



Profiles from Henequen Fibres with High-Density Polyethylene Matrix

Perfiles a partir de fibras de henequén con matriz de polietileno de alta densidad

M.Sc. Daniel Díaz-Batista^I, Ing. Walter Saint Blancard-Valdés^I, Dr. Victor Bridi-Tellez^{II}, M.Sc. Martha Mazorra-Mestre^I, Dr. José Luís Valin-Rivera^{III}, Dr. Francisco Rolando Valenzuela-Díaz^{IV}, Dr. Hélio Wiebeck^{IV}

^I Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Facultad de Ingeniería Mecánica, Marianao, La Habana, Cuba.

^{II} Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Laboratório de Estudos de Reciclagem e Residuais. (LAREX), Butantã, São Paulo/SP, Brasil.

^{III} Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Ingeniería Mecánica, Chile, Quilpué, Valparaíso, Chile.

^{IV} Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais São Paulo/SP. Brasil.

ABSTRACT. A process to obtain profiles from henequen (*Agave fourcroydes Lem.*) fiber reinforced high-density polyethylene (HDPE) matrix composite material by extrusion method is presented. Data on thermal stability and microstructural features of the henequen fibers used are presented. Behavior of material in process and its influence on mechanical properties are analyzed. A comparison between obtained material and another currently in production and incorporating wood particles from pine sawdust (*Pinus sp.*) as reinforcing element is exposed. Tensile strength of henequen fiber reinforced composites ranges from 12 to 15 MPa, slightly lower than the one obtained from wood particle reinforced composite material. Nevertheless, the impact strength and Young's modulus values double the ones obtained with pine's particles reinforcement. Characterization of both materials obtained and process, it allowed to both identify elements related to differences on tensile strength and propose processing alternatives to allow introducing henequen fibers.

Keywords: lignocellulose fiber, composite, thermoplastic, henequen, polyethylene.

RESUMEN. Se presenta el proceso de obtención de perfiles a partir de material compuesto con matriz de polietileno de alta densidad (PEAD) y reforzado con fibras cortas de henequén (*Agave fourcroydes Lem.*) por el método de extrusión. Se exponen datos acerca de la estabilidad térmica y rasgos microestructurales de las fibras de henequén utilizadas. Se analiza el comportamiento del material en el proceso tecnológico y su influencia en el comportamiento mecánico. Se compara el material obtenido, con otro actualmente en producción y que incorpora como elemento reforzante partículas de madera provenientes del aserrado de pino (*Pinus sp.*). La resistencia a la tracción de los compuestos reforzados con la fibra de henequén, oscilan entre 12 y 15 MPa, ligeramente menor que la del material con partículas de madera, pero los valores de resistencia al impacto y módulo de elasticidad duplican los obtenidos con las partículas de pino. La caracterización de los materiales obtenidos y del proceso permitió identificar elementos causantes de las diferencias en la resistencia y proponer variantes al proceso para que pueda trabajarse con fibras de henequén.

Palabras clave: fibras lignocelulósicas, material compuesto, termoplástico, henequén, polietileno.

INTRODUCTION

Finding alternatives to produce means to connect production processes on farming areas with the corresponding users in cities, evolving productive poles, all across the country settlements or even agroindustry, encourages logistics systems to be kept in constant development. Ac-

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de alternativas frente a la necesidad de disponer de envases y demás elementos materiales para conectar los procesos productivos del área agrícola y los correspondientes usuarios, tanto en zonas urbanas como en áreas de desarrollo especial, comunidades o hasta la propia agroindustria, demanda

ording to the necessity of communities to count on more products, those means or elements have a higher demand, so it becomes more and more necessary focusing our attention on how efficiently we use the raw materials and products involved on its manufacture. Assessment of material life cycle allows keeping track of how efficiently we take profit from them as natural resource, but aspects involving environmental impact should also be taken into account. It can be expressed through evaluation of its environmental life cycle. Lignocellulosic fiber reinforced thermoplastic matrix composite materials can bring some solutions to some segments of the market.

Although boom in scientific literature about this thematic began about fifteen years ago, it has been steadily appearing up to the present as result of intense work (Pickering *et al.*, 2015). Diversity in sources of lignocellulosic fibers has motivated new work in some geographical areas and much attention has been paid to mitigate the problem of compatibility between fibers and thermoplastic matrices (Cabral *et al.*, 2005; Avérous y Le-Digabel, 2006; Muñoz-Velez *et al.*, 2014; Díaz-Batista *et al.*, 2015).

Taking profits of lignocellulose available in Cuba, as reinforcements in thermoplastic matrices has been studied for a little more than a decade using fibers such as sugarcane bagasse (Bermello, Díaz *et al.*, 2008, Brown 2011). Sawdust as forestry by product has also been introduced in composite preparation with this kind of matrix as part of the technology transfer processes and now a research is in course to take profits of secondary streams of henequen's fiber extraction process (Díaz-Batista *et al.*, 2015). Works with henequen fibers, not in Cuban context, are reported since decade of 1990, in Mexico, with teams that keep on working until now (May-Pat *et al.*, 2013).

Material design, from taking or preparing some fraction of fibers has been studied and remains focused and fibers with good aspect ratio and even quite short are prepared (Motaung *et al.*, 2015), works that are being followed closely mostly searching for a clear path among properties vs cost ratio, technology accessibility or means creation feasibility. Henequen fibers have been valued on its generic aspect and even interfaces, but material design remains underexplored. We can find works of a high scientific value that make the basis to go ahead solidly in this area, shedding light about important parameters like essential work of fracture for reinforcements receiving different surface treatments (May-Pat *et al.*, 2013), works that continue former studies. Taking many of present work into practice is still a pending task.

Degradation of Lignocellulosic material have been studied in more detail in relation to materials that involve heating and cooling cycles on their preparation (TabkhPaz *et al.*, 2013).

Varieties of agaves formerly less taken into account for the quality of their fibers (*A. angustifolia*, *A. salmiana*, *A. tequilana* y *A. lechuguilla*) are now receiving more attention of researchers to take profit of their characteristics, to save other natural resources and generate less waste (Jiménez-Muñoz *et al.*, 2016). At this work, any incidence of post

del aparato logístico un constante desarrollo. Dada la elevada necesidad de flujo de productos, estos elementos presentan una gran demanda, por lo que se hace necesario dirigir la atención al uso eficiente de las materias primas y materiales empleados en su obtención. El análisis del ciclo de vida del material permite conocer la eficiencia de su aprovechamiento como recurso natural, en cambio, aspectos relacionados con el impacto ambiental deben ser también tenidos en cuenta. Esto se expresa a través del análisis de su ciclo de vida ambiental. Los materiales compuestos de matriz termoplástica reforzados con fibras lignocelulósicas pueden aportar soluciones para algunos segmentos del mercado.

A pesar de que el auge en la publicación de trabajos en esta temática comenzó hace unos quince años, se ha continuado trabajando con intensidad (Pickering *et al.*, 2016). Debido a la diversidad de opciones, en cuanto a las fuentes de material lignocelulósico, se continúa trabajando en el aprovechamiento de fibras de interés en determinadas regiones geográficas y en la propuesta de opciones para mitigar el problema de la compatibilidad entre la fibra y la matriz (Cabral *et al.*, 2005; Avérous y Le-Digabel, 2006; Muñoz-Velez *et al.*, 2014; Díaz-Batista *et al.*, 2015).

El aprovechamiento de los materiales lignocelulósicos disponibles en Cuba, como refuerzo en matrices de termoplástico, viene siendo estudiado hace algo más de una década con el uso de fibras tales como el bagazo de caña (Bermello *et al.*, 2008; Brown, 2011). Los residuos del proceso en aserraderos también han sido introducidos en la elaboración de compuestos, con este tipo de matriz, como parte de la transferencia tecnológica y ahora se trabaja para aprovechar corrientes secundarias del proceso de extracción de las fibras de henequén (Díaz-Batista *et al.*, 2015). Trabajos con fibras de henequén, en matriz de termoplástico, fuera del contexto de Cuba, se remontan a la década de 1990, en México, con grupos que se mantienen trabajado hasta el presente (May-Pat *et al.*, 2013).

El diseño del material, a partir de la selección o preparación de una determinada fracción de fibra ha sido estudiado y continua siendo objeto de atención, se preparan fibras con buena esbeltez e incluso pequeñas longitudes (Motaung *et al.*, 2015) trabajos que se vienen siguiendo con atención principalmente buscando el camino claro para abrirse paso entre la relación propiedades vs costo y accesibilidad tecnológica o posibilidad de creación. Las fibras de henequén han sido valoradas en su aspecto genérico y hasta en el estudio de sus interfases aunque las variantes de diseño de material han sido un poco menos estudiadas. Se encuentran trabajos de alto valor científico que sientan pautas para avanzar sólidamente en este sentido con la determinación de parámetros importantes como el trabajo involucrado en la fractura, para diversos tratamientos superficiales a la fibra (May-Pat *et al.*, 2013), trabajos que dan continuidad a estudios anteriores. La puesta en práctica con resultados económicos en los procesos productivos es una tarea aún pendiente.

Los procesos degradativos del material lignocelulósico han sido estudiados y con mayor detalle en tiempos recientes en que aplicaciones vinculadas a la obtención de materiales en que un ciclo de calentamiento y enfriamiento se verifica en el proceso de preparación de los mismos (TabkhPaz *et al.*, 2013).

Varietades de agaves que antes eran menos tenidas en cuenta por la calidad de sus fibras (*A. angustifolia*, *A. salmiana*, *A. tequilana* y *A. lechuguilla*) comienzan a ser estudiadas para aprovechar sus características en función de ahorrar otros recursos naturales

harvesting handling on thermal stability and processability at selected temperatures are valued.

This is work aimed at showing how we can take profit of henequen fibers and high-density polyethylene (HDPE) to enhance properties of a material used in manufacturing containers to deliver greengroceries, holding elements for storage or post harvesting treatment and pallets, among other applications. Showing behaviour of henequen fibers along the stage of mixing with thermoplastic polymer along the processing to obtaining composite material and alternatives taken to overcome issues that were hindering optimum product quality.

By its way of use, components produced using this composite play a structural role in some extent, so a proper design of material used for its production and its thorough evaluation becomes a requirement. E. Bodros (Bodros *et al.*, 2007) published an interesting article where shows that natural fibers are not anymore something out of context in structural applications. Results comparable to those obtained with thermostable matrices and other reinforcements can be reached. It is important to keep an eye on those applications on which temperature rise could be an element of risk. In production of greengrocery containers, this kind of material has among other advantages, a greater endurance, less interaction with products to be transported and its recyclability (Beg and Pickering 2008, Zborowski and Canevarolo 2012, TabkhPaz *et al.*, 2013).

METHODS

Materials

In preparation of materials to obtain profiles were employed henequen (*Agave Fourcroydes Lem.*) fibers grade A supplied by henequen obtaining enterprise “Antonio Berdayes” with main facilities at Limonar, Matanzas, Cuba. Processing of fiber at this facility consist of, defibration of leaves with separation of skin, juice and parenchyma, simultaneously with a slight washing. Fibers are then dried by direct exposition to sunlight for some days and finally baled to be commercialized.

This pilot-scale test was made at one of the lines of the profile and pallets production facility of enterprise “Emilio Bárcenas”, La Lisa, Havana, Cuba where currently are obtained profiles using sawdust wood particles, from pines (*Pinus sp.*). Those particles are obtained from sawing processes at Pinar del Rio province, west of Cuba. All particles involved in this study were characterized morphologically.

In composite preparation were used the same additives currently used in preparation of MC formulated with wood particles at this facility. As matrix it was used High Density Polyethylene (HDPE) PADMEX 56035 (melt index: 0.35 g/10 min, density: 0.956 g/cm³) supplied by PEMEX, Mexico. As additives were used: Chlorinated Polyethylene (Beijing Rosa International Trading Co., China), Zinc Stearate (Beijing Rosa International Trading Co., China), Calcium Stearate (Beijing Rosa International Trading Co., China), Calcium Carbonate (NC-795-2010, MINEM, Cuba), Titanium Dioxide (Beijing

y generar menos desechos (Jiménez-Muñoz *et al.*, 2016). En este trabajo se valora paralelamente si los tratamientos post cosecha han ejercido algún efecto que reduzca la estabilidad térmica y aptitud del material fibroso preparado para ser utilizado en el proceso de elaboración del compuesto a las temperaturas escogidas.

El objetivo de este trabajo es mostrar el aprovechamiento de las fibras de henequén (*Agave Fourcroydes Lem.*), con el uso de polietileno de alta densidad (PEAD) en el mejoramiento de las propiedades de un material que se emplea en la fabricación de envases para el traslado de productos agrícolas, elementos de sostén, almacenamiento temporal y en la elaboración de paletas empleadas en la manipulación de dichos productos, entre otras aplicaciones. Se persigue además, mostrar el comportamiento de las fibras de henequén, en su proceso de mezclado con el polímero termoplástico, durante el proceso de preparación del material compuesto y las alternativas tomadas para superar las dificultades que impedían la obtención de un material de óptima calidad.

Por su forma de uso, los componentes elaborados con este compuesto cumplen en gran medida una función estructural por lo que un diseño apropiado del material empleado así como una evaluación de estos es un imperativo. E. Bodros (Bodros *et al.*, 2007) publicó un interesante trabajo donde se muestra que las fibras naturales no son ya algo fuera de contexto en las aplicaciones estructurales y combinando método y diseño del material se ha podido alcanzar resultados comparables con los obtenidos con polímeros termofijos y otros refuerzos. Es importante considerar también aquellas aplicaciones estructurales donde la temperatura pueda ser un elemento de riesgo. En la obtención de envases para productos agrícolas este tipo de material presenta, entre otras ventajas, una mayor durabilidad, una menor interacción con los productos que se transportan y es reciclable (Beg y Pickering, 2008; Zborowski y Canevarolo, 2012; TabkhPaz *et al.*, 2013).

MÉTODOS

Materiales

En la preparación de materiales para la obtención de perfiles se emplearon fibras de henequén grado A suministradas por la empresa henequera “Antonio Berdayes” radicada en Limonar, provincia de Matanzas, Cuba. El proceso de obtención de fibra en esta fábrica consiste en: Desfibrado de las hojas con separación de la corteza, jugo y tejido parenquimatoso, simultáneamente con un lavado ligero. Las fibras, después de separadas, son secadas al sol, por varios días y finalmente empacadas para ser comercializadas.

En la instalación industrial utilizada para esta prueba, Fabrica de y Perfiles y Paletas de la Empresa Emilio Bárcenas, Lisa, La Habana, Cuba, se producen perfiles utilizando partículas de madera, de pino (*Pinus sp.*). Estas partículas se obtienen del proceso de corte en los aserraderos, en la provincia de Pinar del Rio, Cuba. Tanto las partículas obtenidas por corte de la fibra de henequén, como las de madera, fueron caracterizadas desde el punto de vista morfológico.

En la preparación de los materiales compuestos se utilizaron los mismos aditivos que se empleaban en la preparación del MC formulado con incorporación de partículas de madera en la mencionada fábrica: Como matriz se empleó el polietileno de alta densidad

Rosa International Trading Co., China), and halogen-free fire retardant ZB-2335 (99%) (ZB-99), (Richem International, Shanghai, China).

Material preparation methods and equipment

To carry out this test, baled fibrous material was progressively separated into groups with an acceptable amount of fibers to allow its handling, while cutting with a manual guillotine. It was placed a reference to obtain discontinuous fibers ranging from 6 to 8 millimeters. This length is slightly shorter than reported critical length although always there are some particles that surpass 8 millimeters, that is the estimated as critical minimum, from studies carried out with polyolefins (Díaz-Batista *et al.*, 2015), but dispersion is inherent to every preparation process. Designing this material, selection of fiber length had a constraint on diameter of openings on pelletizing extrusion die that are 5 millimeters and there were no other.

After having all fibers cut, they were mixed in a vertical drum mixer having a blade stirrer on bottom, the same mixer used in process to prepare composite material reinforced with wood particles. The result of this attempt to process was a material with clumps or fiber aggregates having powdered additives inside but unable to accept the HDPE pellets at the interior, thing that it was thought could be solved with the intensity of mixture process inside the extruder. Preparation process was carried out on the twin conical counter-rotating screw extruder (Model 80, manufactured by ITI Technology, Shanghai, P. R. of China) (Figure 1), having a die consisting of a circular plate 40 mm thick, having 182 holes of 4 mm in diameter. Each hole has a conical input to provide a soft reduction in section at the input path. In that step, it was observed the inability of spindle-to-barrel or spindle-to spindle shearing to break the fiber aggregates and allow obtaining a homogeneous mass leaving the extruder through the pelletizing die. Finally, it was necessary to break manually the aggregates at the same time they were being fed into the extruder and the pelletizing die was removed. The system setup was 250 min⁻¹ at screws and 160, 190 and 200 degrees Celsius, successively, without pelletizing die. Resulting mass leaving extruder was partially fragmented by hand tools and afterwards the material was reduced in size by a milling machine with a device specially adapted to solve this situation. In Figure 2 it can be seen the differences between the material with clumps (a) and material well mixed (b) both obtained leaving the extruder.

After obtaining material, it was taken to the molding process in a conical counter-rotating twin-screw extruder (Model 65, manufactured by ITI Technology, Shanghai, P. R. of China), where profiles with molds in the form of I were produced. Initially, the machine was set to 3 min⁻¹ at screws and 160, 160, 155 degrees Celsius, successively and 135 degrees Celsius at the die. Finally, screw speed was stabilized at 6 min⁻¹ due to the lower density of this fibrous material, even after pre-mixed.

(PEAD) PADMEX 56035 (Índice de fluidez: 0,35 g/10 min, densidad: 0,956 g/cm³) fabricado por la firma PEMEX (México). Como aditivos en ese proceso se utilizaron: Polietileno clorinado (Beijing Rosa International Trading Co., China), Estearato de zinc (Beijing Rosa International Trading Co., China), Estearato de calcio (Beijing Rosa International Trading Co., China), Carbonato de calcio (NC-795-2010, MINEM, Cuba), Dióxido de titanio (Beijing Rosa International Trading Co., China), y el retardador de llama libre de halógeno ZB-2335 (Richem International, Shanghai, China)

Métodos de preparación de materiales y equipos

Para esta prueba, el material fibroso empacado se separó progresivamente en grupos, con una cantidad aceptable de fibras que permitiera su manipulación, para ser cortadas con una cizalla manual. Se colocó una referencia en el corte para obtener fibras discontinuas con una longitud en el entorno de los 6 a 8 mm. Esta longitud es ligeramente menor a la crítica aunque siempre hay partículas que quedan con una longitud mayor a los 8 mm, que es la estimada como crítica mínima en estudios realizados con poliolefinas (Díaz-Batista *et al.*, 2015), esto debido a que el corte es un proceso que, como toda elaboración, tiene una dispersión. La selección de la longitud de las fibras en el diseño de este material compuesto estuvo restringida por la limitante de 5 mm de las aberturas del dado de la extrusora con que se contaba para producir el material compuesto y su salida en forma de gránulos.

Después de cortadas las partículas de henequén se realizó un proceso de mezclado con el polímero y el resto de los aditivos, en una mezcladora de tanque vertical con agitador en el fondo, la misma que se estaba utilizando para mezclar los componentes en ese paso del proceso, en la preparación del MC reforzado con partículas de madera. El resultado de este proceso arrojó un material con agrupaciones de fibra con presencia de los aditivos en forma de polvo en su interior pero con gran dificultad para la entrada del polímero, cosa que se pensó podía ser solventada con la intensidad del proceso de mezcla en la extrusora. El proceso de preparación se llevó a cabo en la extrusora, de dos husillos contra rotantes cónicos (Modelo 80, fabricada por ITI Technology, Shanghai, R. P. China) (Figura 1). En ese paso se comprobó la dificultad para la ruptura de las aglomeraciones de fibra y para su salida por las aberturas del dado o molde de salida. Finalmente se procedió a romper manualmente las aglomeraciones en el proceso de carga de la extrusora y se retiró el molde de salida. Se trabajó con 250 min⁻¹ en el husillo, con temperaturas de 160, 190 y 200 grados Celsius, sucesivamente, sin molde. La masa resultante a la salida de la extrusora se fragmentó parcialmente de forma manual y posteriormente se redujo a partículas mediante fresado en un dispositivo especialmente creado para resolver esta situación. En la Figura 2 se puede observar la diferencia entre el material con aglomeraciones (a) y el material correctamente mezclado (b) obtenido a la salida de la extrusora.

Después de obtenido el material, este se pasó al proceso de moldeo, con extrusora de dos husillos contra rotantes cónicos (Modelo 65, fabricada por ITI Technology, Shanghai, R. P. China), donde se produjeron los perfiles con molde en forma de I. Inicialmente se trabajó a una velocidad de 3 min⁻¹ con temperaturas de 160, 160, 155 y 135 grados Celsius en el Molde. Finalmente se estabilizó la velocidad de alimentación

In weighing, industrial-scale models were used, with appreciation of 1 gram to achieve an error of less than 1%.

en 6 min^{-1} debido a la menor densidad de este material fibroso, incluso después de premezclado.

En el pesaje se utilizaron balanzas de uso industrial con apreciación de 1 g para un error menor del 1%.

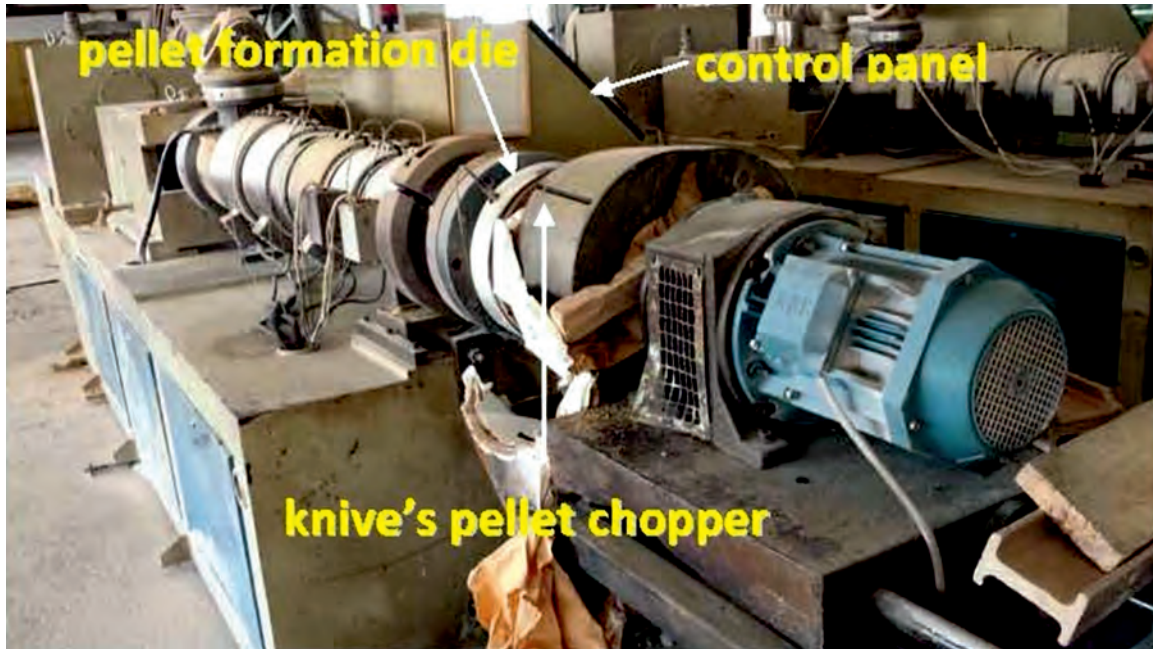


FIGURE 1. Extruder Model 80, used in composite preparation.

FIGURA 1. Máquina extrusora Modelo 80, empleada en la preparación de los compuestos.

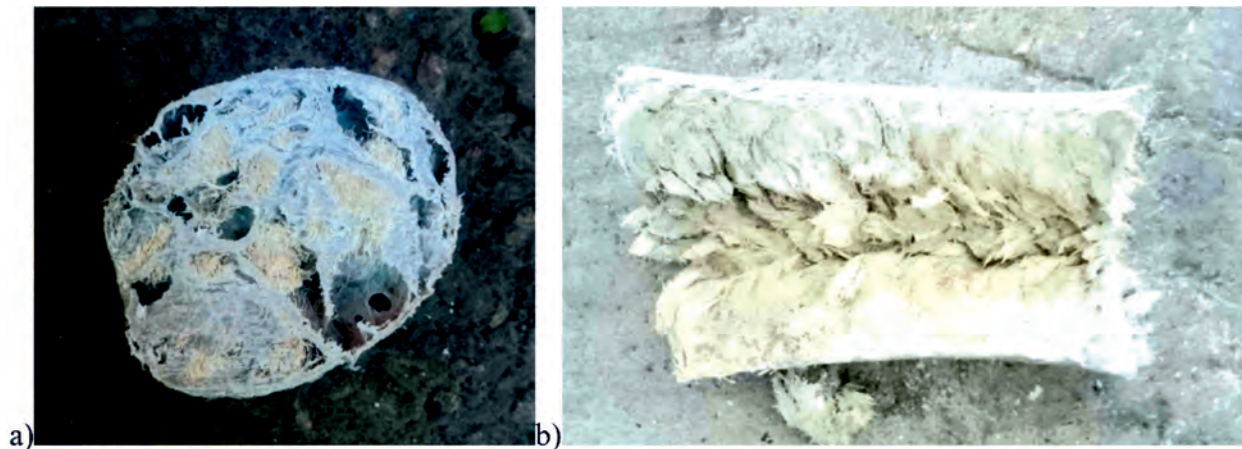


FIGURE 2. Material obtained at the extruder outlet, after taking out the pelletizing die. a) Material with aggregates, from mixing process

b) Material obtained after breaking aggregates, before entering the extruder.

FIGURA 2. Material obtenido a la salida de la extrusora, después de retirar el molde de obtención de gránulos. a) Material con aglomeraciones del mezclado.

b) Material en el que se rompieron las aglomeraciones antes de entrar a la extrusora.

Equipment and Methods to Characterize Materials

In disperse phase characterization, especially to determine its reinforcing ability, a sampling and a statistical processing were carried out to identify which of the geometrical parameters of each fibrous material could have more influence on mechanical behavior. In the case of the henequen fibers, a sampling was carried out, as it is appreciated in the Figure 3d, e y f) their longitude and apparent diameter (D_{ap}) were measured. A difference between the last one and the equivalent diameter obtained from the actual area of traverse section of fiber is observed, but

Métodos de caracterización de materiales y equipos

Para la caracterización de la fase dispersa, en cuanto a su carácter reforzante, se realizó un muestreo y procesamiento estadístico analizando cuáles de los parámetros geométricos de esa fase podía tener mayor influencia en el comportamiento mecánico. En el caso de las fibras de henequén (Figura 3d, e y f), se midió su longitud y su diámetro aparente (D_{ap}), nótese la diferencia entre este y el diámetro equivalente, que se obtiene a partir del área real de la sección de la fibra pero se utiliza en cálculos de mayor precisión como la evaluación

used in calculations that are more precise, as in evaluation of interphase shear strength and in obtaining fiber tensile strength values (Díaz-Batista *et al.*, 2015). Apparent diameter is measured from the visible width of fiber observed when it lays down horizontally on optical microscope slide. Wood sawdust fibers, that could be better called particles because of their very low aspect ratio, were sampled and three dimensions of them (A, B and C) were measured (Figure 3a, b y c). The greatest was taken as length, the following on decreasing order, was taken as width and the smallest was taken as thickness.

de la resistencia al corte interfacial y la resistencia mecánica de la fibra (Díaz-Batista *et al.*, 2015). El diámetro aparente se toma a partir del ancho visible de la fibra observada cuando descansa horizontalmente sobre el porta-objetos del microscopio óptico. A las fibras de madera aserrada (Figura 3a, b y c), que se debieran mejor denominar partículas ya que no son muy esbeltas, se les midió tres dimensiones, A, B y C; de estas, la mayor se consideró la longitud, la siguiente, en orden decreciente, se le denominó ancho y a la menor se le denominó espesor.

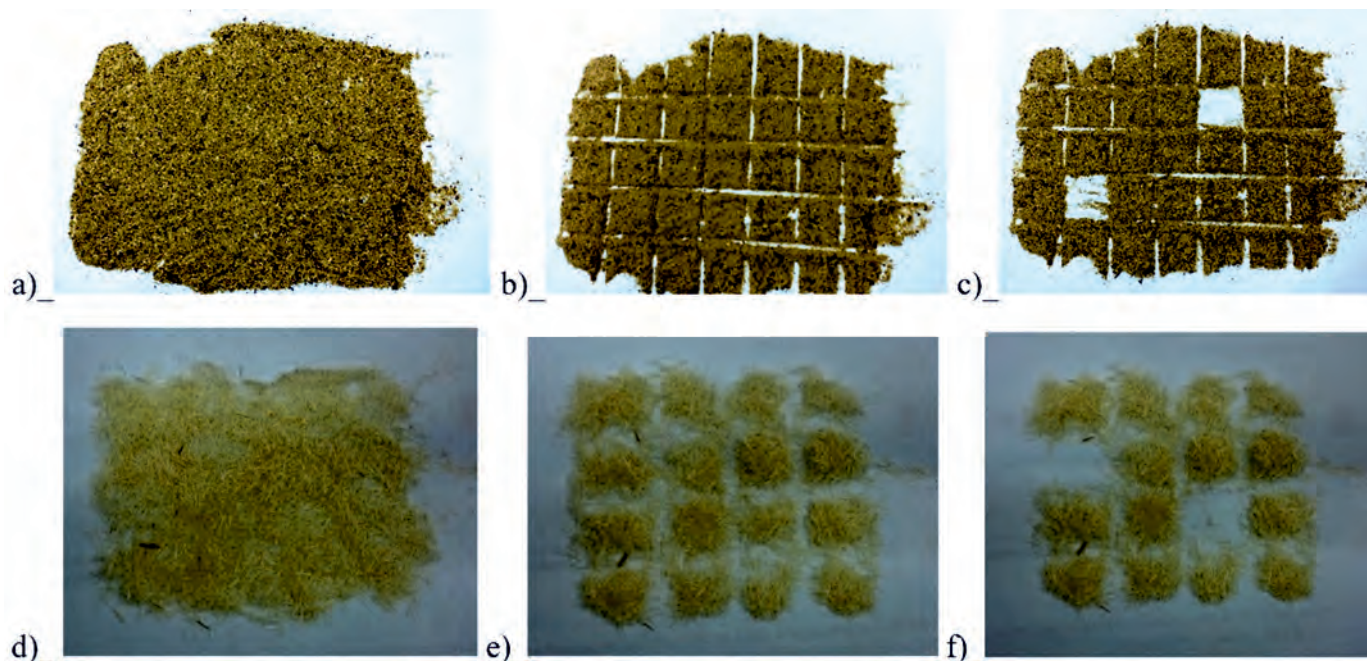


FIGURE 3. Sampling wood derived fibrous material a), b) y c) and henequen fibers d), e) y f), both used in the process.
 FIGURA 3. Muestreo del material fibroso de madera a), b) y c) y el de henequén d), e) y f) utilizado en el proceso.

Measurements of particle geometry were made using the microscope stereo (Model NTB-2B, market brand Novel, (P. R. of China), incorporating a scale-containing eyepiece. The whole system was verified by means of a standard reference with $d=0.01$ millimeters. Data were pre-processed using software Microsoft Excel and then analyzed statistically using software Statgraphics Centurion Version 16. Some data were post-processed using MS Excel again.

Photo from Scanning Electron Microscopy (SEM) of henequen fiber was taken with electron microscope JEOL Model JSM 6510 SEM. Sample was PVD metalized with gold

Previous thermal stability analysis of henequen fiber was done using an STA 449 “Jupiter” simultaneous thermal analyzer from NETZSCH, Germany. Test were performed using argon as purge gas and correction to compensate purge gas flow. Data were post processed using software “Proteus”, also from NETZSCH.

Linear measurements like length, width and thickness of composite samples were made with digital caliper manufactured by Truper, $d=0.01$ millimeter.

In the mechanical behavior characterization of the materials obtained, a universal tensile testing machine Tes-

Las mediciones de la geometría de las partículas se efectuaron con el microscopio estéreo Modelo NTB-2B, Marca Novel (R.P. China), provisto de ocular graduado, el cual fue verificado mediante patrón con apreciación $d=0,01$ mm. Los datos fueron pre-procesados mediante el programa Microsoft Excel, analizados estadísticamente mediante el programa Statgraphics Centurión Versión 16. Algunos de los datos fueron post-procesados mediante Microsoft Excel.

La foto de microscopía electrónica de barrido (MEB) de la fibra de henequén fue tomada con el microscopio electrónico JEOL modelo JSM 6510 SEM. La misma se preparó con metalización PVD en oro.

El análisis previo de estabilidad térmica de la fibra de henequén se realizó empleando el equipo STA 449 “Jupiter” de la firma NETZSCH, Alemania, en atmosfera de argón y corrección para compensar el flujo de gas de purga. Los datos fueron post-procesados con el software “Proteus”, también de la firma NETZSCH.

La mediciones lineales, longitudes, ancho, espesores de las muestras de material compuesto se realizaron con el pie de rey digital de la firma Truper con apreciación $d=0,01$ mm.

En la caracterización del comportamiento mecánico de los materiales obtenidos se utilizó una máquina de ensayos universal Testometric AX Rochdale. Modelo: DBBMTCL con celda de 50

tometric AX Rochdale was used. It was Model: DBBMTCL with load cell of 50 kN and extensometer, manufactured in United Kingdom. One of the objectives of this study included analyzing behavior of henequen fibers along the molding process, their flow and reorganization ability after mechanical work that takes place among screws, barrel and crossing extrusion die. To achieve this, samples were taken to profiles on different directions (0; 45 and 90 degrees) and zones (core and flanges of the obtained I beam). Some of the samples did not reach the length prescribed by ASTM D3039 (ASTM 2008), but sections contained, in excess, the representative elementary volume (REV).

Impact tests were made by the Charpy method, on a test rig PSd 50/15 manufactured by Heckert, Germany, having a pendulum to achieve an impact energy of 50 Joule. Tests were made as prescribed in ASTM D6110 (ASTM 2010).

RESULTS AND DISCUSSION

In general, wood particles used originally in the process to obtain those profiles, presented a length similar to its width and thicknesses showed lower values. Then reinforcing potential of those particles depends more on length vs thickness, or upper area (length x width) vs thickness ratio, than on length vs apparent diameter ratio, therefore, comparison between the two kinds of disperse phase were made considering that. Since the number of particles measured for each sample is different, data were normalized for allowing comparison to take effect. Then on integrating histogram (Figure 5) those are the ratios selected and showed (l/Dap y $l/thickness$), both in relation to the percent of fibers having such value. For a first approach, frequency histograms of length for both wood particles (Figure 4a) and henequen fibers (Figure 4b) are showed below. Superiority in length of henequen fibers prepared for this test can be seen, although those fibers are still shorter than critical lengths reported for those fibers interacting with polyolefin matrices (Díaz-Batista *et al.*, 2015).

kN, equipada con extensómetro, fabricada en Reino Unido. Para la preparación de las muestras y análisis de resultados se utilizó la norma ASTM D3039. Uno de los objetivos del estudio incluyó analizar el comportamiento de las fibras de henequén en el proceso de moldeo, su fluidez y reorganización a partir del trabajo mecánico que se realiza entre los husillos, el tubo y el paso por el molde, por lo que se tomaron muestras a los perfiles en varias direcciones (0; 45 y 90 grados) y zonas (alma y alas de la viga I obtenida). Algunas de estas muestras no tenían las dimensiones en longitud exigidas por ASTM D3039 pero se tomaron secciones que contenían, con creces, el volumen elemental representativo (VER).

Los ensayos de Impacto se realizaron por el método Charpy, en una aparato PSd 50/15 de la firma Heckert, de Alemania, con un péndulo para una energía de impacto de 50 Joule. El procedimiento seguido fue el de la norma ASTM D6110.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De forma general las partículas de madera utilizadas originalmente en la obtención de estos perfiles presentaron una longitud similar al ancho y los espesores fueron los que presentaron un valor más bajo por tanto el carácter reforzante de estas partículas depende más de la relación longitud vs espesor o de la relación área superior (longitud x ancho) vs espesor, que de la relación longitud vs diámetro aparente y en base a eso se realizó la comparación entre los dos tipos de fase dispersa. Toda vez que el número de partículas medidas para cada muestra es diferente, se normalizaron los datos para poder hacer la comparación y en el histograma integrador (Figura 5) lo que se grafica son las relaciones seleccionadas: (l/Dap y $l/espesor$) ambas respecto al porciento de fibras que tiene ese valor. Para hacer una primera aproximación se muestran a continuación los histogramas de frecuencia para las longitudes en el caso de las partículas de madera (Figura 4, a) y de las fibras de henequén (Figura 4, b) donde se puede observar la superioridad, en cuanto a longitud, de las fibras de henequén preparadas para esta prueba, no obstante se encuentran aún por debajo de la longitud crítica reportada para estas fibras en matrices de poliolefinas (Díaz-Batista *et al.*, 2015).

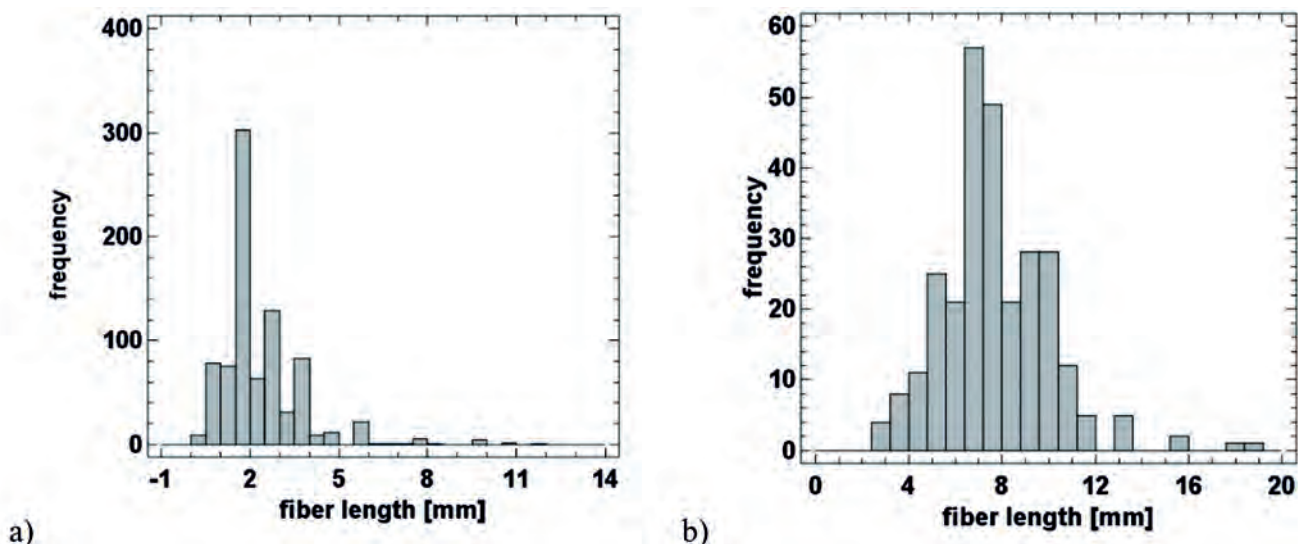


FIGURE 4. Histograms with particle length distribution on a) wood and b) henequen samples.
 FIGURA 4. Histogramas con la distribución de tamaños de partícula en las muestras de madera a) y de henequén b).

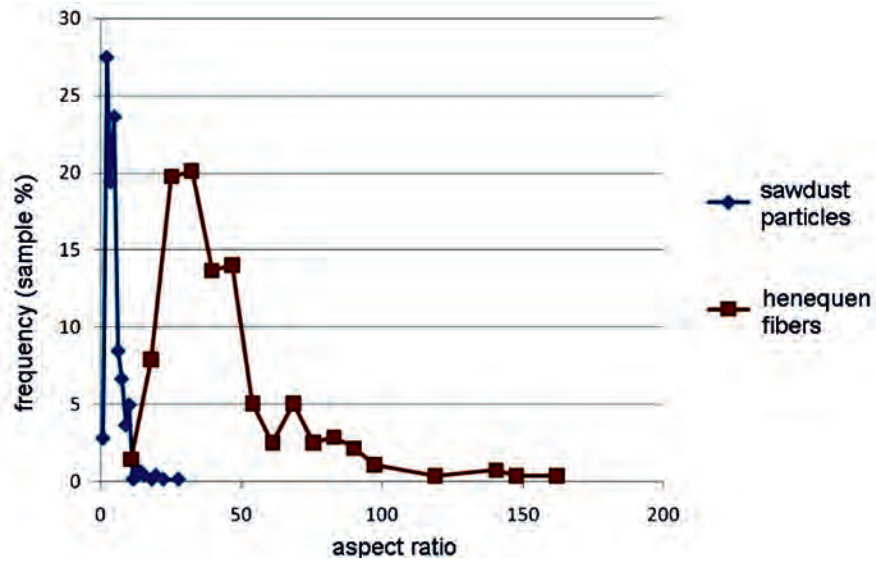


FIGURE 5. Integrating histogram of aspect ratio for wood and henequen particles prepared for this test (frequency values for both samples were normalized).

FIGURA 5. Histograma integrador de la esbeltez para las partículas de madera y de henequén preparadas para esta prueba (los valores de frecuencia de ambas muestras fueron normalizados).

Microstructural and Physical Features of Henequen Fibers

Favorable behaviors shown by henequen fibers interacting with polyolefin matrices (Díaz-Batista *et al.*, 2015) can be related to their irregular surface and form, factors acting as surface tension relievers despite chemical differences. In Figure 6, it can be seen a SEM photomicrograph of the henequen fiber. Even when, high magnification was not used, some perspective of relationship among fiber's microstructure, its strength and surface features described.

Características físicas y microestructurales de las fibras de henequén

Los comportamientos favorables presentados por las fibras de henequén vinculadas a las matrices de poliolefinas (Díaz-Batista *et al.*, 2015) se deben a que, a pesar de tener poca afinidad desde el punto de vista químico, presentan una superficie llena de configuraciones que favorecen el agarre mecánico unido a los factores generadores de tensión superficial que dependen de la forma. En la Figura 6 se observa una fotografía tomada mediante MEB donde, a pesar de no haberse utilizado grandes aumentos puede apreciarse con alguna perspectiva la relación entre la microestructura de la fibra y su fortaleza así como los rasgos de la superficie antes descritos.

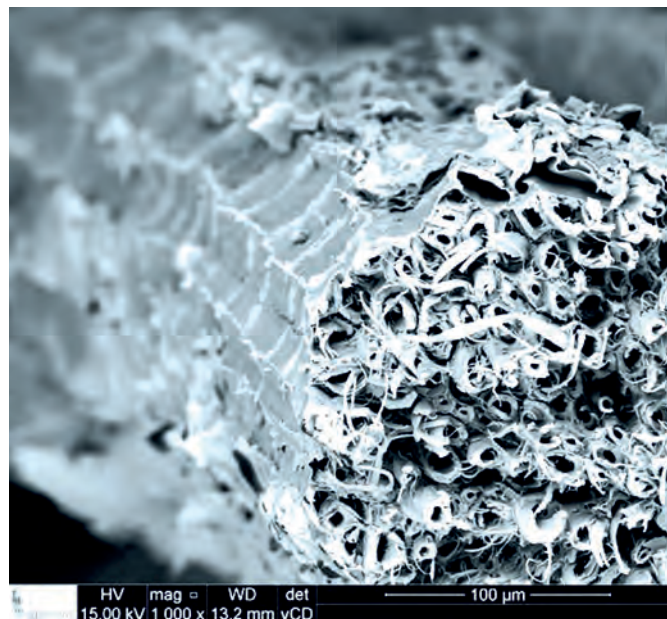


FIGURE 6. Morphology of cross section and lateral surface of fiber of henequen (A. Fourcroydes) (MEB photograph, at 1000X).

FIGURA 6. Morfología de la sección transversal y superficie lateral de una fibra de henequén (A. Fourcroydes) (Foto con MEB, tomada a 1000X).

Post harvesting treatment applied to henequen fiber has not affected its thermal stability, beginning degradative processes at temperatures above the ones used in current process, not surpassing 200 degrees Celsius (see Figure 7). It can also be seen in molded profiles where the typical color of henequen fiber (white to softly yellowish) has not been lost.

El tratamiento post cosecha aplicado a la fibra de henequén utilizada no ha deteriorado su resistencia a la temperatura, iniciándose procesos degradativos a temperaturas superiores a las utilizadas en el proceso, que no rebasan los 200 grados Celsius (Figura 7). Esto también puede ser corroborado en los perfiles moldeados donde el color blanco tendiendo al amarillo muy tenue, típico de la fibra del henequén, no se ha perdido.

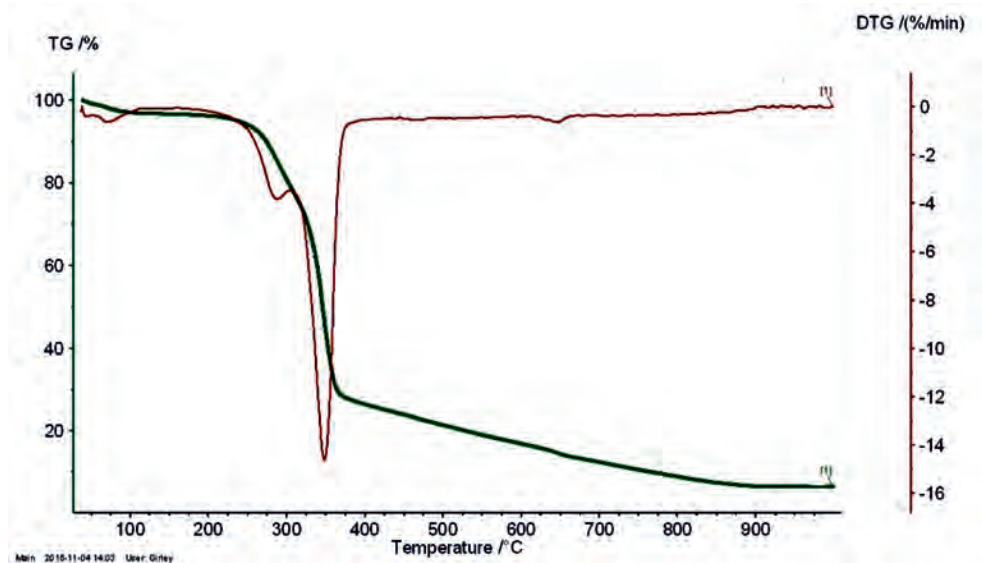


FIGURE 7. TG thermogram and $dm(\%)/dt$ of a henequen fiber used at this work. Thermogram was performed at 10 °C/min using argon.
 FIGURA 7. Termograma de TG y $dm(\%)/dt$ de una muestra de la fibra de henequén utilizada en este trabajo. El termograma fue realizado a 10 °C/min en atmósfera de argón.

Analysis of Mechanical Behavior

Although, due to restrictions this work had to overcome, as to possibility to use an extruder with die opening of greater diameter, fiber length of henequen fibers used in this work was limited to about 7 millimeters (shorter than critical length) and all reinforcing potential to increase material strength could not be used. Nevertheless, it was observed that an integral enhancement of mechanical performance of composite was reached. Tensile strength was close to values exhibited by currently in use material (see Table 1 and Figure 10a). Young’s modulus, its rigidity, increased, as it can be seen in Figure 8. This increase in rigidity did not take place with an increase in fragility, as commonly occurs with products reinforced with short aspect ratio wood particles (Moreno *et al.*, 2013, TabkhPaz *et al.*, 2013). On the contrary, impact strength increased in some directions to more than double (see Table 2 and Figure 10b). In agricultural products handling sector and, in general, in packaging, this is very desirable.

Análisis del comportamiento mecánico

Aunque, por las restricciones impuestas a este trabajo, en cuanto a la posibilidad de utilizar una extrusora con aberturas en el molde con un mayor diámetro, la longitud de las fibras de henequén utilizadas en este trabajo se vio limitada al entorno de 7 mm (por debajo de la longitud crítica) y no se pudo aprovechar todo el potencial que las mismas poseen para mejorar la resistencia del material, se observó una mejora integral en el comportamiento mecánico del mismo. La resistencia se acercó a los valores del material en uso (Tabla 1 y Figura 10a). El módulo de elasticidad, su rigidez, aumentó, como se puede ver en la Figura 8. Este aumento en la rigidez, no tuvo lugar paralelamente con el aumento de la fragilidad como ocurre con productos reforzados con partículas de madera (Moreno *et al.*, 2013; TabkhPaz *et al.*, 2013), por el contrario, la resistencia al impacto aumentó y en algunos casos a más del doble, como se puede ver en la Tabla 2 y en la Figura 10b). Esto en el sector de envases y medios para el traslado y trabajo en general con los productos agrícolas, es muy deseable.

TABLE 1. Results of multiple range test performed to compare statistically values obtained in Tensile strength
 TABLA 1. Resultados de la prueba de rango múltiple para comparar estadísticamente los resultados de la prueba de tracción
 Method: 95,0 percent LSD

	Cases	Mean	Homogeneous Groups
EBP_90	3	7,8867	X
MOL_90	3	8,91314	X
MOL_00	3	11,2995	X
EBP_00	3	14,9617	X

Cases	Mean	Homogeneous Groups	
<i>Contrast</i>	<i>Sig.</i>	<i>Difference</i>	<i>+/- Límits</i>
EBP_00 - MOL_00	*	3,66219	1,57121
EBP_00 - EBP_90	*	7,07502	1,57121
EBP_00 - MOL_90	*	6,04859	1,57121
MOL_00 - EBP_90	*	3,41283	1,57121
MOL_00 - MOL_90	*	2,3864	1,57121
EBP_90 - MOL_90		-1,02644	1,57121

* means that those results are statistically different.

TABLE 2. Results of multiple range test performed to compare statistically values obtained in Impact strength
TABLA 2. Resultados de la prueba de rango múltiple para comparar estadísticamente los resultados de la prueba de Impacto
Method: 95,0 percent LSD

Cases	Mean	Homogeneous Groups	
EBP_90	5	0,00609407	X
EBP_00	5	0,0151658	X
MOL_00	5	0,0218345	X
MOL_90	5	0,0252116	X
<i>Contrast</i>	<i>Sig.</i>	<i>Difference</i>	<i>+/- Límits</i>
EBP_00 - MOL_00	*	-0,00666866	0,00628753
EBP_00 - EBP_90	*	0,00907175	0,00628753
EBP_00 - MOL_90	*	-0,0100458	0,00628753
MOL_00 - EBP_90	*	0,0157404	0,00628753
MOL_00 - MOL_90		-0,00337716	0,00628753
EBP_90 - MOL_90	*	-0,0191176	0,00628753

* means that those results are statistically different.

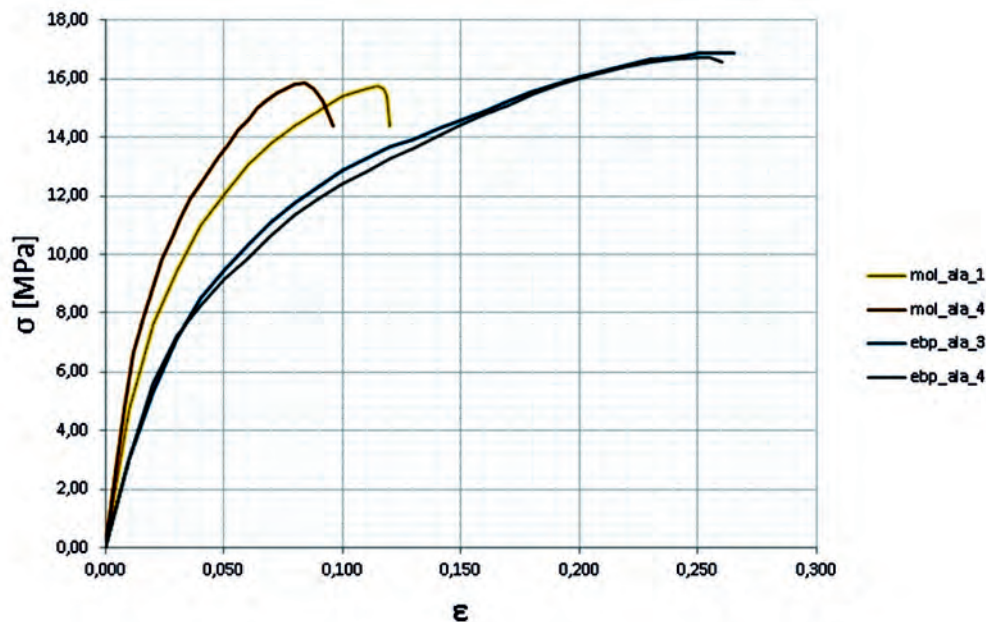


FIGURE 8. Tension (σ) vs deformation (ϵ) diagram of selected samples from the flange of I beams obtained, both cut and tested longitudinally. Coded as mol samples of MC containing henequen fibers with a center value trend for length of about 7.2 mm. As ebp were coded the ones containing wood particles.
 FIGURA 8. Diagrama de tensión (σ) vs deformación (ϵ) para muestras seleccionadas del ala de la viga I obtenida, cortadas y ensayadas en la dirección longitudinal. Codificadas como mol las muestras de MC con fibras de henequén con longitud de fibra con tendencia central del orden de los 7,2 mm y como ebp las del material compuesto que incorpora partículas de madera.

Other important aspect to consider, is the way disperse phase interact with mean used in obtaining final shape, in this case the extrusion die. Wood particles used are trending a low profile shape and adopt an orientation that aligns its

Otro aspecto importante a analizar es la forma en que la fase dispersa interactúa con el medio empleado para el moldeo de la forma final, en este caso el dado de extrusión. Las partículas de madera tienen una forma que tiende a ser achatada y toman una orientación

upper and lower planes parallel to planes of surfaces that restrict the flow during the exit process, it means, the surfaces that conform the upper and lower planes of beam's flange and surfaces of beam's core. As material continues its course through extrusion die, and as flow restricts, those particles spin to align with the flow direction, that origin the increase of tensile strength in that direction, marked as 0 degree direction in figure 10 diagram (see also Figure 9).

que alinea la superficie plana de su área mayor con el plano de las superficies que adelgazan el flujo durante el proceso de salida, es decir, las superficies que forman los planos superior e inferior del ala de la viga y las superficies del alma de la viga. Con el avance por el dado de extrusión y mientras el flujo se restringe, estas partículas giran en la dirección que avanza el flujo eso provoca un aumento de la resistencia en esa dirección, que es la marcada con 0 grados el diagrama de la Figura 10, (ver también direcciones en la Figura 9).

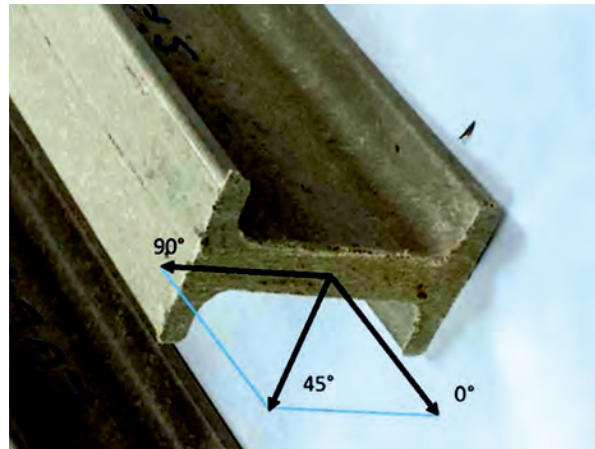


FIGURE 9. Main directions evaluated in molding the profile I
 FIGURA 9. Direcciones principales evaluadas en el moldeo del perfil I.

In turn, fibers with a higher aspect ratio, as henequen fibers, cannot be compressed longitudinally adopting a position traverse to direction they are forced to flow leaving the die, it means they align in the 90 degree direction showed in Figures 9 and 10, as more, as more lasts that process and as more lengthy are the fibers. This explains that material prepared with henequen fibers sees reduced is tensile strength in 0-degree direction and increase to 90 degrees. Similar effects are reported by other authors (Bress and Dowling 2013, Gonçalves, Teixeira *et al.* 2015, Gupta and Ryckebosch 2015, Möbius, Blei *et al.*, 2016).

En cambio, las fibras con esbeltez mayor, como las de henequén, no pueden comprimirse en la dirección longitudinal y tienden a adoptar una posición perpendicular a la dirección en que son forzadas a fluir en su salida, es decir tienden a alinearse en la dirección a 90 grados indicada en las Figuras 9 y 10, tanto más, cuanto más tiempo dure ese proceso y cuanto más largas sean las fibras. Eso explica que en el material preparado con las fibras de henequén la resistencia se reduzca en la dirección 0 y aumente a 90 grados. Efectos similares a estos son reportados también por otros autores (Bress y Dowling, 2013; Gonçalves *et al.*, 2015; Gupta y Ryckebosch, 2015; Möbius *et al.*, 2016).

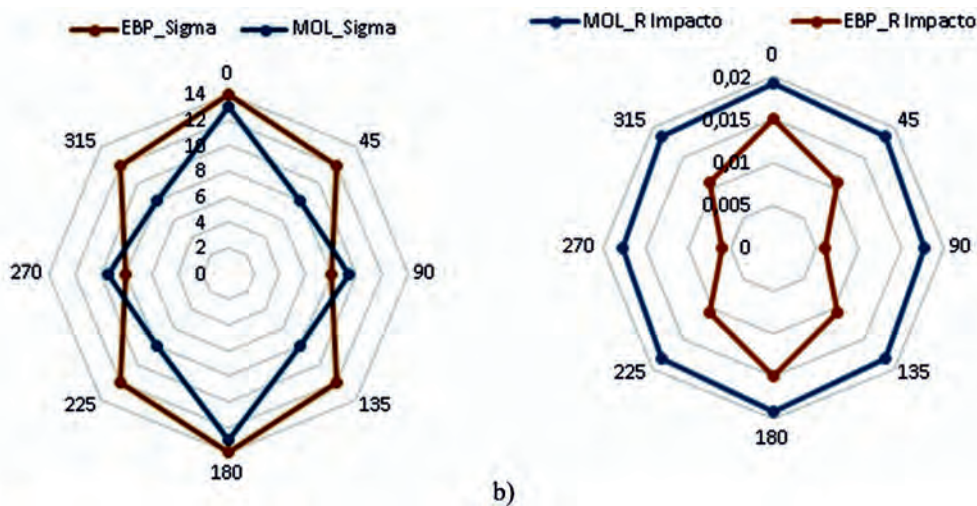


FIGURE 10a). Average tensile strength of profile obtained, in MPa. (0 direction indicates extruder exit axis and 90° direction indicates vertical axis of beam I core produced, that, in extruder's working position lays horizontally. b) Impact strength in the same directions expressed in J/mm².
 FIGURA 10a). Resistencia a la tracción del perfil obtenido, en MPa. (La dirección 0 indica el eje de salida de la extrusora y la de 90° indica el eje vertical del núcleo de la viga I producida, que en la posición de trabajo de la extrusora queda horizontalmente).

General performance, in tensile strength should have been better, for henequen fibers, in all directions but problems related to mixing, explained in material preparation section, keep in some way affecting results. From this test, two results are derived. One indicating how the process has to be configured to use this kind of fiber, consisting of a gravimetric dosing system for particles delivering continuously, to first plasticizing stage, incorporating always first all additives and then the polymeric matrix. In diagram of Figure 11, process arrangement proposal is showed.

El desempeño en general, en la resistencia a la tracción debió ser algo mayor para las fibras de henequén, en todas las direcciones, pero el problema con el mezclado, que se explicó en la sección de preparación de materiales, aunque se trabajó para su solución, continuó en alguna medida afectando los resultados. De esta prueba se derivaron dos propuestas, una que indica como debe ser el proceso para utilizar este tipo de fase dispersa, el cual debe utilizar un sistema de dosificación gravimétrico directamente en el primer paso de plasticación, agregando siempre primero los aditivos y posteriormente la matriz polimérica. En el diagrama de la Figura 11 se muestra la propuesta de organización del proceso.

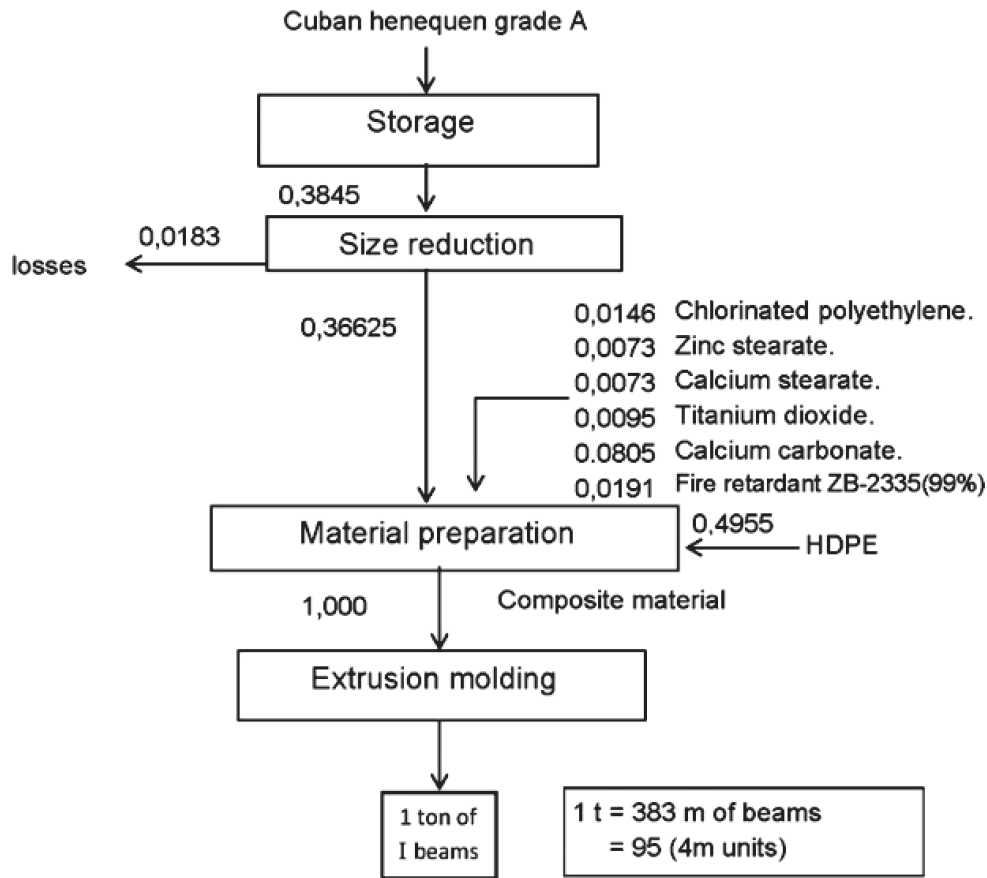


FIGURE 11. Process layout to obtain profiles of henequen short-fiber reinforced high-density polyethylene matrix composite material by extrusion method (proposal).

FIGURA 11. Propuesta de proceso para la obtención de perfiles de material compuesto de matriz termoplástica con fibras cortas de henequén orientadas aleatoriamente por el método de extrusión.

Another aspect to change, analyzing results of this work, is designing pelletizer extrusion die to allow increasing fiber length above critical length that according to former studies should be 12 mm that pass perfectly through a 10 millimeter hole in extrusion die. There should not be difficulties referring to loss of tensile strength in 0 direction, main direction, caused by lengthy fibers rotation by material compression at exit, because in an extrusion process fibers with greater fiber length than proposed are rarely used. That is why fiber-length change proposal is not to a value much greater than 12 millimeters. That is perfectly possible because this is a material projected with a selected length.

El segundo aspecto a cambiar, a partir de los resultados de este trabajo, es la modificación del molde de salida de los gránulos y con esto aumentar la longitud de las fibras por encima de la crítica, lo cual, de acuerdo a estudios anteriores, bastaría con aumentar a 12 mm la tendencia central de las longitudes de las partículas preparadas. No debe haber dificultades en cuanto a la pérdida de resistencia en la dirección 0, la principal, con el aumento de longitud a las fibras de henequén a causa del giro de las fibras producto de la compresión en el momento de salida, porque, en un proceso de extrusión, es poco usual incluir fibras mucho más largas que estas. Es por eso que la propuesta de aumento a la longitud de las fibras, no es a un valor mucho mayor que 12 milímetros. Esto es perfectamente posible ya que este es un material diseñado y con una longitud escogida.

CONCLUSIONS

- Incorporating henequen fibers in production process of thermoplastic matrix composite material without degradation or fiber damage caused by temperature or mechanical work is possible, resulting in a product with a group of properties that indicates a better mechanical performance. The process to prepare thermoplastic matrix composite material including fibers with high aspect ratio as the selected henequen fibers needs a mixing process that limits the compaction of a great amount of fiber before entering in contact with melt polymer, because its high viscosity troubles flow inside fiber mats. Batch mixing incorporating bulk fibers, additives and polymer is not suitable at all, being preferred a gravimetric dosing system feeding directly the first plasticizing step.
- The use of henequen fiber, with greater aspect ratio, in profile extrusion process allows achieving a better overall performance. Enhanced impact strength showed makes this product suitable to manufacture containers, packaging and pallets. This material presents among other advantages, greater endurance, less interaction with transported products and can find a wide number of other applications where resistance to environmental factors as humidity and plagues are needed. This material is recyclable in many ways so its environmental life cycle should be coordinated with all factors involved on its use by making a joint strategy to reuse it.

ACKNOWLEDGEMENT

To CAPES of Brazil to support high-level studies that originated this work. To Pallets and Profiles facility of Enterprise “Emilio Bárcenas” to provide equipment and advice. To HIDROPLAST enterprise that generously offered their testing facilities and skills of their workers. To Obdulia, Ramon, Roberto y Ernesto, without them this work could not be a reality.

REFERENCES / REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AVÉROUS, L.; LE, F.: “Properties of biocomposites based on lignocellulosic fillers”, *Carbohydrate Polymers*, 66(4): 480-493, 2006, ISSN: 0144-8617, DOI: 10.1016/j.carbpol.2006.04.004, *Disponible en:* <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014486170600186X>, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- BEG, M.D.H.; PICKERING, K.L.: “Reprocessing of wood fibre reinforced polypropylene composites. Part I: Effects on physical and mechanical properties”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(7): 1091-1100, 2008, ISSN: 1359-835X, DOI: 10.1016/j.compositesa.2008.04.013, *Disponible en:* <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X08001164>, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- BERMELLO, A.; DÍAZ, D.; MARTÍNEZ, R.; QUINTANA, G.; MIERES, G.; LEAL, J.A.: “Estudio de un material compuesto de partículas de bagazo de caña y matriz de polietileno mediante espectrometría FTIR”, *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 42(3): 106-111, 2008, ISSN: 0138-6204, *Disponible en:* <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=223120667015>, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- BODROS, E.; PILLIN, I.; MONTRELAY, N.; BALEY, C.: “Could biopolymers reinforced by randomly scattered flax fibre be used in structural applications?”, *Composites Science and Technology*, 67(3): 462-470, 2007, ISSN: 0266-3538, DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.08.024, *Disponible en:* <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353806003356>, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- BRESS, T.J.; DOWLING, D.R.: “Simulations and measurements of in-mold melt flow during the injection molding of polystyrene”, *Polymer Engineering and Science*, 53(4): 770-779, 2013, ISSN: 1548-2634, DOI: 10.1002/pen.23321, *Disponible en:* <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.23321/full>, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- BROWN, A.: “Desarrollo sostenible de envases reforzados con fibras de bagazo de caña de azúcar”, *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 45(1), 2011, ISSN: 0138-6204.
- CABRAL, H.; CISNEROS, M.; KENNY, J.M.; VAZQUEZ, A.; BERNAL, C.R.: “Structure-Properties Relationship of Short Jute Fiber-reinforced Polypropylene Composites”, *Journal of Composite Materials*, 39(1): 51-65, 2005, ISSN: 0021-9983, DOI: 10.1177/0021998305046434, *Disponible en:* <https://doi.org/10.1177/0021998305046434>, [Consulta: 30 de enero de 2017].

CONCLUSIONES

- La incorporación de fibras de henequén en los procesos de obtención de materiales compuestos con matriz de termoplástico es posible, sin la degradación o deterioro de las fibras, producto de la temperatura o del trabajo mecánico sobre la mezcla en preparación, impartándole al material obtenido un grupo de propiedades que indica un mejor desempeño mecánico. El proceso de preparación de materiales compuestos con matriz de termoplástico y fibras de gran esbeltez como la de henequén requiere de un proceso de mezclado que no permita la compactación de gran cantidad de fibras antes de entrar en contacto con el polímero fundido.
- El uso de la fibra henequén, con una esbeltez mayor, en el proceso de extrusión de perfiles permite conseguir un mejor balance de propiedades en las distintas direcciones, con una resistencia al impacto mejorada lo que le hace adecuado para su uso en la fabricación de envases y embalajes entre otras aplicaciones.

AGRADECIMIENTOS

A CAPES de Brasil por apoyar los estudios de alto nivel que dieron origen a este trabajo. A la fábrica de paletas y perfiles de la empresa “Emilio Bárcenas” y sus trabajadores, por brindar su equipamiento y asistencia. A HIDROPLAST empresa que generosamente brindó su equipamiento de laboratorio y las habilidades de sus técnicos. A Obdulia, Ramón, Roberto y Ernesto, sin ellos este trabajo no hubiera sido realidad.

- DÍAZ-BATISTA, D.; MAZORRA, M.; VALÍN, J.-L.: "Comportamiento mecánico de fibras henequén cubano e interfase con polímeros termoplásticos del tipo poliolefina", *Ingeniería Mecánica*, 18(3): 148-157, 2015, ISSN: 1815-5944, Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1815-59442015000300002&lng=es&nrm=iso&tlng=es, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- GONÇALVES, N.; TEIXEIR, P.; FERRÁS, L.; AFONSO, A.: "Innovative approach to the design of profile extrusion dies", *Plastics Research*, 2015, DOI: 10.2417/spepro.005733, Disponible en: <http://www.4spepro.org/pdf/005733/005733.pdf>, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- GUPTA, M.; RYCKEBOSCH, K.: "Flow simulation software to optimize coextrusion die design", *SPE Plastics Research Online*, 2015, DOI: 10.2417/spepro.005962, Disponible en: <http://www.4spepro.org/view.php?source=005962-2015-05-15>, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, MÉNDEZ, J.; ACEVEDOL, O.A.; RODRÍGUEZ, R.: "Physicochemical characterization of four species of agaves with potential in obtaining pulp for paper making", *DYNA*, 83(197): 232-242, 2016, ISSN: 0012-7353, DOI: 10.15446/dyna.v83n197.52243, Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0012-735320160003000030&lng=en&nrm=iso&tlng=es, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- MAY-PAT, A.; VALADES, A.; HERRERA, P.J.: "Effect of fiber surface treatments on the essential work of fracture of HDPE-continuous henequen fiber-reinforced composites", *Polymer Testing*, 32(6): 1114-1122, 2013, ISSN: 0142-9418, DOI: 10.1016/j.polymertesting.2013.06.006, Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941813001256>, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- MÖBIUS, T.; BLEI, R.; MODLER, N.; PÉREZ, C.; OSSWALD, T.A.: "Influence of process parameters on fiber orientation in reinforced thermoplastics", *SPE Plastics Research Online*, 2016, DOI: 10.2417/spepro.006772, Disponible en: <http://www.4spepro.org/view.php?source=006772-2016-11-23>, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- MORENO, P.; RODRIGUE, D.; GIROUX, Y.; BALLERINI, A.; GACITA, W.: "Morphological and mechanical characterization of recycled thermoplastic foams reinforced with wood subproduct", *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 15(1): 3-16, 2013, ISSN: 0718-221X, Disponible en: <http://www.revistamaderas.cl/ojs/index.php/remaderas/article/view/555>, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- MOTAUNG, T.; MOKHOTHU, T.; MOKHENA, T.; MOCHANE, M.; MAKHETHA, T.; MOJI, R.; MOTLOUNG, S.: "Enhancing the properties of low-density polyethylene composites", *SPE Plastics Research Online*, 2015, DOI: 10.2417/spepro.006114, Disponible en: <http://4spepro.org/view.php?source=006114-2015-09-15>, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- MUÑOZ-VELEZ, M.F.; HIDALGO, M.A.; MIN, J.H.: "Fique fiber an alternative for reinforced plastics. Influence of surface modification", *Biocología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 12(2): 60-70, 2014, ISSN: 1692-3561, Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1692-35612014000200007&lng=en&nrm=iso&tlng=en, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- PICKERING, K.L.; EFENDY, M.G.A.; LE, T.M.: "A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83: 98-112, 2016, ISSN: 1359-835X, DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.08.038, Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X15003115>, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- TABKHPAZ, M.; BEHRAVESH, A.H.; SHAHI, P.; ZOLFAGHARI, A.: "Re-extrusion of wood polymer composites and its effects", *SPE Plastics Research Online*, 2013, DOI: 10.2417/spepro.005037, Disponible en: <http://4spepro.org/view.php?article=005037-2013-11-14&category=Composites>, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- ZBOROWSKI, L.; CANEVAROLO, S.V.: "In-line monitoring of droplets deformation and recovering and polymer degradation during extrusion", *Polymer Testing*, 31(2): 254-260, 2012, ISSN: 0142-9418, DOI: 10.1016/j.polymertesting.2011.11.004, Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941811002005>, [Consulta: 30 de enero de 2017].

Received: 24/08/2017.

Approved: 22/12/2017.

Daniel Díaz-Batista, Prof., Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), Facultad de Ingeniería Mecánica, Calle 114, No. 11901, e/ Ciclo vía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba. CP: 19390, e-mail: danieldiaz@mecanica.cujae.edu.cu.

Walter Saint Blancard-Valdés, e-mail: waltercuba@nauta.cu

Victor Bridi-Tellez, e-mail: bridi.victor@gmail.com

Martha Mazorra-Mestre e-mail: marta@ceter.cujae.edu.cu

José Luíís Valin-Rivera, e-mail: jose.valin@pucv.cl

Francisco Rolando Valenzuela-Díaz, e-mail: frvdiaz@usp.br

Hélio Wiebeck, e-mail: wiebeck@yahoo.com.br

Note: the mention of commercial equipment marks, instruments or specific materials obeys identification purposes, there is not any promotional commitment related to them, neither for the authors nor for the editor.