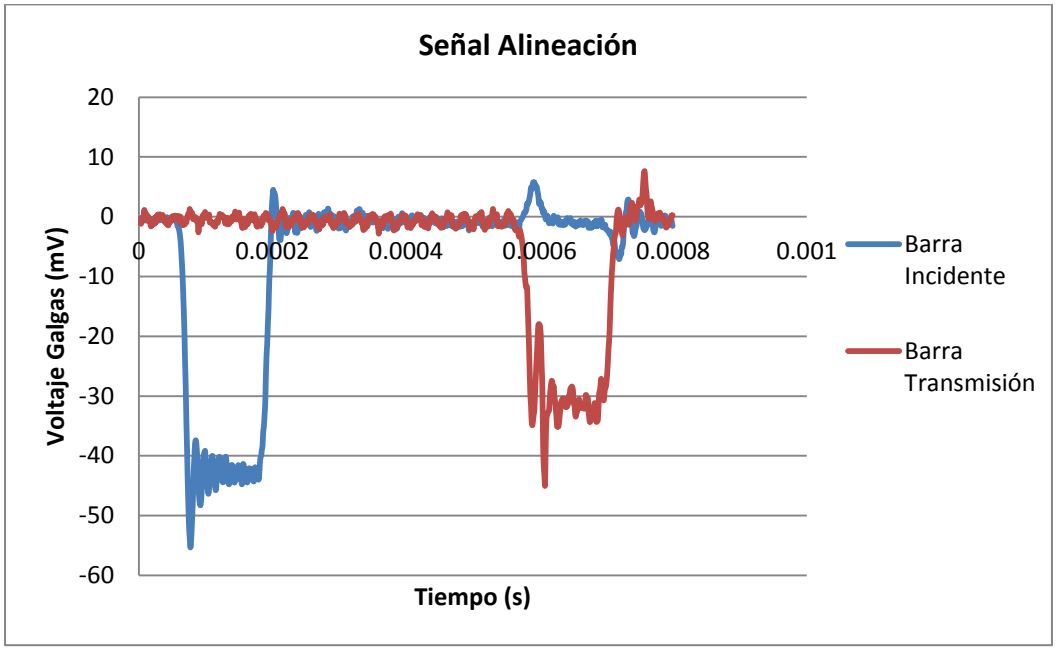

Ilustración 24 Señal del banco de pruebas alineado

$$Relacion\ Pulsos: \frac{Reflajada}{Incidente} = \frac{42mV}{8mV} * 100 = 19.2\% \quad \textbf{(21)}$$

La relación de los dos pulsos como se aprecia, es menor al 20% por le tanto la barrada dividida se encuentra correctamente alineada para su uso en las pruebas con el compuesto.

4.6 Pruebas cuasi estáticas en banco de pruebas Instron

Como se explicó en el marco teórico, es necesario obtener la velocidad del sonido característica del compuesto para obtener su curva de esfuerzo-esfuerzo deformación unitaria a altas tasas de deformación unitaria. La velocidad de sonido del material se define por la siguiente expresión:

$$C_P = \sqrt{\frac{E_p}{\rho_p}} \qquad \textbf{(22)}$$

Donde E_p se define como el módulo de elasticidad de la probeta y ρ_p se define como la densidad de la probeta. Se midió la densidad de todas las probetas maquinadas resultando en un valor promedio de $1056\,\frac{kg}{m^3}$.

Utilizando la norma ASTM D1621 las probetas utilizadas se comprimen a una velocidad de deformación de $0{,}74 \mp 0{,}07\ mm/min.$ (ASTM, 2010) El ensayo se realiza hasta que las probetas alcanzaron una deformación equivalente a $0{,}5\ mm/mm$ ya que solo se necesita observar el comportamiento de la probeta en fase elástica. Se utilizaron 10 probetas para calcular el módulo de elasticidad a compresión del compuesto en condiciones cuasi estáticas:

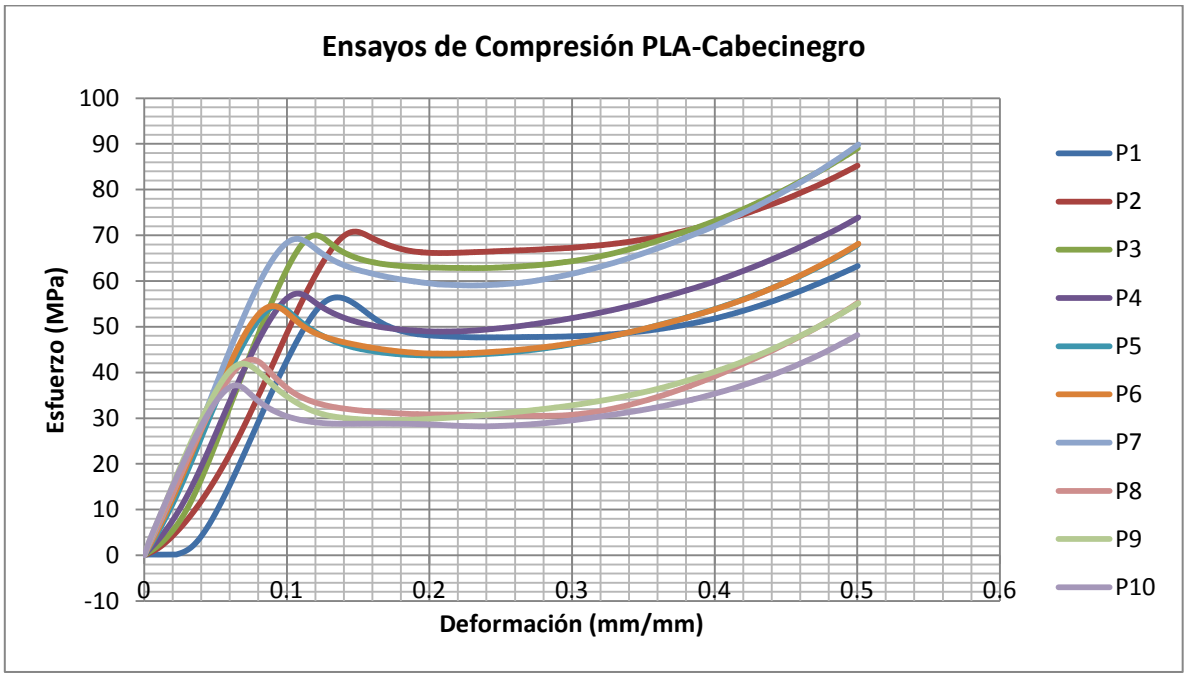

Ilustración 25 Ensayos cuasi-estáticos a compresión en el banco de pruebas Instron

La ilustración 25 muestra una amplia variación en los esfuerzos de fluencias alcanzados en las 10 pruebas realizadas sin embargo se observa una baja variabilidad en la tasa de deformación. Los módulos de elasticidad para cada ensayo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4 Módulos de elasticidad del compuesto en condiciones cuasi estáticas

Probeta #	E (Mpa)
1	530,79
2	371,80
3	557,88
4	561,32
5	670,96
6	696,97
7	747,06
8	696,45
9	756,35
10	741,44
Promedio	**633,10**
Desviación	**124,27**

Como se aprecia el valor promedio hallado es 633,1 MPa. Tomando el valor de densidad anteriormente mencionado se obtiene la velocidad del sonido del compuesto en la dirección 1:

$$C_P = \sqrt{\frac{633{,}10 * 10^6}{1056{,}3}} = 774{,}2 \frac{m}{s} \qquad \textbf{(23)}$$

4.7 Pruebas Preliminares

Se generaron una serie de pruebas en el banco de pruebas para observar y analizar el comportamiento del compuesto sometido a distintas velocidades y tasas de deformación. Estas pruebas se generaron en un rango de velocidades de $8\ m/s$ a $14\ m/s$. Los resultados preliminares arrojaron muestras con el comportamiento similar en los pulsos Incidente, reflejado y transmitido como el que se muestra en la ilustración 26.

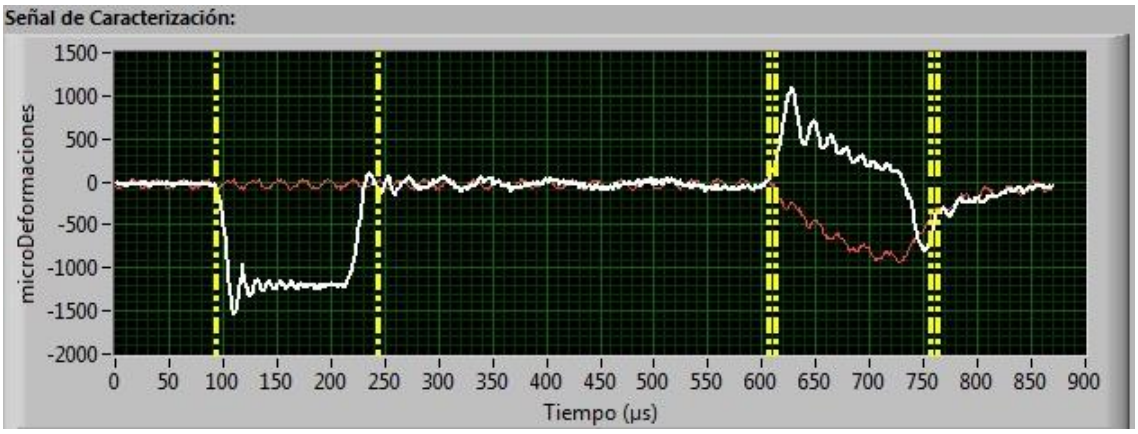

Ilustración 26 Prueba preliminar del compuesto

Como se observa, el pulso incidente posee una geometría cuadrada característica de este tipo de ensayos obtenidos bajo el mismo banco de pruebas sin embargo, los pulsos reflejado y transmitido presentan anormalidades.

El pulso reflejado posee un pico en inicio que decae a medida que transcurre el tiempo. Este comportamiento describe el hecho de que la probeta no posee una tasa de deformación constante por lo tanto, la energía transmitida de la barra incidente no se encuentra deformando el material sino que esta disipando nuevamente tal energía hacia la barra incidente y la de transmisión. Como consecuencia de este fenómeno se producen señales de alta frecuencia en el pulso reflejado o el pico inicial observado en la ilustración 26 (Hao, y otros, 2005)

A pesar de que no se observan mayores efectos de inercia radial en los resultados por efectos radiales ya que la magnitud del pulso incidente y la magnitud de los pulsos reflejado y transmitido son equivalentes así como los intervalos de duración de los tres pulsos, es necesario encontrar una modificación en el proceso experimental. Esta modificación tiene como objetivo modificar la onda incidente de tal forma que se genere una tasa de deformación constante en el pulso reflejado reduciendo las señales de alta frecuencia y en consecuencia, deformar la probeta en su fase plástica.

4.8 Análisis de las Impedancias de las barras y el compuesto

La impedancia acústica de un material es una propiedad intensiva de un material definida como la resistencia que opone su organización micro estructural a la propagación de una onda a través de este. (González España & Jiménez Builes, 2004) . Se define como el producto entre la velocidad del sonido característica y la densidad del material.

$$Z = c * \rho \qquad \textbf{(24)}$$

Se muestra en la siguiente tabla las impedancias de las barras del banco de pruebas y su relación:

Tabla 5 Densidades e impedancias de las barras y el espécimen

	ρ (kg/m^3)	C (m/s)	Impedancia (KPa*s/m)
Aluminio	2810	5070	14246,7
Cabecinegro-PLA	1056,3	774,2	818
		Relación	6%

Como se aprecia, la relación de las entre las impedancias de los dos materiales posee una magnitud mínima. Esto quiere decir que la onda atraviesa por la barra incidente con una cierta resistencia a su fluctuación hasta alcanzar la probeta donde tal resistencia se reduce y el pulso fluctúa libremente. En otras palabras, la energía generada por el impacto del proyectil reduce su intensidad al alcanzar el espécimen aumentando su disipación en la barra de transmisión y nuevamente la barra incidente sin afectar la integridad estructural de la probeta. (Chen, Zhang, & Forrestal, 1999).

La solución que se propone a esta situación es aumentar la relación entre las impedancias de los materiales involucrados en el banco aplicando un dispositivo que permita reducir considerablemente la resistencia del pulso virgen pasa a través de la barra incidente. Este dispositivo se conoce como *Pulse Shaper*.

4.9 Diseño y Manufactura del *Pulse Shaper*

El *pulse shaper* es un dispositivo encargado de modificar las condiciones presentadas en las secciones anteriores. El dispositivo encargado debe poseer como característica principal, un modulo de elasticidad menor al de las barras del banco de pruebas. En la tabla 6 se muestran los módulos de los materiales metálicos que pueden ser aptos para el acondicionamiento de las pruebas del compuesto y son asequibles en el mercado nacional:

Tabla 6 Módulos de elasticidad de metales candidatos del *pulse shaper*

Material	Modulo Elasticidad (GPa)
Estaño	30,6
Plomo	14,0
Magnesio	44,0

De los metales mostrados se elige el estaño ya que a pesar de que el plomo tenga un menor módulo, el estaño no es tóxico al ser fundido y posee una mayor facilidad de maquinar debido a su menor dureza. Se adquirió como material para el dispositivo, una aleación de estaño y plata utilizada principalmente para soldadura de componentes eléctricos 95.5 Sn-3.5-Ag. Las propiedades del material fueron dadas por el proveedor DISOL S.A.S:

Tabla 7 Propiedades mecánicas del estaño

Material	95.5 Sn-3.5 Ag
Módulo Elasticidad (GPa)	26,2
Módulo Tangencial (GPa)	17
ρ (kg/m^3)	7290
Coeficiente Endurecimiento (MPa)	29,1

Para obtener la dimensiones óptimas del *pulse shaper* se utilizó y modificó el código de simulación realizado por el estudiante de doctorado Camilo Hernández en el software de elementos finitos ANSYS LS-DYNA el cual simula el experimento realizado en el banco de pruebas y obtiene la curva incidente al aplicarle un *pulse shaper* con unas determinadas dimensiones. Las modificaciones realizadas al código original fueron la adecuación de las barras de aluminio y la inserción del *pulse shaper* incluyendo el modelo de plasticidad bajo el que se rige el comportamiento del estaño. Como modelo de plasticidad se eligió basándose en estudios previos el Ramberg-Osgood el cual

depende del coeficiente de endurecimiento y la tasa de deformación inicial a la que se somete el material. (Pang, Xiong, & Che, 2004) (Pang J. H., 2012)

$$\sigma = k\epsilon^{m}\dot{\epsilon}^{n} \qquad \textbf{(25)}$$

Donde k es la constante del material, m es el coeficiente de endurecimiento y n coeficiente de sensibilidad de la tasa de deformación. Tomando valores teóricos encontrados en la literatura y de la ficha técnica de la aleación, se utilizan los siguientes parámetros para la simulación:

Tabla 8 Coeficientes del modelo Ramberg-Osgood del estaño

Coeficiente	
k	55
m (MPa)	29,1
n	3,5
ε	100

La simulación se programó con el proyectil a una velocidad equivalente de $16\ m/s$ y se realizó un barrido de 4 a $5{,}6\ mm$ para el radio y de 2 a $4{,}1\ mm$ para el espesor del *pulse shaper* obteniendo así una serie de gráficas como de la ilustración 27:

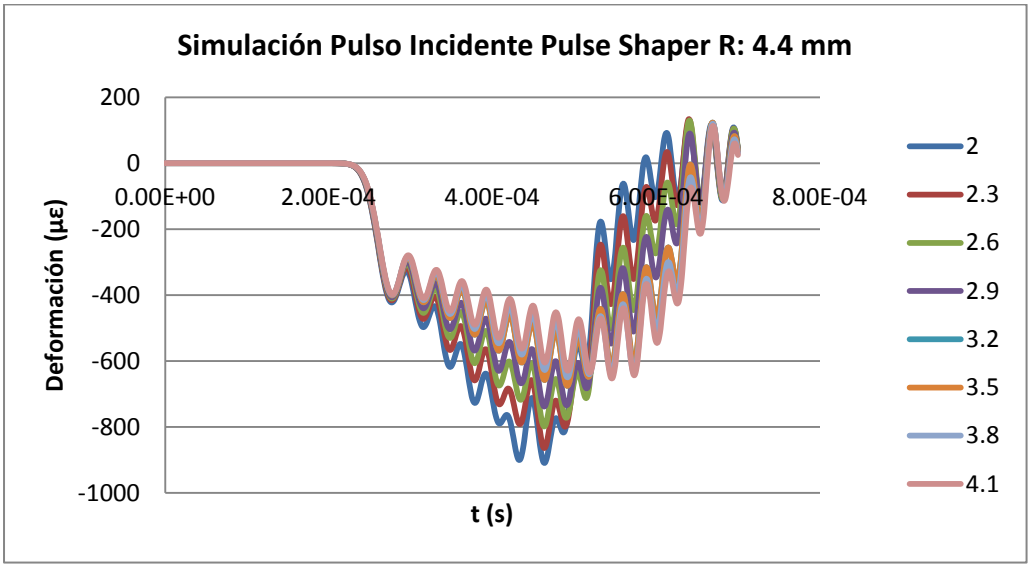

Ilustración 27 Simulación del pulso incidente con un *pulse shaper* de radio: 4,4 mm y un espesor de 2 a 4.1 mm

Observando el comportamiento de la gráfica se observa que la geometría del pulso incidente varia con respecto a los resultados preliminares. Esta suavización de la curva del pulso en el inicio por

los resultados en trabajos previos, genera la estabilización del pulso reflejado. Las dimensiones elegidas para las pruebas finales son de $4{,}4\ mm$ de radio y $2{,}6\ mm$ de espesor ya que mantienen un valor similar al de las micro deformaciones de las pruebas a una velocidad equivalente y eliminan las altas frecuencias del pulso incidente mas no disipan la energía aplicada por el proyectil.

El estaño utilizado para manufacturar los *pulse shapers* se funde utilizando el proceso de OGW (Oxygen Gas Welding) donde se utiliza gas oxiacetilénico. Se utiliza un molde de acero 1020 como el que se muestra en la ilustración 28. El molde consiste de dos placas las cuales fueron maquinadas en conjunto para generar el orificio de $3/8$" y aproximadamente $7\ cm$ de profundidad. El estaño fundido se introduce en los orificios y se deja enfriar el molde hasta alcanzar temperatura ambiente.

Ilustración 28 Moldeo del estaño para su maquinado en el torno

Con las barras de estaño se procede al maquinado el cual se efectúa en el torno Harrison V390 del laboratorio ML 027. Primero se tornea el contorno del cilindro hasta obtener el diámetro deseado y seguido se secciona el cilindro con el espesor calculado. Las superficies de los *pulse shapers* se les pule la superficie utilizando una lija de $1200\ granos/m^2$.

Ilustración 29 Maquinado en torno del estaño

5 Resultados

Con las modificaciones generadas en el banco de pruebas aplicando el *pulse shaper* se realizan las pruebas finales. Inicialmente se realizó un barrido de velocidades entre $10\,m/s$ y $18\,m/s$ para analizar la velocidad máxima a la cual el compuesto sufrirá una deformación plástica apreciable sin presenciar grietas ni fracturas en la integridad estructural del espécimen. A partir de estas pruebas se determinó que la velocidad máxima a la cual se realizarán las pruebas es de $16\,m/s$ con una presión de $15{,}3\,psi$ en disparador de aire comprimido. Un total de 10 pruebas se realizaron midiendo en cada una, el esfuerzo máximo que alcanzo el espécimen al deformarse y la tasa a la cual la probeta se deforma unitariamente. En las siguientes gráficas se presentan para cada una de las 10 pruebas realizadas los pulsos incidentes, reflejados y transmitidos:

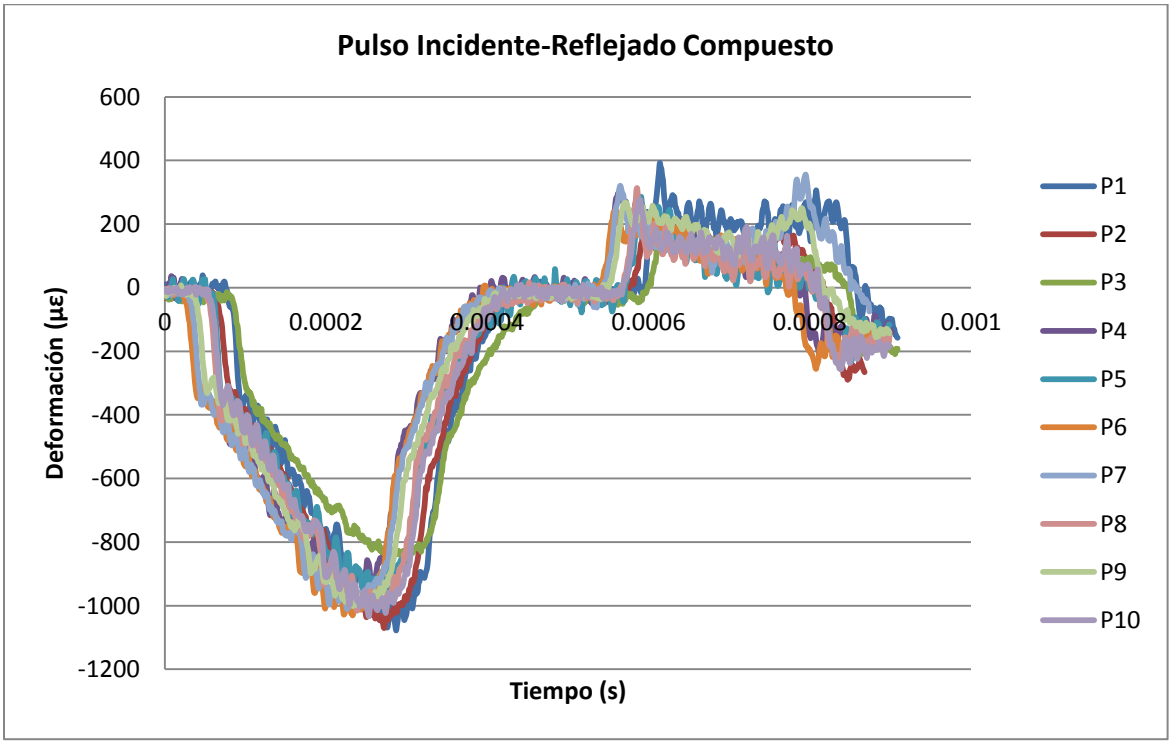

Ilustración 30 Pulso incidente y reflejado de los ensayos en la barra dividida

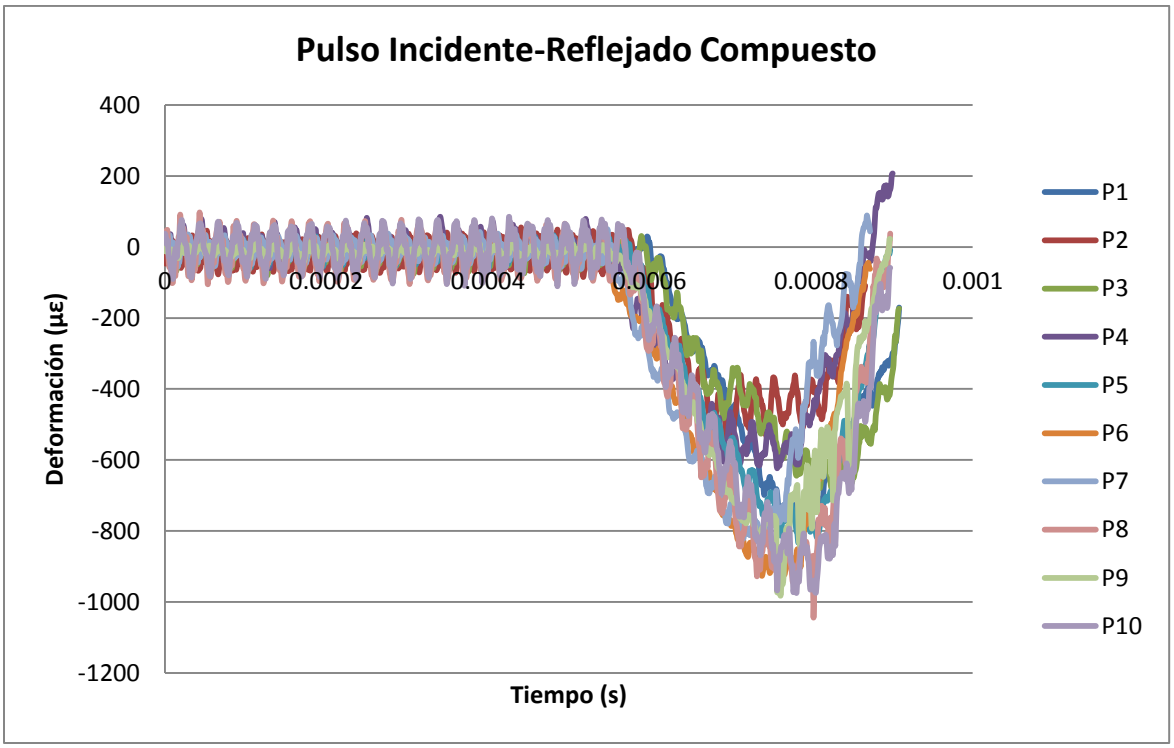

Ilustración 31 Pulso transmitido de los ensayos en la barra dividida

Como se aprecia, el pulse shaper modifica drásticamente la forma del pulso incidente y el pulso reflejado de los 10 experimentos realizados. El pulso incidente ya no posee una geometría cuadrada y en cambio, se observa que el pulso virgen generado por el impacto del proyectil en el banco de pruebas modificado posee el mismo comportamiento obtenido en las simulaciones. En consecuencia, se genera una mayor estabilización del pulso reflejado logrando de esta manera una tasa de deformación constante.

Existe una baja variabilidad en los pulsos incidentes y reflejados sin embargo, el pulso transmitido de las 10 probetas varia ampliamente en su magnitud por lo tanto se pueden observar valores entre las 400 y las 900 microdeformaciones. Este fenómeno se presenta debido a que el compuesto de fibras naturales es heterogéneo o en otras palabras, no posee una micro estructura definida ya que las fibras de la palma a pesar de tener un patrón de dirección definido, no son de carácter rectilíneo. El proceso de manufactura garantiza que las capas de las fibras del compuesto se encuentren alineadas en el patrón longitudinal de las fibras mas no evita la presencia fibras las cuales posean ángulos de inclinación con respecto a la dirección 1.

Con los pulsos generados se obtienen las curvas de esfuerzo-deformación a altas tasas de deformación de la siguiente gráfica.

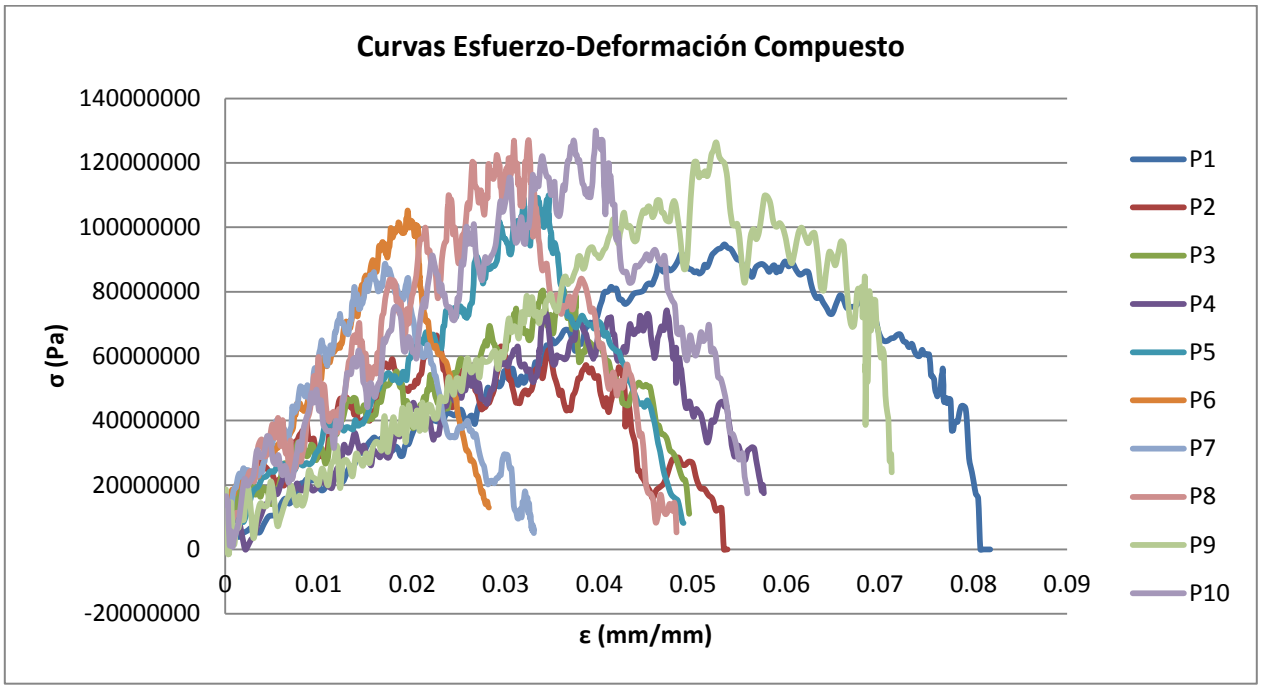

Ilustración 32 Curvas esfuerzo-deformación unitaria de los ensayos en la barra dividida

Como consecuencia del carácter heterogéneo del compuesto se observa como en los pulsos transmitidos, una alta variabilidad en la deformación y el esfuerzo máximo que sufre cada espécimen. Sin embargo, los resultados muestran un patrón en la forma de las curvas arrojadas el cual se evidencia en un comportamiento que puede dividirse en tres fases.

La primera fase de la curva muestra una deformación lineal proporcional al esfuerzo aplicado con una pendiente determinada la cual varía de un espécimen a otro. La segunda fase muestra una estabilización de la curva alcanzando un valor máximo y luego inicia un decrecimiento en el esfuerzo aplicado a medida que la deformación aumenta el cual se toma como la tercera fase de la curva.

En la tabla 9 se muestra el esfuerzo máximo y la tasa de deformación promedio de cada uno de los ensayos realizados. La variación mostrada en el pulso transmitido por efectos del tipo de material que se está caracterizando refleja la variabilidad de los esfuerzos máximos alcanzados y las tasas de deformación.

Tabla 9 Esfuerzo máximo y tasa de deformación de los ensayos del compuesto en la barra dividida

Probeta #	σ max (MPa)	Tasa ε (s^-1)
1	94,7	256,3
2	66,5	185,1
3	80,5	160,0
4	74,2	191,9
5	109,9	158,0
6	105,2	147,8
7	88,7	159,7
8	127,1	155,6
9	126,4	229,8
10	130,0	180,0
Promedio	**100,3**	**182,4**
Desviación	**23,1**	**35,5**

Para efectos de comparación de las propiedades obtenidas con un material utilizado en la industria , se realizaron 4 pruebas utilizando ácido poliláctico en estado puro. Se replicaron las condiciones del experimento utilizando las mismas dimensiones geométricas en la probeta, se utilizó el *pulse shaper* y se aplicó la misma velocidad de disparo ($16\,m/s$). A continuación se muestran las curvas obtenidas de los ensayos, los esfuerzos máximos alcanzados y las tasas promedio de deformación.

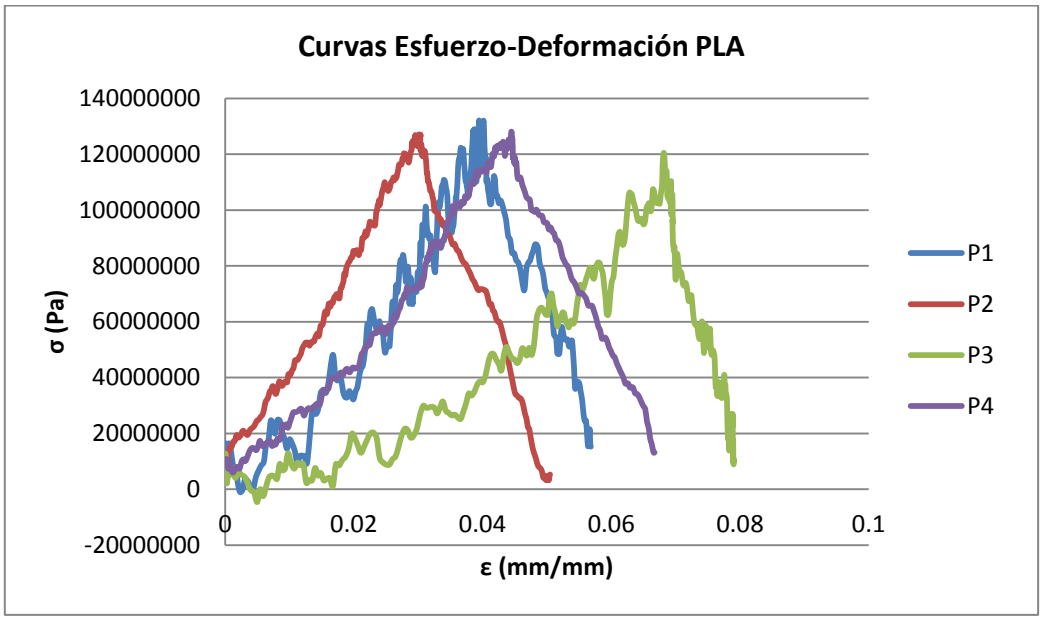

Ilustración 33 Curvas de esfuerzo-deformación unitaria de PLA

Tabla 10 Esfuerzo máximo y tasa de deformación promedio del PLA

Probeta #	σmax (Mpa)	Tasa ε (s^-1)
1	132,1	177,5
2	127,1	157,7
3	120,5	239,4
4	128,1	202,1
Promedio	**126,9**	**194,2**
Desviación	**4,8**	**35,2**

Con los resultados obtenidos del ácido poliláctico, se observan diferencias entre los valores obtenidos y la forma de la curva con respecto a los ensayos del compuesto. Las curvas obtenidas del ácido poliláctico, a pesar de poseer variabilidad en su tasa de deformación tienen un comportamiento similar con dos fases claramente distinguibles. La primera fase como en los resultados del compuesto, es una relación lineal entre la deformación y el esfuerzo aplicado hasta alcanzar un esfuerzo máximo sin una previa estabilización como ocurre en cabecinegro y PLA. La segunda fase de la curva consta de un decrecimiento lineal del esfuerzo conforme la deformación aumenta después de alcanzar el esfuerzo máximo.

El PLA en estado puro posee un mayor carácter homogéneo que el compuesto lo cual se refleja en la desviación estándar del esfuerzo máximo de la tabla 10. Mientras que en el compuesto se alcanza una desviación de 23,1 MPa, en el PLA la desviación se reduce a 4,8 MPa. El esfuerzo máximo también aumenta en el caso del PLA con respecto al compuesto. Mientras en el PLA se observa un esfuerzo máximo promedio de 120 MPa, en el compuesto se observa una magnitud promedio de 100,3 MPa.

6. Conclusiones

Con los resultados analizados se concluye que las propiedades del PLA en estado puro presentan una mayor resistencia a altas tasas de deformación unitaria. Este fenómeno es generado debido a que las fibras de la palma en la dirección analizada no refuerzan la matriz como en la dirección 2 o 3 donde las fibras se someterían a flexión generando una mayor resistencia a compresión de la matriz de PLA.

A pesar de que se estandarizó el proceso de manufactura y se redujo el error aleatorio al utilizar el CNC como herramienta de maquinado para las probetas, la variabilidad de los resultados seguirá siendo un factor que afecta al análisis del comportamiento del compuesto no solo altas tasas de deformación unitaria sino en condiciones cuasi estáticas. Las fibras naturales a pesar de poseer un patrón en su dirección, no son en un 100% paralelas a la dirección que se estudió. Es posible mejorar este patrón de alineación sometiendo las capas de cabecinegro a tensión para reorganizar a nivel micro estructural la fibras en la dirección 1 pero serían necesarios estudios de los cambios en la integridad estructural de las fibras cuando se someten a este pre acondicionamiento.

El comportamiento de las fibras varía drásticamente en condiciones cuasi estáticas y en condiciones dinámicas. Como se observa en la ilustración 25, el compuesto presenta un comportamiento característico de un polímero dúctil con una fase elástica, una relajación de los esfuerzos después de alcanzar fluencia y un clara zona de plasticidad. En cambio, a altas tasas de deformación unitaria el compuesto se comporta como un polímero de carácter frágil.

La modificación del banco de pruebas aplicando un *pulse shaper* mejoró la relación de las impedancias entre el compuesto y el aluminio. Sin embargo, el *pulse shaper* no solo afecta el pulso incidente por el tipo de material que se compone sino también por sus dimensiones de manera que es necesario hallar un diámetro y un espesor óptimo para cada velocidad que se aplique en los futuros ensayos.

7. Trabajos futuros y recomendaciones

Con la información obtenida es posible iniciar en trabajos futuros el análisis del modelo constitutivo que rige el comportamiento del compuesto a altas tasas de deformación unitaria. Este modelo es posible hallarlo utilizando el método de problemas inversos donde se ajustan los parámetros de un modelo existente al comportamiento de las curvas obtenidas. Es necesario que el modelo escogido tenga en cuenta la variabilidad que los compuestos con fibras naturales generan en los resultados.

Se recomienda revisar la robustez de los componentes de la barra principalmente, los componentes electrónicos como los foto sensores y las galgas ya que durante el desarrollo del proyecto estos componentes fallaron en repetidas ocasiones generando retrasos imprevistos en el cronograma.

Uno de los factores aleatorios que afectaron los resultados fue la presencia de ruido sobretodo en la galga de la barra de transmisión. Según testimonios, este ruido se debe a un campo electromagnético presente en el edificio donde se encuentra la barra dividida a generado por una serie de dispositivos eléctricos. Por lo tanto, se recomienda encontrar una forma de aislar el banco de pruebas y así minimizar el ruido presente en los resultados futuros.

Bibliografía

Acosta, C. (2013). *Caracterización de la respuesta a compresión de un material compuesto de fibras naturales sometido a altas tasas de deformación unitaria, utilizando Split Hopkinson Pressure Bar.* Bogotá: Universidad de Los Andes.

ASM. (2000). *Metals Handbook - Mechanical Testing and Evaluation* (Vol. 8). Materials Park, OH: ASM International.

ASTM. (2010). *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics D1621 – 10.* West Conshohocken: ASTM International.

ChemVista.net. (14 de Mayo de 2014). *Synthesis of Polylactide (PLA): PLA resin Production*. Obtenido de http://polylactide.chemvista.net/Polylactide_commercial-Production.html

Chen, W. W., & Song, B. (2011). *Split Hopkinson (Kolsky) Bar, Design, Testing and Applications.* London: Springer.

Chen, W., Zhang, B., & Forrestal, M. J. (1999). A Split Hopkinson Bar Technique for Low-Impendance Materials. *Experimental Mechanics, 39*(2), 81-85.

Forrestal, M. J., Wright, T. W., & Chen, W. (2007). The effect of radial inertia on brittle samples during the split Hopkinson pressure bar test. *International Journal of Impact Engineering, 34*(3), 405–411.

Francisco, M. C. (2011). *Análisis de la sostenibilidad de la fibra de cabecinegro: una mirada desde los procesos productivos y culturales de la comunidad indígena wuanana de san antonio de Togoromá, Choco.* Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

González España, J. J., & Jiménez Builes, J. A. (2004). *El uso de la impedancia acústica para el monitoreo de procesos industriales.* Medellin: Universidad Nacional.

Hao, X., Gai, G., Lu, F., Zhao, X., Zhang, Y., & Liu, J. (2005). Dynamic mechanical properties of whisker/PA66 composites at high strain rates. *Polymer*, 3528–3534.

Hull, D. (1981). *An introduction to composite materials.* Cambridge: Cambridge University Press.

Kolsky, H. (1949). *An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading* (Vol. 62). Londres: Dover.

Llano, F. G. (2011). *Diseño y Contrucción de una máquina para pruebas de tensión dinámica de materiales usando el métodod de SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar).* Bogotá: Universidad de los Andes.

Oksman, K., Skrifvars, M., & Selin, J.-F. (2003). Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites. *Composites Science and Technology*(63), 1317–1324.

Palmiers, F. d. (20 de mayo de 2014). *Palmieres de Guyane*. Obtenido de http://fousdepalmiers.fr/html/forum/viewtopic.php?f=30&t=6038

Pang, J. H. (2012). *Lead Free Solder: Mechanics and Reliability.* New York: Springer.

Pang, J. H., Xiong, B. S., & Che, F. X. (2004). Modeling Stress Strain Curves For Lead-Free 95.5Sn-3.8Ag-0.7Cu Solder. *5th. Int. Conf. on Thermal and Mechanical Simulation and Experiments in Micro-electronics and Micro-Systems* (págs. 449-453). Nanyang: EuroSim.

REL. (23 de junio de 2014). *High Strain Rate Testing*. Obtenido de http://www.relinc.net/testing/high-strain-rate-testing/

Saheb, N. (19 de Mayo de 1999). Natural Fiber Polymer Composites: A Review. *Advances in Polymer Technology, 18*(4), 352-363.

Uribe, A. G. (2011). *Implementación del dispositivo de barra Hopkinson para obtener la resistencia mecánica de materiales sometidos a altas tasas de deformación.* Bogotá: Universidad de los Andes.