

Análisis y solución de avería del acoplamiento del sinfín de fondo de la Bañera de una Planta de Plástico Mixto.

R. Goytisol Espinosa, J. G. Noa Águila, A. Fernández Cañizares.

*Facultad de Mecánica. Universidad de Cienfuegos. Carretera a Rodas km 4, Cienfuegos.
Teléfono: 22 962. E-mail: ragoyti@fmec.ucf.edu.cu

(Recibido el 10 de Noviembre de 2004, aceptado el 15 de Enero de 2005).

Resumen.

En el trabajo se realizó una investigación para esclarecer las causas de la avería del acoplamiento del sinfín de fondo de la bañera de una planta de plástico mixto. En la misma se concluyó que las causas fundamentales de las obstrucciones del sinfín de fondo son el hecho de que el sinfín de elevación de la bañera tiene una capacidad cuatro veces menor que el sinfín de fondo, lo que provoca que el material se acumule en el fondo de la bañera y por otro lado la comunicación entre el sinfín de fondo y el de elevación se produce a través de un tubo vertical de capacidad reducida, que constituye también un cuello de botella. Se modificó la relación de transmisión de la cadena del accionamiento del sinfín de elevación para elevar su velocidad e igualar la capacidad de transportación de ambos sinfines y se eliminó el tubo de conexión entre los mismos. El acoplamiento se fabricó de plástico poliamídico, lográndose una adecuada resistencia.

Palabras claves: Bañera de plástico, transportadores sinfín, acoplamiento dentado.

1. Introducción.

En el mes de Mayo del año 2002 se puso en explotación la Planta Recuperadora de Plástico Mixto en Cienfuegos, comprada en España por la Empresa de Recuperación de Materias Primas de esta Provincia a la Firma MAYPER, Materias Primas y Periféricos para la industria del Plástico. S.L. La Planta está compuesta en esencia por tres Módulos [5]:

- Módulo de Trituración, integrado básicamente por un molino molidor de alta velocidad.
- Módulo de Separación, compuesto por la bañera para el lavado del plástico, la cual está concebida para la separación de los elementos menos densos que flotan en la misma y son extraídos a través de una noria de cangilones ubicada en su porción superior y para la extracción de los elementos mas pesados depositados en el fondo de la bañera, a través de un conjunto de dos transportadores sinfín, uno horizontal, de fondo y otro inclinado, de elevación y descarga.
- Módulo de Secado, integrado por una centrífuga para el secado de los materiales plásticos de recuperación.

Desde las primeras horas de explotación dicha Planta ha presentado continuas dificultades, primero con el Molino Triturador, las cuales fueron analizadas y resueltas en el trabajo [3], y posteriormente con el

Módulo de Separación. Dicho Módulo ha presentado dificultades producto de reiteradas obstrucciones del plástico, lo que obligaba a los operarios a realizar frecuentes paradas para extraer, con palas, el material acumulado en el fondo de la bañera que no podía ser extraído por el sinfín de elevación y descarga.

Esta situación hizo crisis a principios del año 2003, cuando la obstrucción fue tan violenta que, provocó la rotura del acoplamiento del sinfín de fondo, lo que provocó la parada de la Planta.

Ante esta situación la Empresa solicitó de los servicios de la Facultad de Mecánica de la Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez". para realizar una investigación que cumplimentó los siguientes objetivos:

1. Esclarecer las causas de las obstrucciones en el Sistema de Extracción.
2. Evaluar la resistencia del acoplamiento del accionamiento del sinfín para decidir su fabricación.

2. Desarrollo.

2.1 Vistas de la Instalación y del Acoplamiento.

En las figuras 1 y 2 se muestran vistas de la bañera donde se pueden observar los sinfines de extracción y elevación y el acoplamiento objeto de análisis.



Fig. 1 Vista de la bañera, de los sinfines de extracción y elevación y del tubo de extracción.

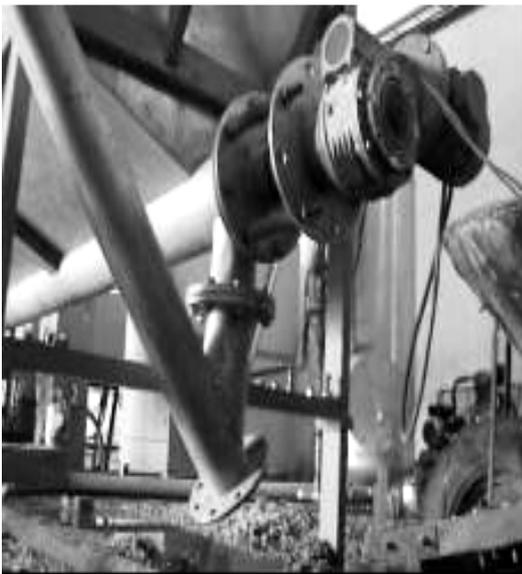


Fig. 2 Vista del acoplamiento del sinfín comunicación.

2.2 Datos del sinfín horizontal de extracción [6].

Potencia del motor: $N_m = 0,75$ kW
 Velocidad de giro: $n_m = 1\ 680$ rpm
 Velocidad de Giro del sinfín: $n_H = 24$ rpm
 Diámetro exterior del sinfín: $D_H = 15,4$ cm.
 Paso del sinfín: $S_H = 15$ cm.
 Diámetro del eje: $d_H = 4,83$ cm.
 Longitud roscada: $L_H = 390$ cm.

2.3 Datos del sinfín inclinado de elevación y descarga [6].

Potencia del motor: $N_m = 0,75$ kW
 Velocidad de giro: $n_m = 1\ 680$ rpm
 Velocidad de Giro del sinfín: $n_i = 39,5$ rpm
 Diámetro exterior del sinfín: $D_i = 10$ cm.
 Paso del sinfín: $S_i = 10$ cm.
 Diámetro del eje: $d_i = 2,69$ cm.
 Longitud roscada: $L_i = 305$ cm.
 Inclinación: $\beta = 30^\circ$

2.4 Datos del material a transportar.

En la figura. 3 se observa la fotografía de una muestra del material a transportar. El mismo es plástico triturado, en su mayoría denso, con granulometría entre 3 y 10 mm, resultante del proceso de trituración del plástico reciclado en el molino.



Fig. 3 Muestra del material a transportar.

El peso volumétrico del material a transportar fue obtenido mediante el pesaje de varias muestras de 200 cm^3 en las condiciones de humedad en que el mismo es transportado, obteniéndose, como valor medio:

$$\gamma = 0,92\text{ gr / cm}^3 = 920\text{ kg / m}^3.$$

La capacidad de transportación del sinfín se puede calcular por la expresión [4, 8]:

$$Q = 60 \pi / 4 (D^2 - d^2) S .n .f . \gamma . C \beta \quad [\text{Kg/h}] \quad (1)$$

Donde :

Q – Capacidad de transportación – Kg/h.

D – Diámetro exterior del tornillo – m.

d – Diámetro del eje – m.

S – Paso del tornillo – m.

n – Velocidad de giro – rpm.

f – Coeficiente de llenado.

γ – Peso volúmet. del material a transportar - Kg/m^3

$C \beta$ - Coeficiente que toma en cuenta el ángulo de inclinación del tornillo con respecto a la horizontal.

El coeficiente de llenado se recomienda elegirlo en función del material a transportar, entre $f = 0,125 - 0,4$, los valores mayores para materiales no abrasivos, sin embargo, estas recomendaciones son válidas para el diseño de los transportadores. En el caso analizado, teniendo en cuenta la ubicación del transportador en el fondo de la bañera, lo que implica la tendencia a que se llene completamente, para el caso específico que se está evaluando de obstrucciones y rotura del acoplamiento, este coeficiente se tomará mucho mayor, o sea, $f = 0,7$. El coeficiente $C\beta = 1$ para el sinfín horizontal. Calculando para los datos de este sinfín se obtiene:

$$Q_H = 60 \pi / 4 (0,15^2 - 0,0483^2) 0,15 \cdot 24 \cdot 0,7 \cdot 920 \quad [\text{Kg/h}]$$

$$Q_H = 2185 \text{ kg/h} = 2,185 \text{ - [t/h]}$$

2.6 Cálculo de la potencia requerida en el eje del transportador y en el motor.

La potencia requerida en el eje del tornillo se puede calcular por la expresión [4]:

$$N_t = Q \cdot L / 367 (w + \sin \beta) \quad [\text{kW}] \quad (2)$$

Donde:

Q – Capacidad de transportación en t/h.

L – Longitud del tornillo en m.

w – Coeficiente de resistencia al movimiento que depende del material a transportar. Se toma entre 2,5 y 4.

β - Angulo de inclinación del transportador.

Se tomará $w = 4$ para mayor seguridad. Calculando la potencia en el eje del transportador para los datos del sinfín horizontal, se obtiene:

$$N_t = 2,185 \cdot 3,9 / 367 (4 + \sin 0^\circ) = 0,023 \quad [\text{kW}]$$

La potencia requerida en el motor se calcula por la siguiente expresión [4]:

$$N_m = N_t / \eta_{transm.} \quad [\text{kW}] \quad (3)$$

La transmisión consiste en un reductor por tornillo sinfín de $i = 70$, para el cual se puede esperar un rendimiento de la transmisión $\eta_{transm.} = 0,7$ [1]. De donde:

$$N_m = 0,023 / 0,7 = 0,033 \quad [\text{kW}]$$

Como se aprecia el motor realmente está sobredimensionado.

La velocidad de giro máxima del sinfín debe estar, en dependencia del material a transportar, entre:

$$n_{\max} = \frac{30}{\sqrt{D}} a \frac{60}{\sqrt{D}} \quad [\text{rpm}] \quad (4)$$

Donde:

D – Diámetro exterior del tornillo en [m].

Calculando para el diámetro exterior del tornillo de fondo:

$$n_{\max} = 77,5 \text{ a } 155 \text{ [rpm]}$$

La velocidad de giro del tornillo está por debajo de este rango.

2.7 Cálculo de la capacidad de transportación del sinfín inclinado de elevación y descarga.

La capacidad de transportación se calculó por la misma expresión (1). Se tomó el mismo coeficiente de llenado $f = 0,7$ con el fin de considerar condiciones críticas y el coeficiente $C\beta$ se extrapoló de los valores que aparecen en la referencia [4], obteniéndose para:

$$\beta = 30^\circ, C\beta = 0,5.$$

Calculando entonces para los datos de este sinfín, se obtiene:

$$Q_i = 60 \pi / 4 (0,10^2 - 0,0269^2) 0,10 \cdot 39,5 \cdot 0,7 \cdot 920 \cdot 0,5 \quad [\text{Kg/h}]$$

$$Q_i = 556 \text{ kg/h} = 0,556 \quad [\text{t/h}]$$

Como se aprecia la capacidad de transportación del sinfín inclinado de elevación y descarga es casi cuatro veces más pequeña que la del sinfín horizontal de fondo. Esta es la principal causa de las obstrucciones. Cuando el sinfín de fondo se llena considerablemente el sinfín de elevación y descarga es incapaz de extraer el material produciéndose la obstrucción.

La solución para este problema es elevar la velocidad de giro del sinfín inclinado, de manera que al menos, la capacidad de transportación de ambos transportadores sea la misma. Como la capacidad de transportación es proporcional a la velocidad de giro, se procedió a calcular a que velocidad debe girar el sinfín de elevación y descarga para que su capacidad sea igual a la del sinfín horizontal. O sea:

$$n_{i1} = (Q_H / Q_i) n_{i0} \quad (5)$$

Donde:

n_{i1} - nueva velocidad de giro del sinfín de elevación y descarga, rpm.

n_{i0} - velocidad de giro original del sinfín de elevación y descarga, rpm.

Q_H - capacidad de transportación del sinfín horizontal.

Q_i - capacidad de transportación del sinfín inclinado.

Calculando para los datos disponibles se obtiene:

$$n_{i1} = 2185 \cdot 39,5 / 556 = 155 \quad [\text{r.p.m.}]$$

Se hace preciso comprobar si esta velocidad está por encima del rango recomendado de velocidad máxima del tornillo, de acuerdo al material a transportar. Según [4], para materiales ligeros no abrasivos, como son: el polvo de carbón, granos, harina, grafito en polvo, etc., la velocidad máxima del tornillo puede alcanzar valores de hasta:

$$n_{\max} = \frac{60}{\sqrt{D}} = \frac{60}{\sqrt{0,1}} = 190 \quad [\text{rpm}]$$

Y para materiales pesados, no abrasivos como son: el carbón en piedra, la sal común, etc. la velocidad máxima puede alcanzar valores de hasta:

$$n_{\max} = \frac{45}{\sqrt{D}} = \frac{45}{\sqrt{0,1}} = 142 \quad [\text{rpm}]$$

Como se aprecia, la velocidad de giro requerida por el sinfín de elevación y descarga es un poco mayor que este último valor, sin embargo, realmente el plástico a transportar no es tan pesado como el carbón en piedra, o como la sal común y se puede admitir esa velocidad.

Para lograr elevar la velocidad de giro del tornillo del sinfín de elevación y descarga, se hizo necesario modificar la relación de transmisión de la cadena que posee este transportador a la salida del reductor de velocidad por tornillo sinfín, de $i = 1$, que poseía inicialmente, a $i = 1 / 3,92$, elevando el número de dientes del *sproket* conductor de 12 a 47 dientes. Se procederá a comprobar si en estas nuevas condiciones de explotación, la potencia requerida no excede la potencia del motor instalado.

2.8 Cálculo de la potencia requerida en el motor del sinfín de elevación y descarga, para la nueva velocidad de giro.

La potencia en el eje se calculó por la ecuación (2). Calculando para los nuevos datos de este sinfín:

$$N_t = 2,185 \cdot 3,05 / 367 (4 + \sin 30^\circ) = 0,082 \quad \text{kW}$$

La potencia en el motor se calculó por la expresión (3). La transmisión en este caso está compuesta por un reductor sinfín y un paso de cadena. Se asumió

$$\eta_{cad} = 0,9$$

De donde:

$$\eta_{transm} = \eta_{red} \cdot \eta_{cad} = 0,7 \cdot 0,9 = 0,63$$

y la potencia del motor:

$$N_m = \frac{0,082}{0,63} = 0,13 \quad [\text{Kw.}]$$

Como se aprecia, el motor también está sobredimensionado y la modificación no tiene implicación ninguna en el mismo.

En la Fig. 4 se muestra una vista de la transmisión por cadena modificada.



Fig. 4 Vista de la transmisión por cadena modificada.

2.9 Modificación del sistema de entrega del material del sinfín horizontal al de elevación.

En el sistema existe un elemento que conspira contra la uniformidad del trabajo de los transportadores, este es el sistema de entrega del material del sinfín horizontal al sinfín inclinado. Este está compuesto por un tubo de conexión vertical de $d = 0,2$ m y $l = 0,4$ m de longitud, tal como se puede apreciar en la Fig. 1. este tubo representa un “cuello de botella” en la transportación y se eliminó, acortando su longitud al mínimo posible.

2.10 Comprobación de la resistencia mecánica del nuevo acoplamiento.

2.10.1 Torque a transmitir por el sinfín horizontal.

El torque en el eje del sinfín horizontal se puede calcular por la clásica expresión:

$$M_t = 97\,420 \quad [\text{Kgf} - \text{cm}] \quad (6)$$

La potencia en este sinfín fue calculada anteriormente, obteniéndose $N = 0,023$ Kw y la velocidad de giro es $n = 24$ r.p.m. De donde:

$$M_t = 97\,420 \cdot 0,023 / 24 = 93,36 \quad [\text{Kgf} - \text{cm}]$$

En el momento de arranque en el acoplamiento se produce una sobrecarga dinámica, provocada por la inercia de las masas en movimiento. En el caso del sinfín de fondo que se arranca con carga es conveniente tomar un coeficiente de carga dinámica elevado. Se asumió $k_{din} = 5$. El torque a transmitir será entonces:

$$M_{t_{max}} = k_{din} \cdot M_t = 5 \cdot 93,36 = 467 \quad [\text{Kgf} - \text{cm}]$$

2.10.2 Comprobación de la resistencia del acoplamiento en la sección B - B.

En la figura 5 se muestra un esquema del acoplamiento de conexión y las dimensiones del diente en la sección B - B. El nuevo acoplamiento se fabricará de plástico poliamídico de alta densidad, para el cual, según [7], la resistencia máxima es:

$$\sigma_u = 2,2 \text{ Kgf} / \text{mm}^2 = 220 \quad [\text{Kgf} / \text{cm}^2]$$

La fuerza P_d sobre un diente, considerando la recomendación de [1] de tomar, para árboles estriados y acoplamientos dentados, un coeficiente de irregularidad de la distribución de la carga $\psi = 0,75 < 1$, para $z = 8$ dientes, será:

$$P_d = \frac{2 \cdot M_{t_{max}}}{D_m \cdot \psi \cdot z} = 2 \cdot 467 / (5,35 \cdot 0,75 \cdot 8) = 29,1 \quad [\text{Kgf}]$$

La tensión de flexión en la base del diente será:

$$\sigma_{flex\ max} = \frac{M_{flex\ max}}{W} = \frac{P_d \cdot b / 2}{1 / 6 \cdot h \cdot a^2} = 6 \cdot 29,1 \cdot 0,55 / (1,35 \cdot 0,7^2) = 145 \quad [\text{Kgf} / \text{cm}^2]$$

El factor de seguridad a la flexión es:

$$n = \frac{\sigma_u}{\sigma_{flex\ max}} = \frac{220}{145} = 1,52$$

La reserva de resistencia no es elevada, pero si aceptable, teniendo en cuenta que se seleccionó un coeficiente de carga dinámica elevado en el cálculo de la carga.

La tensión de cizallamiento en la base del diente calculada por la expresión de Zhuravskii desarrollada para una sección rectangular [2], será:

$$\tau_{max} = \frac{Q \cdot S'_x}{b \cdot I_x} = \frac{3 \cdot Q}{2 \cdot A} = \frac{3 \cdot P_d}{2 \cdot a \cdot h} = 3 \cdot 29,1 / (2 \cdot 1,35 \cdot 0,7) = 92,4 \quad \text{V} \quad [\text{Kgf} / \text{cm}^2]$$

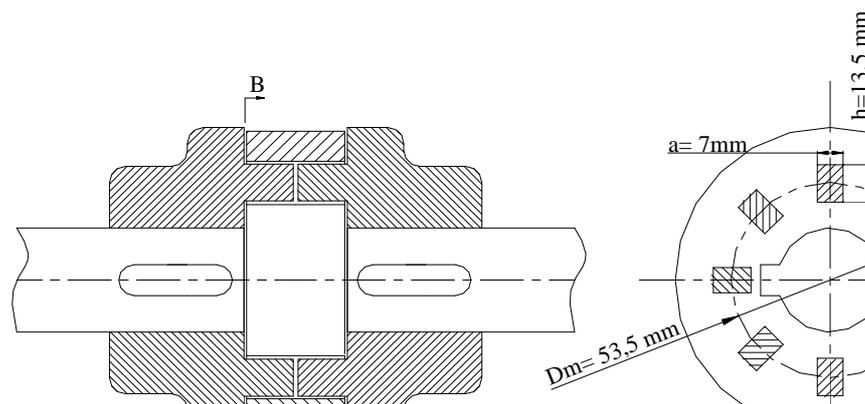


Fig. 5 Esquema del acoplamiento de conexión.

La resistencia máxima al cizallamiento se puede estimar con gran exactitud según la Cuarta Hipótesis de Resistencia, por la expresión [2]:

$$\tau_u = \frac{\sigma_u}{\sqrt{3}} = 0,58 \cdot \sigma_u = 0,58 \cdot 220 = 128 \text{ [Kgf/cm}^2\text{]}$$

El factor de seguridad al cizallamiento será:

$$n = \frac{\tau_u}{\tau_{max}} = \frac{128}{92,4} = 1,4$$

Un poco más bajo que el de flexión, pero se puede admitir por la misma razón anterior.

2.10.3 Comprobación de la resistencia del núcleo central del acoplamiento

La base de los dientes del núcleo central es mucho mayor que la de los dientes de las dos mitades del acoplamiento, razón por la cual su resistencia está garantizada.

Se comprobará primero la posibilidad de falla por tracción en la sección C – C en el espesor entre el fondo del diente y el borde exterior del núcleo (Figura 6).

La fuerza P_t de tracción se puede hallar partiendo de la condición de equilibrio:

$$M_{t, max} = P_t \cdot D_t \quad (7)$$

De donde:

$$P_t = \frac{M_{t, max}}{D_t} = 467 / 7,5 = 62,3 \text{ [Kgf]}$$

La tensión de tracción será:

$$\sigma_t = \frac{P_t}{A_t} = \frac{P_t}{t \cdot e} = 62,3 / (2,3 \cdot 0,65) = 41,6 \text{ [Kgf/cm}^2\text{]}$$

El factor de seguridad a la tracción en esta zona es:

$$n = \frac{\sigma_u}{\sigma_t} = 220 / 41,6 = 5,29$$

Se observa que la reserva de resistencia en esta sección es amplia.

La otra posible falla del núcleo es a torsión en la sección A – A. Esta sección se puede considerar como un perfil cerrado de paredes delgadas, de espesor variable. La tensión tangencial máxima en este caso se puede calcular por la expresión siguiente [2]:

$$\tau_{M_t, max} = \frac{M_{t, max}}{W_t} = \frac{M_{t, max}}{2 \cdot A^* \cdot \delta_{min}} \quad (8)$$

Donde:

A^* - Area encerrada en la línea media del contorno - cm^2 .

δ_{min} - espesor mínimo de la sección - cm.

Se considerará a modo de simplificación, como línea media del contorno el diámetro medio entre D_m y D_t .

O sea:

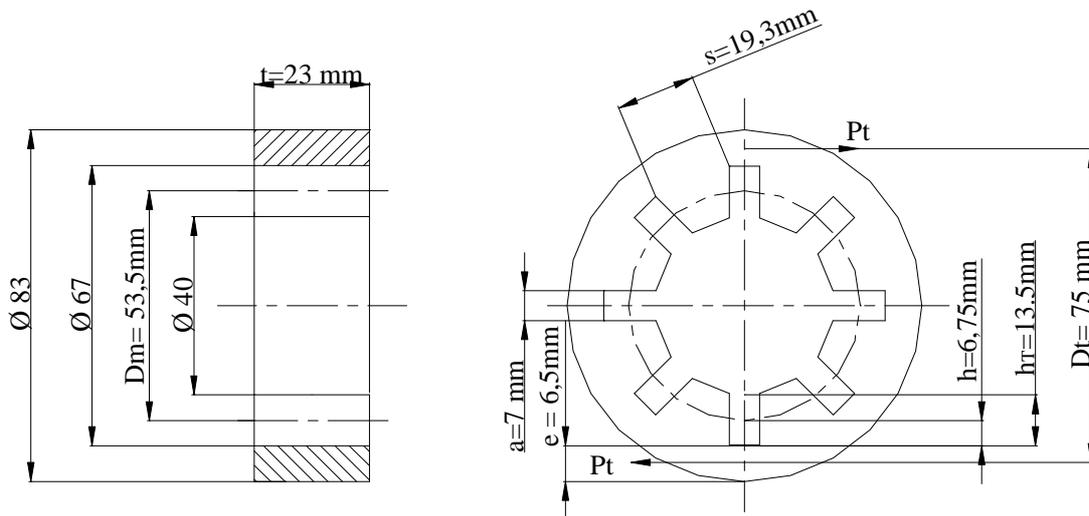


Fig. 6 Núcleo central del acoplamiento.

$$A^* = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D_m + D_i}{2} \right)^2 = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{5,35 + 7,5}{2} \right)^2 = 32,42 \text{ [cm}^2\text{]}$$

El espesor mínimo es $\delta_{min} = e = 0,65 \text{ cm}$

La tensión de torsión será:

$$\tau_{M_t} = 467 / (2 \cdot 32,42 \cdot 0,65) = 11 \text{ [Kgf/cm}^2\text{]}$$

Y el factor de seguridad a la torsión será:

$$n = \frac{\tau_u}{\tau_{M_t}} = 128 / 11 = 11,6, \text{ la resistencia a la}$$

torsión es elevada.

3. Conclusiones.

1. La capacidad de transportación del sinfín de elevación y descarga de la bañera es prácticamente la cuarta parte de la del sinfín horizontal de fondo, lo cual constituye la causa fundamental de las obstrucciones de material.
2. La presencia del tubo vertical, de capacidad reducida, en la interconexión entre el sinfín horizontal de fondo y el inclinado de elevación y descarga, constituye un "cuello de botella" en el sistema de transportación del material.
3. Los dos problemas anteriores se resolvieron elevando la velocidad del sinfín inclinado mediante la modificación de la relación de transmisión de la transmisión por cadena del sinfín y mediante la eliminación del tubo de interconexión respectivamente.
4. El empleo del plástico poliamídico en la fabricación del acoplamiento del sinfín horizontal garantiza una resistencia satisfactoria de este elemento.

5. Por cada día de parada la Planta deja de producir una tonelada de plástico, que representa un ingreso de 650.00 USD y ventas del orden de 2 280.00 USD por concepto de la producción cooperada con la Empresa "Plastimec" de aquí que el Impacto Económico del trabajo fue considerable.
6. El Impacto Medioambiental también es importante ya que esta Planta es la encargada de Reciclar los Desechos Plásticos de Cienfuegos

4. Bibliografía.

1. Dobrovolski V. Elementos de Máquinas./ V. Dobrovolski. -- Moscú: Editorial MIR, 1970.-- 692 p.
2. Feodosiev, V.I. Resistencia de Materiales / V.I. Feodosiev.—Moscú: Editorial MIR, 1985.—583p.
3. Goytisoló R, Castellanos L, Carrera V, Noa J.G. y Quiñones A. Análisis de la avería y recuperación del molino de la Planta de Plástico Mixto de la Empresa de Recuperación de Materias Primas de Cienfuegos. Informe de Investigación. Trabajo presentado en el XIV Forum de Ciencia y Técnica, 2002.—19 p.
4. Labahn – Kaminsky. Prontuario del Cemento. La Habana: Ciencia y Técnica, 1970.— 406 p.
5. MAYPER, Valencia, España. Instrucciones de puesta en marcha y operación de las Plantas de Reciclaje de Plásticos, 1996.—5 p. Catálogo Industrial.
6. Módulo de Separación Descripción y Planos. 1996, 17 p. Catálogo Industrial.
7. Pisarenko G.S, Yakovlev A.P, Matveev V.V. Manual de Resistencia de Materiales. Moscú: Editorial MIR, 1979.-- 694 p.
8. Shubin V.S, Pedré C. Diseño de Maquinaria Industrial. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1984.—363 p.

Analysis and solution of the coupling failure of the bottom worm conveyor of the bathtub in a Mixed Plastic Plant.

Abstract.

In this paper is shown the investigation carried out in order to clarify the failure causes of the coupling of the bottom worm conveyor of the bathtub in a Mixed Plastic Plant. In the same was it was concluded that the fundamental causes of the obstructions of the bottom conveyor are the fact that the elevator worm conveyor of the bathtub has a capacity four times minor that the bottom conveyor, which causes that the material accumulates in the bottom of the bathtub, and on the other hand the communication between the bottom conveyor and the elevator one takes place through a vertical tube of reduced capacity that also constitutes a bottle neck. The transmission relationship of the chain of the elevator working conveyor was modified in order to elevate their speed and to equal the capacity of transportation of both conveyors, and the connection tube was eliminated. The coupling was manufactured of polyimide, being achieved an appropriate resistance.

Key words: Bathtub of plastic, worm conveyor, jagged coupling.