



Characterization of the Composite Interface of Thermoset Polymeric Matrix Reinforced with Cuban Henequen Fibers

Caracterización de la interface de material compuesto de matriz polimérica termofija reforzada con fibras de henequén cubano

M.Sc. Yosvani Guerra-Silva^I, Dr. José Luis Valin-Rivera^{II}, M.Sc. María Elena Fernández-Abreu^{III}, Dr. Hélio Wiebeck^{IV}, Dr. Alexander Alfonso-Alvarez^V, Dr. Francisco Rolando Valenzuela-Díaz^{IV}, Dr. Edison Gonçalves^V y M.Sc. Francisco Jesús Mondelo-García^{III}

Empresa Cubana de Aeropuertos y Servicios Aeronáuticos S.A. Dirección Técnica, Boyeros, La Habana, Cuba.

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Ingeniería Mecánica, Quilpué, Valparaíso, Chile.

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

Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica, São Paulo/SP, Brasil.

Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica, São Paulo/SP, Brasil.

ABSTRACT. The aim of this work is the characterization of the interfacial bonding of a composite material with thermofix polymeric matrix, polyester orthophthalic type, and Cuban reinforcement, consisting of henequen fibers, from Limonar, Matanzas. The henequen fibers were characterized by scanning electron microscopy (SEM) and mechanical tests and their critical length was calculated. The tensile, impact and hardness tests were performed on the composite material. After analyzing the results of the tests, we conclude that henequen fibers have positive influence as reinforcement in a thermoset polymer matrix.

Keywords: Henequen, scanning electronic microscopic, fiber, reinforcement, composite.

RESUMEN. El presente trabajo trata sobre el estudio de la caracterización de la unión interfacial de un material compuesto con matriz polimérica termofija, del tipo poliéster ortoftálico y refuerzo cubano, consistente en fibras de henequén, procedente de Limonar, Matanzas. Las fibras de henequén fueron caracterizadas por microscopía electrónica de barrido (MEB) y a través de ensayos mecánicos de tracción, siendo calculada su longitud crítica. Al material compuesto, se le realizaron ensayos de desprendimiento por tensión, impacto y dureza. Tras el análisis de los resultados de los ensayos, se llega a la conclusión, de la influencia positiva de las fibras de henequén como refuerzo en una matriz polimérica termofija.

Palabras clave: henequén, microscopía electrónica de barrido, fibra, reforzar, compuesto.

INTRODUCTION

Composites materials have a wide use in shipbuilding, aerospace and automotive industries, among others, mainly due to the relationship between high rigidity and relative lightness

INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos, tienen un amplio uso en la industria aeroespacial, automovilística, construcción naval, entre otros, debido, principalmente, a la relación entre la alta rigidez y

(Swolfs, *et al.*, 2014). In recent years, there has been a development in the area of research and application of composite materials reinforced with natural fibers, such as jute, sisal or henequen, coconut, flax, pineapple, etc. These reinforcing materials are being studied to replace partially and/or totality synthetic fibers (glass, carbon, aramid, etc) for some applications in thermosettable matrix, mainly in less severe performance (García, *et al.*, 2015; Rodríguez, *et al.*, 2014).

The use of natural fibers, such as henequen, for the substitution of synthetic fibers, is mainly based on the fact that, they are not toxic or harmful to health and are used as biodegradable raw material; besides, they have low density and low energy consumption during the manufacturing process. Moreover, they contribute to the creation and multiplication of rural enterprises, can be planted in arid and semi-desert areas and have good adhesion in some matrices, etc. (Díaz, *et al.*, 2015; Rodríguez, *et al.*, 2015).

The henequen or sisal is a plant of the Agave genus, which has a wide use, because it contributes to the landscape preservation and avoids soil erosion, although its greatest economic importance is the use of the leaves and stems as a source of fibre raw material (Oramas, *et al.*, 2014).

There are several studies on the characterization of composite materials of thermosetting plastics reinforced with sisal or henequen fibers (Arthanarieswaran, *et al.*, 2014; Milanese, *et al.*, 2012; Fernandes, *et al.*, 2013; Ramzy, *et al.*, 2014; Zhao, *et al.*, 2014). Nevertheless, there are practically no studies on the resistance of the fibre-matrix interface of a composite material with this type of matrix and reinforcing fibers of Cuban henequen.

Only a previous study performed with 10, 20 and 30% fibers of this type of henequen and similar matrix, showed that the values of tensile strength and impact, increased considerably for the material with 20% fibers. Increase of the material was insignificant with 10% of fibers. It improved over the 10% with 30%, but it was lower than the variant with 20%. Knowing that the values of 10 and 30% do not improve impact and tensile strength, the influence of the fiber on the fiber-matrix interface strength was determined with 15, 20 and 25% henequen fiber. These values are closer to each other, which allow knowing with more precision the influence of the percentage of fiber in the mechanical properties of the composite. A pure matrix composite was also manufactured as a comparison element.

Previously to the manufacturing of materials, the fibre was characterized by scanning electron microscopy and mechanical testing. Once tests were carried out on the different materials, tensile, impact strength, as well as hardness, were obtained. The results obtained in these tests were compared with experiments performed in a similar matrix and henequen fibers composite material (Rodríguez, *et al.*, 2014).

METHODS

In the manufacturing of composite materials with polyester resin and henequen fibre reinforcement, four variants were

relativa ligereza que presentan (Swolfs *et al.*, 2014). En los últimos años, ha habido un desarrollo en el área de la investigación y aplicación de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales, como jute, sisal o henequén, coco, lino, piña, etc. Estos materiales, de refuerzo, están siendo estudiados para sustituir inscripciones parcialmente y/o en su totalidad a las fibras sintéticas (de vidrio, de carbón, de aramida, etc.), para algunas aplicaciones de matriz termoestable, principalmente en prestaciones menos severas (Rodríguez-Soto *et al.*, 2014; García *et al.*, 2015).

La importancia del empleo de las fibras naturales, como el henequén, para la sustitución de materiales sintéticos, se basa principalmente en que no son tóxicas ni perjudiciales a la salud, baja densidad, se aprovechan como materia prima biodegradable, no fracturan mucho en su proceso, bajo consumo de energía durante el proceso, contribuyen a la creación y multiplicación de empresas rurales, se pueden sembrar en zonas áridas y semidesérticas, buena adhesión en algunas matrices, etc. (Díaz-Batista *et al.*, 2015; Rodríguez *et al.*, 2015).

El henequén o sisal, es una planta del género agave, que tiene un uso amplio, debido que contribuye a la preservación del paisaje y la erosión del suelo, pero su mayor importancia económica, está en la utilización de las hojas y tallos como fuente de materia prima de fibras (Oramas *et al.*, 2014).

Aunque existen varios trabajos sobre la caracterización de materiales compuestos de plásticos termofijos reforzados con fibras de sisal o henequén (Milanese *et al.*, 2012; Fernandes *et al.*, 2013; Arthanarieswaran *et al.*, 2014; Ramzy *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2014) low cost and is a renewable source. Woven sisal fabric was submitted to heat treatment before moulding and the influence of moisture content of fibres on the composites behaviour was observed. The paper presents mechanical characterization by tensile and flexural strength of woven sisal fabric composites, with and without thermal treatment (at 60°C for 72h, prácticamente, no existen estudios sobre la resistencia de la interface fibra-matriz de un material compuesto con este tipo de matriz y fibras de refuerzo de henequén cubano.

Solo un estudio previo realizado con 10, 20 y 30% de fibras de este tipo de henequén y matriz similar, mostró que los valores de resistencia a la tracción e impacto, aumentaban considerablemente para el material con 20% de fibras, siendo insignificante el aumento del material con 10% de fibras, el material con 30% mejoró en relación al de 10%, pero fue inferior a la variante con 20%. Sabiendo que los valores de 10 y 30% no mejoran la resistencia a impacto y a la tracción. Se determinó la influencia de la fibra en la resistencia de la interfase fibra-matriz, con 15, 20 y 25% de fibra de henequén. Estos valores son más próximos entre sí, lo que permite saber con más precisión la influencia del porcentaje de fibra en las propiedades mecánicas del compuesto. También fue fabricado un compuesto de matriz pura como elemento de comparación.

Previamente a la fabricación de los materiales, la fibra fue caracterizada a través de microscopía electrónica de barrido y ensayos mecánicos. Una vez realizados los ensayos en los diferentes materiales, se obtuvo, la resistencia al esfuerzo de tracción e impacto, así como, la dureza. Los resultados obtenidos en estos ensayos fueron comparados con experimentos realizados en un compuesto de matriz similar y fibras de henequén (Rodríguez-Soto *et al.*, 2014).

MÉTODOS

En la fabricación de los materiales compuestos a base de resina de poliéster y fibras de henequén, se desarrollaron cuatro (4)

produced. The variant 1 was manufactured with 100% polyester resin, in order to get a reference material for comparison with another three materials produced with 15, 20 and 25% henequen fibers. These materials were named variants 2, 3, 4, respectively. The objective of those variations in concentration was to select the concentration that improved the tensile and impact strength and which had the greatest hardness. The henequen fiber was previously analyzed by scanning electron microscopy. Its breaking strength, critical length and fiber-matrix interfacial strength were calculated. Tests of tensile strength, impact strength and hardness were made to the composite materials manufactured as well as to the resin.

Matrix and reinforcement materials

The polymer matrix used for manufacture composite materials was unsaturated orthophthalic polyester resin, with low emission of styrene monomer, commercially available Distriton 5119. This polymer was chosen due to it is widely used in repairs of composite components in aeronautics. Its main properties are dark yellow color, apparent density between 1.1-1.15 g/cm³, RVF viscosity between 580-700 mPa·s at 2 rpm, content of styrene monomer between 31-35% and gel time between 31-43 minutes.

Polyester resins have low viscosity, good impregnation with fibre reinforcements, suitable gel time and rapid demolding and they are translucent and thixotropic. Once cured, they are infusible and insoluble, with excellent cross-linking, good mechanical properties, good resistance to chemical agents and high hydrolytic resistance (Dai, *et al.*, 2013). The initiator used is methyl-ethyl ketone peroxide (MEKP), commercially available Curox M-302, in which it is added to 0.8% of the resin volume.

In the case of this insaturated resin, its critical temperature is 80 °C and as it is desired to manufacture the composites material at room temperature, the initiator is mixed with 6% cobalt octoate accelerator in xylene. Its trade name is SORODRY, which is added to 0.3% of the resin volume.

The cobalt octoate produces an optical bleaching effect on the materials to which it is added and is an extremely active oxidizing agent. The reaction offers an almost ideal system for curing at room temperature, influencing its amount in gel time and curing speed.

As reinforcement materials were used henequen or sisal fibers, plant of the genus *Agave*, belonging to the extensive botanical family Agavaceae. They are commonly known as: agave, pita, maguey, cabuya and mezcal. In Cuba, henequen or *Fourcroydes agave* is a plant used for the production of fibers for ropes and cordages, where waste is generated as part of the production process (Figure 1). Due to the fiber use for reinforcement materials is a residue of production, its use is economic. In addition, it also has a higher mechanical resistance than other natural fibers (Sanyang, *et al.*, 2016), so they can substitute composite materials with synthetic fibers as part machinery and agricultural implements. There are composite materials with natural fibers that have similar applications (Khalil, *et al.*, 2013; Islam, *et al.*, 2015). The henequen plant requires for its optimum development of

variantes. La variante No 1, contiene solamente 100% de resina poliéster, debido, a que tiene por objetivo obtener una referencia para la comparación con las tres concentraciones de fibras en porcentos de 15, 20 y 25%, designadas como; variantes No 2, No 3 y No 4 respectivamente. Esa variación de la concentración, tuvo por objetivo, seleccionar la variante que mejores propiedades de resistencia a la tracción e impacto y la que mayor dureza presentara. Previamente la fibra de henequén se analizó mediante microscopia electrónica de barrido, se le calculó la resistencia a la rotura y la longitud crítica, así como un cálculo del esfuerzo interfacial fibra-matriz. A los materiales compuestos fabricados, así como a la resina se le realizaron ensayos de tracción, resistencia al impacto y dureza.

Material de la matriz y de refuerzo

Como matriz se utilizó un polímero, en este caso, de resina de poliéster insaturado ortoftálico, insaturado con baja emisión del monómero de estireno, de nombre comercial Distritón 5119. Fue escogido este polímero debido a que es ampliamente utilizado en reparaciones de componentes de material compuesto en la aeronáutica, que tiene como principales propiedades; un color amarillo oscuro, densidad aparente entre 1,1-1,15 g/cm³, viscosidad RVF entre 580-700 mPa·s, contenido de monómero estireno entre 31-35% y tiempo de gel entre 31 y 43 minutos.

Las resinas poliésteres presentan baja viscosidad, buena impregnación con refuerzos de fibra, adecuado tiempo de gel y rápido desmolde. Una vez curadas, son infusibles e insolubles, con excelente reticulación, buenas propiedades mecánicas, buena resistencia a los agentes químicos y alta resistencia hidrolítica (Dai *et al.*, 2013).

Como iniciador, fue utilizado el peróxido de metil-etil-cetona, de nombre comercial Curox M-302, el cual, se adiciona un 0,8% al volumen de resina.

En el caso de esta resina de poliéster insaturada, su temperatura crítica es de 80°C, y como se desea elaborar los materiales compuestos a temperatura ambiente, el iniciador se combina con el acelerador octoato de cobalto al 6% en Xileno, de nombre comercial SORODRY, el cual se adiciona al 0,3% del volumen de resina.

El octoato de cobalto produce un efecto de blanqueo óptico sobre los materiales a los cuales es agregado, y es un activísimo agente de oxidación. La reacción, ofrece un sistema casi ideal para el curado a temperatura ambiente, influyendo su cantidad en el tiempo de gel y a la velocidad de curado.

Como refuerzo, se emplean las fibras de henequén o sisal, planta del género *agave*, perteneciente a una extensa familia botánica del mismo nombre Agavaceae. Se les conoce comúnmente por: agave, pita, maguey, cabuya y mezcal. En Cuba, el henequén o *Agave fourcroydes*, es una planta destinada a la producción de fibras para cuerdas y cordeles, donde se generan residuos como parte del proceso de producción, Figura 1. Por ser residuos de producciones su uso es más económico, además posee una mayor resistencia mecánica que otras fibras naturales (Sanyang *et al.*, 2016), por lo que pueden substituir a los materiales compuestos con fibras sintéticas como parte de maquinaria e implementos agrícolas. Existen materiales compuestos con fibras naturales que tienen aplicaciones similares (Khalil *et al.*, 2013; Islam *et al.*, 2015). Debido a que requiere para

a warm and dry climate, with average rainfall that does not exceed 1200 mm annually, with long periods of drought. It develops better in volcanic, clayey, permeable soils, abundant in elements derived from basalt and rich in ferrites where other plants growing is difficult. That is a viable option for the development of agriculture in certain semi-desert and water-scarce places (Ustimenko, 1982).

su óptimo desarrollo de un clima cálido y seco, con precipitaciones promedio que no sobrepasen los 1200 mm anuales, con largos períodos de sequía y que se desarrolla mejor en suelos volcánicos, arcillosos, permeables y abundantes en elementos derivados del basalto y ricos en ferritas donde es difícil el cultivo de otras plantas, resulta una opción viable para el desarrollo de la agricultura en ciertos lugares semidesérticos y escasos de agua (Ustimenko, 1982).



FIGURE 1. Henequen fibers.
FIGURA 1. Fibras de henequén.

Characterization of Henequen Fibers

Scanning Electron Microscopy

Fiber to manufacture the composite come from Limonar, Matanzas Province, Cuba and they are cuts obtained in the rope factory, which were analyzed by the scanning electron microscope (SEM), model Cambridge Stereoscan 240.

Figure 2 shows a hygroscopic nature of fibers and the appropriate superficial structure for fibre-polymer interface. The topographical irregularities of its surface allow establishing mechanical bonds between these fibers and the polymer matrix in stable and strong way, by increasing the superficial strength between both phase boundaries of both components. Due to, polymer chemical nature and fibre are compatible, since both are organic in nature, the link of both is established not only as a mechanical link but also as a structural chemical one.

The outer and lateral surfaces of the fibers have a stable, uniform appearance, with no fraying, cuts, fissures and irregularities or roughness; in addition, there are no significant deformations or unevenness of the chips, which could weaken fibers or the material obtained.

Caracterización de las fibras de henequén

Microscopía electrónica de barrido

Las fibras para la fabricación de los compuestos, proceden de Limonar, en la provincia de Matanzas, Cuba y son recortes obtenidos en la fábrica de sogas. A las cuales, se le realizó un análisis mediante el microscopio electrónico de barrido (MEB), marca Cambridge Stereoscan 240.

En la Figura 2, se aprecia, que la superficie de las fibras tiene naturaleza higroscópica y su estructura superficial es la favorable en la interface fibra-polímero. Las irregularidades topográficas de su superficie, permiten establecer vínculos mecánicos entre estas y la matriz polimérica de forma más estable y fuerte, por crecer la tensión superficial entre ambas fronteras de fases de ambos componentes. Debido, a que las naturalezas químicas del polímero y las fibras son compatibles, al ser ambas de carácter orgánico, el vínculo de ambas se establece, no únicamente, como un fenómeno mecánico, sino también, químico estructural.

La superficie exterior y lateral de las fibras tiene un aspecto bastante estable, uniforme, sin deshilados, cortes, fisuras e irregularidades o rugosidades, además, de no tener deformaciones considerables o desniveles de desconche, que pudieran, luego al conformar los materiales compuestos o colocar las fibras, que estas se debilitaran, o con ello, debilitaran al propio material obtenido.

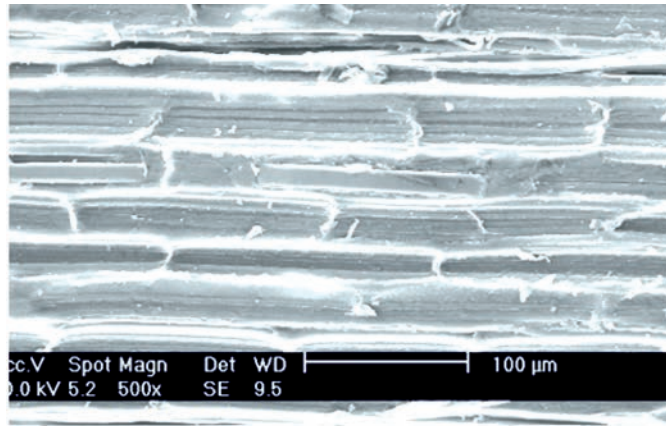


FIGURE 2. SEM at 550x of henequen fibers.
 FIGURA 2. MEB a 550x de la fibra de henequén.

Traction Strength Test

Prior to the test, the cross-sectional area (A) of the 22 fibers used as samples in the tensile strength test were determined because their geometry is close to that of a circular section, which depends of its diameter (d). The fibre diameters were measured using the optical microscope set, composed by a 100x optical microscope of the Carl Zeiss Jena brand, attached to a computer. In Figure 3, an example of the measurement in a fibre sample can be observed.

The tensile strength test was performed with a ZWEIGLE F 441 dynamometer. The distance between the jaws was set at 200 mm; an initial tension was applied with a counterweight of 50 g and a breaking speed of 177 mm/min, according to instructions of the standard NC: 1047/1983. It was made in a room at temperature of 25°C and with controlled constant humidity of 52%. Twenty-two fibers were taken as samples. The results of this test and diameter determination are shown in Table 1. As it can be seen, the average of tensile strength is 168.04 MPa and the average of elongation was 7.62%. These results are considered in the manufacturing of composite materials.

Ensayo de resistencia a la rotura

Previamente al ensayo, a las 22 fibras utilizadas como cuerpos de prueba en el ensayo de resistencia a la rotura de tracción, se les determinó su área transversal (A_t), por ser su geometría cercana a la de una sección circular, la cual, depende de su diámetro (d). La medición de los diámetros de las fibras, se realizó por medio del conjunto de microscopía óptica, compuesto por un microscopio óptico con 100x, de la marca Carl Zeiss Jena, acoplado a una computadora. En la Figura 3, se puede observar un ejemplo de la medición en una muestra de fibra.

El ensayo de resistencia a tracción se realizó con un dinamómetro modelo ZWEIGLE F 441. La distancia entre las mordazas se fijó en 200 mm, se aplicó una tensión inicial con un contrapeso de 50g y una velocidad de ruptura de 177 mm/min, Según las instrucciones de la norma cubana NC 1047: 1983. El local donde fue realizado tenía una temperatura de 25°C y humedad constante controlada del 52%. Se tomaron 22 fibras como cuerpos de prueba. Los resultados de este ensayo y de la determinación del diámetro se muestran en la Tabla 1. Como se puede observar, el valor medio del esfuerzo de rotura a la tracción es de 168,04 MPa, y la elongación media fue de 7,62%, estos valores, son considerados en el diseño del material compuesto.



FIGURE 3. Measuring the diameter of the henequen fibre.
 FIGURA 3. Medición del diámetro de la fibra de henequén.

Critical Length

In the case of fibrous compounds, they do not possess mechanical properties solely on the basis of fibre properties, but also, depending on how the applied loads in the matrix are transmitted to the dispersed phases or reinforcements. It is important, for the transmission of these loads, to consider the magnitude of the interfacial bond between the matrix and the fibers. This bond, in the presence of external tensile loads parallel to the fibers, ceases at the tips of the fibers, when this is the case with the shape of the reinforcements.

It is defined as a long critical of the fibre, that one which is necessary for an effective strengthening and increasing of rigidity of the composite material. This critical length, l_c , depends on the diameter of the fibre d , and its mechanical strength (maximum stress that resists the fibre before its final break) σ_f ; and the mechanical strength of the fibre-polymer junction (or the limit at shear rupture of the matrix) t_c , according to Equation 1. When a stress is applied to a fibre of length equal to the critical length, the maximum load is achieved in the center of the fibre. If the length of the fibre is increased, the fibre reinforcement becomes more effective, and otherwise, the fibre length is less than the critical length, the reinforcement is inefficient (Callister & Rethwisch, 2016). Therefore, a fibre having a length greater than the critical length should be chosen.

$$l_c = \frac{\sigma_f \cdot d}{2 \cdot \tau_i} \tag{1}$$

In order to calculate the critical length, nine samples were taken, considering the tensile stress average value (168.04 MPa) and the maximum value (274 MPa), as showed in Table 1. The objective is to obtain a critical length average and critical length maximum, for greater safety in the final choice of the fibre length value for the preparation of the composite materials. The critical length average is 11.98 mm, and the critical length maximum is 19.57 mm, which, if we take into account the dispersion, would increase to 27.89 mm, so that this value serves as a basis to define the value of the length of the henequen fibers, if desired long or short. The results are shown in Table 2.

Longitud crítica

En el caso de los compuestos fibrosos, estos no poseen características mecánicas en función únicamente de las propiedades de las fibras, sino también, en función de cómo se transmitan las cargas aplicadas de la fase matriz a las fases dispersas o refuerzos. Es importante, para la transmisión de estas cargas, considerar la magnitud de la unión interfacial entre la matriz y las fibras. Esta unión, bajo la presencia de cargas externas de tracción paralela a las fibras, cesa en las puntas de las fibras, cuando este sea el caso de la forma de los refuerzos.

Se define como largo crítico de la fibra, aquel que es necesario para que sea efectivo el fortalecimiento y aumento de la rigidez del material compuesto. Este largo crítico, l_c , depende, del diámetro de la fibra d , y de su resistencia mecánica (tensión máxima que resiste la fibra antes de su ruptura) final σ_f ; y de la resistencia mecánica de la unión fibra-polímero (o el límite a rotura por cizallamiento de la matriz) t_c , de acuerdo con la Ecuación 1. Cuando se aplica un esfuerzo a una fibra con longitud igual a la longitud crítica, la carga máxima se consigue en el centro de la fibra. Si la longitud de la fibra se incrementa, el reforzamiento de la fibra se hace más efectivo, y en caso contrario, la longitud de la fibra es menor que la longitud crítica, el reforzamiento es ineficiente (Callister y Rethwisch, 2016). Por lo tanto, se debe escoger un valor de fibra mayor al de la longitud crítica.

$$l_c = \frac{\sigma_f \cdot d}{2 \cdot \tau_i} \tag{1}$$

Para hacer el cálculo de la longitud crítica, se tomaron nueve (9) muestras, considerando el valor medio de los esfuerzos (168,04 MPa) y el valor máximo (274 MPa), como mostrado en la Tabla 1. El objetivo, es obtener una longitud crítica media y una longitud crítica máxima, para mayor seguridad en la elección final del valor del largo de la fibra para la elaboración del material compuesto. La longitud crítica media es de 11,98 mm, y la longitud crítica máxima es de 19,57 mm, la cual, si tenemos en cuenta la dispersión, aumentaría a 27,89 mm, por lo que dicho valor sirve de base para definir el valor de la longitud de las fibras de henequén, si se desean largas o cortas. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

TABLE 1. Results of Fibre Tensile Strength Test
TABLA 1. Resultados de los ensayos de tracción de las fibras

Fibre	Breaking load	Fibre diameter	Crosssectional area	Tensile stress		Strain
	[kg]	[mm]	[mm ²]	[kg/mm ²]	[MPa]	
1	0.731	0.2150	0.04	20.15	197.42	11.90
2	0.372	0.1500	0.02	21.06	206.40	6.70
3	0.610	0.2100	0.03	17.62	172.68	4.20
4	0.82	0.2700	0.06	14.01	137.34	7.70
5	1.569	0.3100	0.08	20.8	203.8	14.70
6	1.000	0.2650	0.06	18.4	177.77	13.90
7	0.522	0.2050	0.03	15.8	155.07	4.40
8	1.507	0.280	0.06	23.63	231.62	9.50

Fibre	Breaking load	Fibre diameter	Crosssectional area	Tensile stress		Strain
	[kg]	[mm]	[mm ²]	[kg/mm ²]	[MPa]	[%]
9	0.78	0.2450	0.05	16.66	163.27	870
10	1.759	0.3750	0.11	15.93	156.16	13.60
11	0.8	0.3300	0.09	10.31	101.00	6.20
12	0.58	0.2150	0.04	16.01	156.91	4.90
13	0.474	0.1550	0.02	25.13	246.30	5.20
14	0.952	0.280	0.06	14.93	146.32	5.00
15	0.752	0.2700	0.06	13.14	12878	8
16	0.670	0.2750	0.06	11.29	110.60	2.40
17	0.68	0.280	0.06	10.74	105.28	6.50
18	0.742	0.1900	0.03	26.18	256.60	820
19	0.924	0.2050	0.03	2801	274.49	9.20
20	0.474	0.2250	0.04	11.93	116.8	4.00
21	1.049	0.3200	0.08	13.05	127.8	880
22	0.88	0.280	0.06	12.67	124.19	3.60
Average	0.877	0.2532	0.05	17.15	16804	7.62
Standard deviation	0.3590	0.0570	0.0230	5.1921	50.82	3.4905

TABLE 2. Results of Fibre Bond Strength Test and Determination of Critical Length

TABLA 2. Resultados del ensayo de resistencia al esfuerzo interfacial de las fibras y cálculo de la longitud crítica

Samples	Interfacial load	Contact length	Fibre diameter	Contact area	Interfacial strength Average		Critical length Maximum	
	[kg]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[kg/mm ²]	[MPa]	[mm]	[mm]
	1	0.414	3.00	0.300	2.8	0.15	1.4357	17.56
2	0.664	3.00	0.250	2.36	0.28	2.7631	7.60	12.42
3	0.631	3.00	0.300	2.8	0.22	2.18	11.52	18.8
4	0.85	3.00	0.225	2.12	0.38	3.7221	5.08	8 30
5	0.58	3.00	0.38	3.63	0.16	1.588	20.46	33.43
6	0.720	3.00	0.360	3.39	0.21	2.087	14.54	23.75
7	0.769	3.00	0.28	2.64	0.29	2.872	83	13.45
8	1.474	3.00	0.540	5.09	0.29	2.897	15.98	26.10
9	0.735	3.00	0.250	2.36	0.31	3.058	6.8	11.22
Average	0.76	3.00	0.32	3.02	0.26	2.50	11.98	19.57
Standard deviation	0.28	0.00	0.09	0.8	0.07	0.70	5.09	8 31

Bond Strength by Load Test

To determine fibre-matrix interfacial stress resistance, standardized test methods do not exist. The specific details of how to perform each test varies with each researcher, so there are only general procedures for each method. Single-fibre test methods provide an alternate form for quantifying fibre-polymer bond. Several methods have been proposed,

Ensayo de desprendimiento por tensión

Para determinar la resistencia al esfuerzo interfacial fibra-matriz, no existen métodos de pruebas normalizados. Los detalles específicos de cómo llevar a cabo cada prueba, varía con cada investigador, por lo que solo existen procedimientos generales para cada método. Los métodos de prueba de una sola fibra ofrecen una forma alterna para cuantificar la adhesión fibra-polímero. Varios

but the majority can be reduced to three basic variants: fragmentation (by tension or compression) of a single embedded fibre, micro-detachment and detachment (by push or pull) of a single fibre

The method employed is the tension release of a single fibre, where the fibre has a contact length embedded with the matrix material with its free ends, see Figure 4. At the free end, a load is applied which increases until the fibre is released from the matrix. The matrix can be in the form of a disk, a cylinder or a drop. For this test, the drop was chosen, for being the most common.

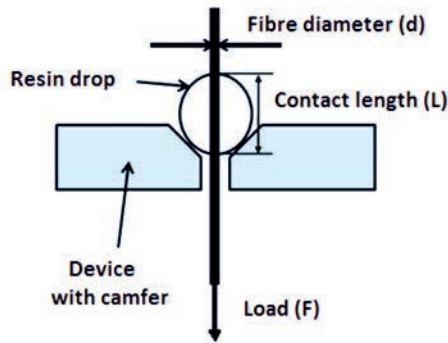


FIGURE 4. Sketch of specimen for Bond Strength by Load Test and the Device with Chamfer Hole
 FIGURA 4. Probeta del ensayo de desprendimiento de fibra por tensión y el dispositivo con agujero biselado.

The resistance to the interfacial shear stress of the fibre-polymer (τ_i), Equation (2), depends on the maximum load (F) measured just before the separation of the fibre from the matrix and the side or fibre contact area (A_c), which depends on the diameter of the fibre (d) and the contact length (L) (Carrillo, 1998).

$$\tau_i = \frac{F \cdot 9,81}{A_c} = \frac{F \cdot 9,81}{\pi \cdot d \cdot L} \quad (2)$$

The nine sketches for specimens used for the critical length measurement were used for the measurement of bond strength. The force was measured using a ZWEIGLE F 441 dynamometer, following the procedure below. The end of the sketch for specimen, corresponding to the resin drop rests on a bevelled hole of a device, shown in Figure 4, which is fixed on the upper jaw of the dynamometer, meanwhile the other end of the fibre is held by the lower jaw of the dynamometer. Special care was taken in the handling and holding of the fibre at the time of application of the load to avoid its rupture. The values of the test are shown in Table 2.

Composite Materials Manufacturing Processes

Four composite materials were manufactured; one of pure resin for comparison and another three with different percentages of fibers, the fibre proportions were of 15, 20 and 25%. The used mold for the manufacture of the composites consists of two parts formed by AISI 1020 steel sheets, 12 mm thick. It was cold compression molded. An image of the mold can be seen in Figure 5.

métodos han sido propuestos, pero la mayoría puede reducirse a tres variantes básicas como: fragmentación (por tensión o por compresión) de una sola fibra embebida, microdesprendimiento y desprendimiento (por empuje o por tensión) de una sola fibra.

El método empleado, es el desprendimiento por tensión de una sola fibra, donde, la fibra tiene una longitud de contacto embebida con el material de la matriz, con sus extremos libres, ver Figura 4. Al extremo libre se le aplica una carga de tensión que se incrementa hasta que la fibra es desprendida de la matriz, esta puede ser en forma de disco, cilindro o una gota, para este ensayo se escogió la gota, por ser la más común.

La resistencia interfacial al esfuerzo interfacial cortante de la fibra-polímero (τ_i), depende, de la carga máxima (F) medida justo antes de la separación de la fibra de la matriz y el área lateral o de contacto fibra-matriz (A_c), la cual, depende del diámetro del fibra (d) y la longitud de contacto (L), mediante la Ecuación (2) (Carrillo, 1998).

$$\tau_i = \frac{F \cdot 9,81}{A_c} = \frac{F \cdot 9,81}{\pi \cdot d \cdot L} \quad (2)$$

Las nueve (9) probetas que se usaron para la medición de la longitud crítica, fueron utilizadas para la medición de la fuerza o carga de desprendimiento por tensión. La fuerza fue medida, con un dinamómetro modelo ZWEIGLE F 441, siguiendo el siguiente procedimiento: El extremo de la probeta correspondiente a la gota de resina, se apoya en un agujero biselado de un dispositivo, mostrado en la Figura 4, el cual, se fija en la mordaza superior del dinamómetro. Mientras, que el otro extremo de la fibra es sujetado por la mordaza inferior del dinamómetro. Se tomó cuidado especial en el manejo y sujeción de la fibra en el momento de aplicación de la carga para evitar su ruptura. Los valores del ensayo se aprecian en la Tabla 2.

Fabricación de los compuestos

Fueron fabricados cuatro (4) materiales compuestos; uno de resina pura para comparación y otros tres (3) con diferentes porcentajes de fibras, las proporciones fueron de 15, 20 y 25% de fibra. El molde empelado para la fabricación de los compuestos, consta de dos partes conformados por planchas de acero AISI 1020, de 12 mm de espesor y fue moldeado por compresión en frío, una imagen del molde se puede apreciar en la Figura 5.



FIGURE 5. Mold Used for Manufacture of Composite Materials
FIGURA 5. Molde empleado para fabricación de los materiales compuestos.

Always, at the beginning of each molding, the mold release agent is impregnated in the mold. Cobalt octoate 0.3% is added to the polyester resin to activate it. While the activated resin is catalyzed, there is a time space of about 30 minutes to complete the molding, before the gelling process begins. The henequen fibers were separated into separate yarns which were cut for handling in pieces of 80 mm. The resin is then mixed with fibers that are randomly distributed in 15, 20 and 25% of the total volume of the mold. In Figure 6, images of the manufacturing process can be observed.

When the mold is closed, it is placed in the hydraulic press, charging 5 tons of loads for 24 hours. After this time, the mold was released from the press and opened, the plate being demolded. The plates were placed in a dry and ventilated place to complete the curing process.

Siempre, al inicio de cada moldeo, se impregna en el molde el agente desmoldeante. A la resina de poliéster se le añade un 0,3% de octoato de cobalto para activarla, hay que tener en cuenta, que a la vez que la resina activada es catalizada, se tiene un espacio de tiempo de cerca de 30 minutos para terminar el moldeo, antes de que comience el proceso de gelificación. Las fibras de henequén, fueron separadas en hilos independientes que se cortaron para su manipulación en trozos de 80 mm de largo. Luego, se mezcla la resina con las fibras que se distribuyen de forma aleatoria en 15, 20 y 25% del volumen total del molde. En la Figura 6, se pueden observar imágenes del proceso de fabricación.

Al cerrarse el molde, este es colocado en la prensa hidráulica, aplicándose 5 toneladas de carga durante 24 horas. Transcurrido este tiempo, se liberó el molde de la prensa y se abrió, siendo desmoldeada la placa. Las placas fueron colocadas en un lugar seco y ventilado para que culmine el proceso de curado.



FIGURE 6. Placement and impregnating the fibers with the resin into the mold.
FIGURA 6. Colocación e impregnación de las fibras con la resina en el molde.

Mechanical Test

Different mechanical tests were performed to the materials fabricated with different percentages of henequen

Ensayos mecánicos

A los materiales fabricados con diferentes porcentajes de fibra de henequén y al material de polímero puro se le realizaron dife-

fiber and to the pure polymer material,. The tensile test was performed in the same machine where the tensile tests of the fibers were performed. The hardness test was performed with the LX-D Shore durometer, used for tests on elastomers and plastics. The durometer range is 0-90 HD and the test was performance under the conditions established by Cuban standard ISO 868/2000. Six measurements were performed for each of four material variants; the hardness values obtained were averaged. The impact strength test was performed on the LEIPZIG impact machine, with an impact mass of 6.784 kg and a 388 mm arm length. The test bodies were manufactured according to ASTM D 256. The dimensions were: thickness 3 mm, width: 15 mm and length: 63 mm. Six specimens were tested for each material and the values obtained in each test were averaged.

RESULTS AND DISCUSSION

In Figure 7, it is observed the strong polymer-fibre mechanical bond, due to the roughness and irregularity of the fibre surface and, due to that and to the strong bond between both, there is no tearing or fraying, nor dismemberment or detachment of it. That ensures ductile but not fragile characteristics to the material.

The results of tensile strength test were plotted in the graphic of Figure 8, to compare the different values obtained in relation to the fibre percentage of each material. The composite variants with 15, 20 and 25% exhibit superior tensile strength to the pure polyester resin.

rentes ensayos mecánicos. El ensayo de tracción fue realizado en la misma máquina donde fueron realizados los ensayos de tracción de las fibras. El ensayo de dureza se realizó con el durómetro LX-D Shore, usado para ensayos en elastómeros y plásticos, el rango del durómetro es de 0-90 HD y se realiza bajo las condiciones dictadas por la Norma Cubana ISO 868: 2000. Fueron realizadas seis mediciones por cada material y se promediaron los valores de dureza, es decir, para la matriz pura y las tres variantes de material compuesto con diferentes volúmenes de fibra. El ensayo de resistencia al impacto fue realizado en la máquina de impacto marca LEIPZIG, con masa de impacto de 6,784 kg con un largo del brazo de 388 mm. Los cuerpos de prueba, fueron fabricados según la norma ASTM D 256: 2010, donde, las dimensiones escogidas fueron: grosor 3 mm, ancho: 15 mm y largo: 63 mm. Fueron ensayadas seis probetas por cada uno de los materiales y se promediaron los valores obtenidos en cada ensayo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 7, se observa la fuerte unión mecánica polímero-fibra, gracias a la rugosidad e irregularidad de la superficie de estas. Debido a esto y al fuerte enlace entre ambos, no hay desgarre, ni deshilamiento, ni desmembramiento o desprendimiento de las mismas. Lo que asegura, que no se dan características frágiles del material, sino dúctiles.

Los resultados del ensayo de resistencia a la tracción se muestran en la Figura 8, para comparar los diferentes valores obtenidos en relación al porcentaje de fibra de cada material. Las variantes de material compuesto fibroso de henequén con 15, 20 y 25% presentan una resistencia a la tracción superior al polímero poliéster.

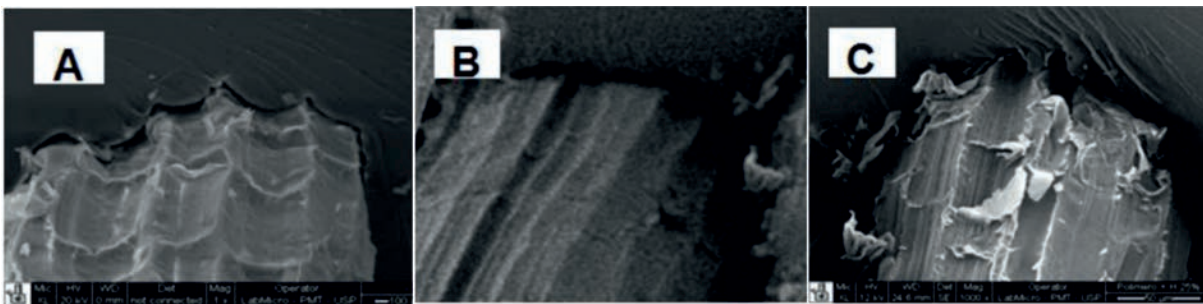


FIGURE 7. SEM at 1000x of composite materials with 15% (A), 20% (B) and 25% (C) of henequen fibers.
 FIGURA 7. MEB a 1000x de las variantes de compuesto con 15% (A), 20% (B) y 25% (C) de henequén.

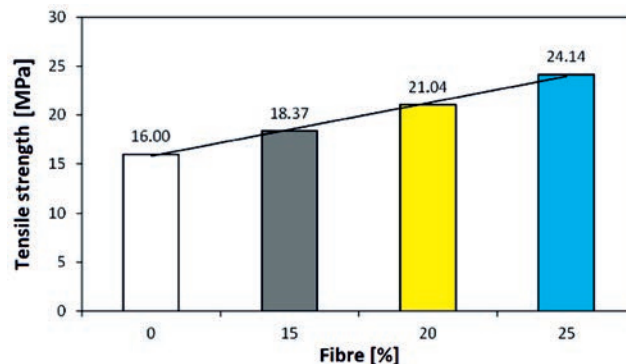


FIGURE 8. Tensile Strength of Composite Materials with 15, 20 and 25% of Henequen Fibers
 Figura 8. Resistencia Al Esfuerzo De La Tracción De Los Materiales Compuestos Fabricados.

The tensile strength increases linearly with the increase of the percent of henequen fibers. The highest value of tensile strength is 24.14 MPa and corresponds to the variant with 25% henequen. The increase in tensile strength is due to the fact that the tensile strength of a fibre, whose average value is 168 MPa, is higher than that of the polymer resin. The loads are transmitted due to the existence of a good polymer-fibre mechanical bonding and the reinforcement of the oriented fibers in the direction of the external load. As negative phenomena are: that the fibers behave as an imperfection or defect, and the influence of weakening produced by the fibers oriented transversely to the external force, since no effects of reduction of the resistance of 15% to 25% of henequen fibers are observed.

The hardness test results are shown in the graphic of Figure 9, to compare the values of each material. The variants with 15, 20 and 25% of henequen fibers have hardness lower than the polyester polymer resin. The hardness decreases in a linear manner with the increase of the percentage of henequen fibers. The lowest value of 72 HD corresponds to material with 25% of fiber. The reason for this weakening is due to the prevalence of negative phenomena: henequen fibers have low hardness values and their mechanical fibre-polymer bonding does not provide rigidity to the composite.

The impact strength test result can be seen in the graphic of Figure 10. The composite materials with 15, 20 and 25% henequen fibers have superior impact strength than the pure polymer variant. The impact strength increases to 24.57 kJ/m² for the material with 20% of fibers and decreases for the variant with 25% of fibers.

La resistencia a la tracción, aumenta de manera lineal con el aumento del por ciento de fibras de henequén, cuyo mayor valor de resistencia a la tracción es de 24,14 MPa, y corresponde, a la variante de material con 25% de henequén. El incremento de la resistencia a la tracción, se debe, a que la resistencia a la tracción de una fibra, cuyo valor promedio es de 168 MPa, es mayor que la del polímero; dichas cargas se transmiten gracias a la existencia de una buena unión mecánica polímero-fibra y el reforzamiento de las fibras orientadas en la dirección del esfuerzo externo. Como fenómenos negativos se tienen: que las fibras se comportan como una imperfección o defecto y la influencia de debilitamiento producido por las fibras orientadas transversalmente al esfuerzo externo, pues no se observan efectos de rebaja de la resistencia del 15% al 25% de fibras de henequén.

Los resultados del ensayo de dureza se aprecian en el gráfico de la Figura 9, donde se comparan los valores obtenidos para cada material. Las variantes de material compuesto fibroso con 15, 20 y 25% de henequén presentan una dureza inferior al polímero poliéster. La dureza, disminuye de manera lineal con el aumento del por ciento de fibras de henequén, correspondiendo el menor valor de 72 HD al material de 25% de fibras. La causa de este debilitamiento se debe, a la prevalencia de los fenómenos negativos: las fibras de henequén presentan bajos valores de dureza y su unión mecánica fibra-polímero no aporta rigidez al compuesto.

El resultado de los ensayos de resistencia al impacto se puede ver en el gráfico de la Figura 10. Los materiales con 15, 20 y 25% de fibras de henequén presentan una resistencia al impacto superior al de la variante del polímero puro. La resistencia al impacto, aumenta hasta 24,57 kJ/m² para el material con 20% de fibras y disminuye para la variante con 25% de fibras.

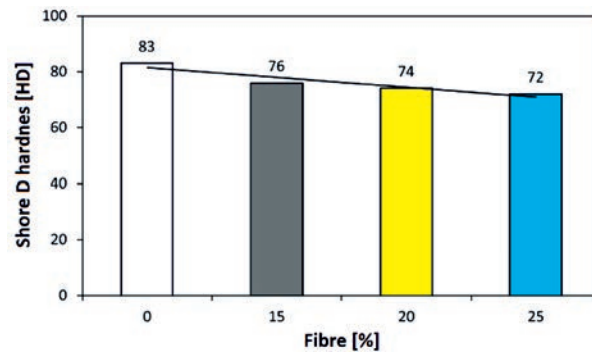


FIGURE 9. Shore D Hardness of Composite Materials with 15, 20 and 25% of Henequen Fibers
 FIGURA 9. Dureza del compuesto con 15, 20 y 25% de henequén.

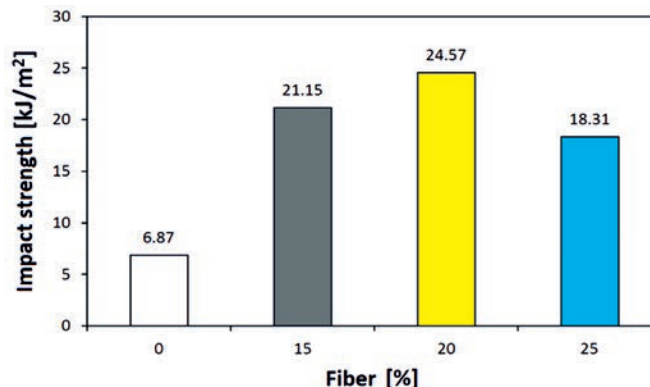


FIGURE 10. Impact Strength of Composite Materials with 15, 20 And 25% of Henequen Fibers
 FIGURA 10. Resistencia al impacto del compuesto con 15, 20 y 25% de henequén.

To understand the causes of increased strength for 20% fibre material, and the consequent decrease for 25% fibers, it is necessary to know the negative and positive phenomena. Positive phenomena we have that: the fibre-polymer interface is strong due to surface irregularities, which do not provide rigidity. The fibers have an average elongation of 7.62% and most are oriented transversely in relation to the crack propagation, in such a way that the fibers provide a group of resistance components, such as tensile and bending, and an increase in the plasticity index, opposing the rapid destruction of the fibrous compound. As negative phenomena, we have that the fibers are still considered as defects and imperfections in the polymer matrix. Therefore, for the composite material with 20% henequen fibers, greater contribution of the positive than the negative phenomena is achieved.

In the case of the variant with 25% henequen fibers, the existence of an excess of fibers leads to a decrease in the percentage of the polymer matrix, causing a decrease in the plastic and ductile behavior of the composite, as well as the weakening of the bonding surface in the polymer-fibre interface bond, which makes it possible to rupture this bond at a lower impact value.

In the material with 15% of fibre addition, the insufficient fibre presence significantly influences, which leads to the weakening of the bonding surface at the polymer-fibre interface, making it possible to rupture this bond at a lower impact value. However, the existence of a greater percentage of the polymer matrix, which contributes to a plastic and ductile behavior of the composite, which opposes to the rapid destruction of it, makes this variant present a higher value of impact resistance than the variant with 25% fibre.

The results were compared with a previously work performed by (Rodríguez, *et al.*, 2014) for materials with 0, 10, 20 and 30% henequen fibers, similar to those used here, and tensile strength values of 11.95, 5.01, 18.27 and 14.84 MPa, respectively were obtained. It can be seen that the matrix used in the composites analyzed and characterized is 33.8% more resistant, for that reason the material with 20% of fibers presents 21.04 MPa of tensile strength, representing a 15.1% increase compared to the previous study material. The other concentrations can not be compared because they are not the same in both materials, although the values in the fiber concentration between 15 and 25% are demonstrated to increase the tensile strength. It was not the same for the concentrations of 10 and 30%, which presented inferior values to those obtained for the 20% of fibers.

CONCLUSIONS

- The henequen fibers were characterized by scanning electron microscopy, which showed topographic irregularities of their surface and allows establishing mechanical bonds between these and polymer matrices in a stable and strong manner. This gives the fibers very good properties for their use as reinforcing elements combined with a thermostable polymer resin matrix. Also, tensile strength tests were performed,

Para entender las causas del aumento de la resistencia con el aumento del porcentaje de fibras hasta el 20% de fibras y la consiguiente disminución para 25% de fibras, es necesario conocer los fenómenos positivos y negativos presentes. De los fenómenos positivos se tiene que: la interface fibra-polímero es fuerte por las irregularidades de la superficie, que no proporcionan rigidez. Las fibras, cuentan con una elongación promedio de 7,62 % y gran parte están orientadas transversalmente en relación a la propagación de la grieta, de tal manera que las fibras aportan un grupo de componentes de resistencia, como a la tracción y a la flexión y un aumento del índice de plasticidad, oponiéndose a la destrucción rápida del compuesto. De los fenómenos negativos, se tiene, que las fibras no dejan de ser consideradas defectos e imperfecciones en la matriz polimérica. Por tanto, para el material compuesto con 20% de fibras de henequén, se logra el mayor aporte de los fenómenos positivos con respecto a los negativos.

En el caso de la variante de material con 25% de fibras de henequén, influye significativamente, la existencia de un exceso de fibras que conlleva a la disminución del porcentaje de la matriz polimérica, provocando la disminución del comportamiento plástico y dúctil del compuesto, al igual que el debilitamiento de la unión superficial de enlace en la interface polímero-fibra, que posibilita la ruptura de esta unión a menor valor de impacto.

En el material con 15% de adición de fibra, influye significativamente la insuficiente presencia de fibras, lo que conlleva al debilitamiento de la unión superficial de enlace en la interface polímero-fibra, posibilitando la ruptura de esta unión a menor valor de impacto. Sin embargo, la existencia de un porcentaje mayor de la matriz polimérica, que aporta un comportamiento plástico y dúctil al compuesto, que se opone a la destrucción rápida del mismo, hace que esta variante presente un valor mayor de resistencia al impacto que la variante con 25% de fibras.

Los resultados aquí mostrados fueron comparados con un estudio realizado previamente por otro autor (Rodríguez-Soto *et al.*, 2014), para un material con 0, 10, 20 y 30% de fibras de henequén, similares a las usadas aquí, se obtuvieron valores de resistencia a la tracción de 11,95; 5,01; 18,27 y 14,84 MPa, respectivamente. Se puede apreciar que la matriz utilizada en los compuestos analizados y caracterizados es 33,8% más resistente que la empleada anteriormente, por ese motivo el material con 20% de fibras presenta 21,04 MPa de resistencia a tracción, lo que representa un 15,1% de aumento en comparación con el material del estudio previo. Las otras concentraciones no pueden ser comparadas por no ser las mismas en ambos materiales, aunque se demuestra los valores en la concentración de fibra entre el 15 y el 25% son los que aumentan la resistencia a la tracción. No siendo así, las concentraciones de 10 y 30%, que presentaron valores inferiores los obtenidos para el 20% de fibras.

CONCLUSIONES

- Las fibras de henequén, fueron caracterizadas mediante microscopía electrónica de barrido, que mostró las irregularidades topográficas de su superficie, lo que permite, establecer vínculos mecánicos entre estas y matrices poliméricas de forma estable y fuerte. Lo cual, otorga a las fibras, muy buenas características para su empleo

obtaining an average value of 168.04 MPa and an average elongation of 7.62%. The critical length obtained was 11.98 mm and the average interfacial stress was 2.50 MPa.

- Considering these parameters, three composites with 15, 20 and 25% fibre and a polymer matrix were manufactured. The manufacturing process was cold molded and under pressure of 5 tons. The materials were subjected to different tests to identify the difference among them. The tensile test showed that the material with 25% of fibre recorded the maximum value with 24.14 MPa, due to the increase of the contribution of the fibers oriented in the longitudinal of the load, being more significant the action of the fibers in the transversal direction to the load.
- The material with 20% fibre had the greatest impact resistance with a value of 24.54 kJ/m², due to the matrix is able to keep the cohesion of the fibers and transmit the loads.
- With the increase in the percentage of henequen fibers, the hardness values decrease from 76 to 72 HD with the increase of the fibre from 15% to 25%, due to the fibre has low values of hardness and high plasticity, in addition to providing a mechanical bond with the matrix, which prevents it from being deformed.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge the support provided by CAPES of Brazil, project "Development of nanocomposite materials of thermoplastic matrix reinforced with Cuban organophilic bentonite and brazilian clays". To the Department of Metallurgical Engineering and Materials of the Polytechnic School of the University of Sao Paulo, Brazil, for performing impact strength and SEM test. By conducting impact and MEB tests. To the Department of Construction of Machinery of the Polytechnic Institute "José Antonio Echeverría".

como elementos de refuerzo combinados con una matriz polimérica termoestable. La resistencia máxima (media) a la rotura por tracción es de 168,04 MPa y una elongación media de 7,62%. La longitud crítica obtenida fue de 11,98 mm y el esfuerzo interfacial medio es de 2,50 MPa.

- Considerando estos parámetros, fueron fabricados tres (3) materiales compuestos, con las variantes de 15, 20 y 25% de fibra, con una matriz polimérica, con moldeado en frío y bajo presión de 5 toneladas. Los materiales, fueron sometidos a diferentes ensayos para conocer la diferencia entre ellos. El ensayo de tracción mostró como resultado que el material 25% de fibra, registró el máximo valor con 24,14 MPa, debido, al incremento del aporte de las fibras orientadas en la longitudinal de la carga, siendo, más significativa la acción de las fibras en la dirección transversal a la carga.
- El material con 20% de fibra tuvo la mayor resistencia al impacto con un valor de 24,57 kJ/m², debido, a que la matriz logra cohesionar las fibras y transmitir las tensiones.
- Con el aumento del porcentaje de fibras de henequén, los valores de dureza disminuyen de 76 HD para 72 HD con el aumento del porcentaje de fibra de 15% para 25%, debido, a que la fibra presenta bajos valores de dureza y alta plasticidad, además de proporcionar una unión mecánica con la matriz, que impide ser deformada.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) de Brasil, proyecto "Desenvolvimento de materiais nanocompositos de matriz termoplástica reforçados com bentonita organofílica Cubana e argilas do brasil". Al Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, por garantizar la realización de los ensayos de impacto y MEB. Al Departamento de Construcción de Maquinaria de la Facultad de Ingeniería Mecánica del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.

REFERENCES/ REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SWOLFS, Y; GORBATIKH, L; I. VERPOEST: "Fibre hybridisation in polymer composites: A review", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 67, pp. 181-200, 2014.
- GARCIA, G.P.; F.R.V. DIAZ.; J.L.VALIN; A.C. KIELING; A.R. TORRES: "Evaluation of Composite Materials With Fiber of Curauá Pineapple (*Ananas Erectifolius*)", *Review of Research*. v.4, p.1-7, 2015. ISSN: 2249-894X.
- RODRÍGUEZ, S.A.A.; J.L.VALIN; D. DIAZ; M. V FONSECA; L.M.S.A. BORGES: "Desarrollo de un material compuesto de fibras de henequén utilizando una matriz termofija", *Ingeniería Mecánica* (Online) SciELO. v.17, p.263-271, 2014. ISSN 18155944.
- DÍAZ, D. B; D.D. FORCELLEDO; M.M. MESTRE; J.L. VALIN: "Comportamiento mecánico de fibras de henequén cubano e interfase con polímeros termoplásticos del tipo poliolefina". *Ingeniería Mecánica* (Online) SciELO. v.18, p.148-157, 2015. ISSN 18155944.
- RODRÍGUEZ, S.A.A; L.M.S.A. BORGES; J.L. VALIN; D. DIAZ: "Fabricación de compuesto de matriz epoxi reforzado con fibras largas de henequén orientadas aleatoriamente". *Ingeniería Mecánica* (Online) SciELO. v.18, p.122-128, 2015. ISSN 18155944.
- ORAMAS, G.G; M.S. DEL CASTILLO, SA GARCÍA: "Efecto de diferentes tipos de semilla en la propagación de *Agave fourcroydes* Lem. variedad 'Sac Ki' sobre indicadores relacionados con el crecimiento in vitro". *Biotecnología Vegetal*, v14, n 3, p. 169-178, 2014. ISSN 2074-8647.
- ARTHANARIESWARAN, V; A KUMARAVEL; M. KATHIRSELVAM: "Evaluation of mechanical properties of banana and sisal fiber reinforced epoxy composites: Influence of glass fiber hybridization", *Materials and Design*, v. 64, n. 0, pp. 194-202, 2014.

- MILANESE, A. C.; M. O. H. CIOFFI; H. J. C VOORWALD: "Thermal and mechanical behaviour of sisal/phenolic composites", *Composites Part B: Engineering*, v. 43, n. 7, pp. 2843–2 850, 2012.
- FERNANDES, E.M.; J.F. MANO; R.L. REIS: "Hybrid cork–polymer composites containing sisal fibre: Morphology, effect of the fibre treatment on the mechanical properties and ensile failure prediction", *Composite Structures*, v. 105, n. 0, pp. 153–1 62, 2013.
- RAMZY, A.; D. BEERMANN; L. STEUERNAGEL: "Developing a new generation of sisal composite fibres for use in industrial applications", *Composites Part B: Engineering*, v. 66, n. 0, pp. 287–2 98, 2014.
- ZHAO, X.; R.K. LI, S.L. BAI: "Mechanical properties of sisal fiber reinforced high density polyethylene composites: Effect of fiber content, interfacial compatibilization, and manufacturing process", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 65, n. 0, pp. 169–1 74, 2014.
- DAI, K.; L. SONG; S. JIANG; B. YU; W. YANG; R.K.K. YUEN; Y. HU: "Unsaturated polyester resins modified with phosphorus-containing groups: Effects on thermal properties and flammability", *Polymer Degradation and Stability*, Volume 98, Issue 10, October 2013, Pages 2033–2040, ISSN 0141-3910, <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.07.008>.
- SANYANG M.L.; S.M. SAPUAN; M. JAWAID; M.R. ISHAK; J. SAHARI: "Recent developments in sugar palm (*Arengapinnata*) based bio-composites and their potential industrial applications: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.54, 2016, pages 533–549, ISSN: 1364-0321 <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.037>.
- KHALIL H.P.S.A.; N.A. SRIAPRILIA; A.H. BHAT; M. JAWAID; M.T. PARIDAH; D. RUDI: "A *Jatropha* biomass as renewable materials for biocomposites and its applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.22, 2013, pages 667–685, ISSN: 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.036>.
- ISLAM, M.S.; N.A.B. HASBULLAHA; M. HASANB; Z.A. TALIBC; M. JAWAIDD; M.K.M. HAAFIZ: "Physical, mechanical and biodegradable properties of kenaf/coirhybrid fiber reinforced polymer nanocomposites", *Materials Today Communications*, v. 4, 2015, pages 69–76, ISSN: 2352-4928, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mtcomm.2015.05.001>.
- USTIMENKO, B.G.V: *El cultivo de plantas tropicales y subtropicales*. 1982: Editorial MIR.
- STANDARD NC: 1047/1983: "Determination of the resistance to the break and of the elongation in the traction of the yarns. Testing method".
- CALLISTER, W.D. & RETHWISCH, D. G: *Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução*. Nona Edição. 2016, LTC, 912, Brasil, 2016.
- CARRILLO, L.L.F: "Modificación de las propiedades interfaciales en materiales compuestos polietileno de Alta densidad-fibra de henequén", *División de Ciencias Básicas e Ingeniería*. 1998, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa: México. p. 64.
- STANDARD ISO 868/2000. "Plastics and Ebonite".
- STANDARD ASTM D 256. "Standard method of test for impact resistance of plastic and electrical insulating materials".

Received: 22/03/2017.

Approved: 11/09/2017.

Yosvani Guerra-Silva, MSc Ing in Cuban Company of Airports and Aeronautical Services, S.A. Technical Direction Avenida Independencia y Final, Rancho Boyeros, Havana, Cuba. E-mail: yguerra@mecanica.cujae.edu.cu

José Luis Valin-Rivera, E-mail: jose.valin@pucv.cl

María Elena Fernández-Abreu, E-mail: mary@mecanica.cujae.edu.cu

Hélio Wiebeck, E-mail: hwiebeck@usp.br

Alexander Alfonso-Alvarez, E-mail: aalfonsoal@usp.br

Francisco Rolando Valenzuela-Díaz, E-mail: frvrdiaz@usp.br

Edison Gonçalves, E-mail: edison@usp.br

Francisco Jesús Mondelo-García, E-mail: mondelo@mecanica.cujae.edu.cu

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.