

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN MEZCLADOR DE TORNILLO SINFIN PARA MORTERO SECO.

Design and construction of a mixer of screw conveyor for dry mortar

RESUMEN

El diseño de un transportador de sinfín con características de mezclador requiere del uso de algunos conceptos importantes para lograr los objetivos buscados, transporte y homogeneización en la mezcla. El código CEMA utilizado fue desarrollado en Estados Unidos y ha sido probado en la industria con buenos resultados. El presente artículo describe algunos conceptos de este código utilizados en el diseño, verificación y construcción de un prototipo.

PALABRAS CLAVES: Transportador a sinfín, mezclador, código CEMA.

ABSTRACT

The design of a screw conveyors with mixer characteristics requires of the use of some important concepts to obtain the looked objectives, transport and homogenization in the mixture. Used code CEMA was developed in the United States and has been proven in the industry with good results. The present article describes some used concepts of this code in the design, verification and construction of a prototype.

KEYWORDS: Screw Conveyors, mixer, CEMA Code

1. INTRODUCCIÓN

El mortero seco por sus variadas aplicaciones se ha convertido en un componente básico en el sector de la construcción. Su proceso de producción, se lleva a cabo en instalaciones complejas donde se recibe y se mezcla la materia prima (cemento, arena y aditivos en proporciones adecuadas) con equipos de gran tamaño. Este artículo detalla el diseño de un mezclador y transportador de mortero seco de tornillo sinfín basado en el Código CEMA¹; se usó este código por la falta de normas nacionales relacionadas con el diseño de equipos de transporte [1]. En segundo lugar se realizó una comprobación resistiva de los elementos más críticos usando ecuaciones convencionales de diseño de elementos mecánicos, posteriormente, antes de la construcción del prototipo, se simuló las deformaciones por medio de un análisis de elementos finitos de las paletas del tornillo sinfín, que son los elementos que transportan y a su vez mezclan el mortero seco, soportando las mayores cargas de esfuerzo y deformación debido a su espesor.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Mortero Seco. Los morteros secos son mezclas ponderadas de sus componentes primarios (cemento,

arena y aditivos) en proporciones adecuadas preparadas en fábrica. Se suministran en silos y se amasan en obra, con el agua precisa, hasta obtener una mezcla homogénea para su utilización. Es el material de construcción más extendido dentro del campo de la construcción y edificación y se confecciona predosificando todos los ingredientes a excepción del agua de amasado, que se adiciona en el momento de su utilización en obra.

2.2 Equipos de Transporte. Existen diferentes sistemas de transportadores de materias primas a granel, los mas generalmente usados en la industria son: Banda transportadora, Tornillo transportador de tornillo sinfín, Elevador de cangilones, Transporte neumático, Mezclador tipo trompo y Mezclador tipo vertical [3]. El presente diseño busca un sistema idóneo para transportar y mezclar mortero seco.

3. DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 Valoraciones de Diseño. Si bien cada equipo tiene características propias, se plantean las siguientes consideraciones mínimas de las cuales parte el diseño del mezclador presentado en este artículo:

- Versatilidad para la aplicación en cualquier sistema de producción industrial.

- Dimensionalmente, debe ser menor comparado con otros equipos industriales que se utilizan en el medio de mezcla industrial y afines.

¹ CEMA, Conveyor Equipment Manufacturers Association. Asociación de diseñadores y fabricantes Americanos de equipos de transporte y accesorios.

Fecha de Recepción: 17 de junio de 2010

Fecha de Aceptación: 13 de Agosto de 2010

RICARDO GIRALDO QUIROGA

Estudiante de Ingeniería Mecánica.
Universidad Tecnológica de Pereira

LUIS CARLOS FLOREZ GARCIA

Ingeniero Mecánico, M.Sc.
Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
luiscar@utp.edu.co

OSCAR FABIAN HIGUERA COBOS

Ingeniero Metalúrgico, M.Sc.
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
osfahico@utp.edu.co

- La técnica de mezcla debe ser continua eliminando tiempos muertos dentro del proceso.
- El sistema se requiere que sea hermético para evitar contaminación del medio con el material que se esta tratando.
- La cantidad de elementos rodantes debe ser la menor posible.
- Debe ser de fácil mantenimiento.
- Su proceso de fabricación debe ser de carácter nacional sin restricciones de accesorios por tiempos de importación.
- Tiempo de permanencia del material en el proceso de mezcla debe ser de 10 segundos.
- Su consumo de combustible lo mas ahorrativo posible.
- Se requiere que sus niveles de contaminación ambiental concernientes a la emanación de CO₂ sean los más bajos posibles.
- La capacidad mínima de mezcla debe ser de 20 Ton/h

Después de un estudio detallado se encontró que todas las anteriores premisas las cumple el transportador de tornillo sinfín, el cual debido a la forma y movimiento de las paletas será el elemento mecánico que realiza la mezcla. Las etapas del diseño se describen enseguida.

3.2 Capacidad de diseño o equivalente. Se asume que el material a mezclar y transportar es arena con humedad del 0%, y cemento, en una proporción de 80 – 20 respectivamente, con regímenes de temperatura inferiores a los 30°C. El prototipo se diseña para procesar 20 Ton/h; y para el cálculo de su densidad se deben tener en cuenta los dos materiales y sus % volumétricos,

$$\rho = (\rho_{\text{arena}} * \% \text{Vol}_{\text{arena}}) + (\rho_{\text{cemento}} * \% \text{Vol}_{\text{cemento}}) \quad (1)$$

Vale la pena anotar, que la capacidad requerida se ve influenciada por agentes externos o componentes del mismo transportador, siendo necesario tener en cuenta factores adicionales que establecen la capacidad a la cual se debe diseñar el transportador; estos factores se identifican a continuación.

3.2.1 Factor especial de capacidad por el tipo de paso (CF₁). Debido a las variables, constantes y en especial al tiempo de permanencia del material dentro del equipo, y también para efectos de disminución de longitud, se usa un paso igual al diámetro de la hélice.

Siguiendo la Figura 1, Tabla 1-3 del código CEMA [2], se encuentra que CF₁ = 1.0

Special Conveyor Pitch Capacity Factor CF ₁		
Pitch	Description	CF ₁
Standard	Pitch = Diameter of Screw	1.00
Short	Pitch = ¾ Diameter of Screw	1.50
Half	Pitch = ½ Diameter of Screw	2.00
Long	Pitch = 1½ Diameter of Screw	0.67

Figura 1. Factor especial de capacidad por el tipo de paso [2].

3.2.2 Factor especial de capacidad por tipo de hélice (CF₂)

Hay dos formas de fabricar una espiral, dependiendo su escogencia del entorno tecnológico con que cuente el lugar donde se va a fabricar: la espiral seccional se construye por medio de discos unidos por soldadura hasta completar la longitud deseada, la espiral helicoidal se construye con la ayuda de una máquina que la fabrica con un solo tramo de chapa, y se denomina helicoidal porque la punta de la aleta es cónica.

En la Figura 2, Tabla 1-4 del código, CF₂= 2.54. Se escoge este valor debido al tipo de fabricación que se usará. A pesar de que una de las condiciones iniciales es un porcentaje de carga del 50%, ya que no existe ninguna restricción de carga por parte de la carta de materiales consultada en la Tabla 1-2 Código CEMA, se optó por dejar este valor pues si se realiza una extrapolación CF₂ = 2.13, que es un valor de ajuste menos conservador que el seleccionado en la Figura 2.

Special Conveyor Flight Capacity Factor CF ₂			
Type of Flight	Conveyor Loading		
	15%	30%	45%
Cut Flight	1.95	1.57	1.43
Cut & Folded Flight	N.R.	3.75	2.54
Ribbon Flight	1.04	1.37	1.62

Figura 2. Factor especial de capacidad por tipo de hélice [2].

3.2.3 Factor especial de capacidad por paletas mezcladoras (CF₃).

Como la hélice a utilizar está compuesta por paletas a lo largo del equipo con una inclinación de 45°, con cuatro de estas por paso, se tiene que CF₃ = 1.32, valor determinado de la Tabla 1-5.

Special Conveyor Mixing Paddle Capacity CF ₃					
Standard Paddles at 45° Reverse Pitch	Paddles Per Pitch				
	None	1	2	3	4
Factor CF ₃	1.00	1.08	1.16	1.24	1.32

Figura 3. Factor especial de capacidad por paletas mezcladoras [2].

3.2.4 Capacidad equivalente. Ahora, después de haber seleccionado los factores ya mencionados y conociendo la capacidad requerida se procede al cálculo de la capacidad equivalente o real para el equipo, siguiendo la expresión,

$$CapEquiv = CapReq * CF_1 * CF_2 * CF_3 \quad (2)$$

3.4 Diámetro y velocidad. Manejando la expresión de velocidad,

$$N = \frac{CapacidadEquivalente}{Capacidad...Ft^3 / h...a..1.Rpm} \quad (3)$$

Para el cálculo de la capacidad volumétrica por r.p.m, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\text{Área} = \frac{\pi}{4} (\phi_{Ext}^2 - \phi_{Int}^2) [m^2] \quad (4)$$

$$Vol = A * Paso [m^3] \quad (5)$$

$$Capacidad \text{ por Rpm} = Vol * 60 \quad (6)$$

3.5 Limitaciones de tamaño del transportador en función de la granulometría. Otro factor destacado en este diseño es el tamaño del material o granulometría; las dimensiones del equipo no dependen solo de la capacidad, porcentaje de llenado o velocidad de giro; también dependen de la proporción de terrones existentes en el material a transportar y de la dureza de estos. Para determinar si la primera selección es la más idónea, se debe ir a la Tabla 7-1 del código, donde se establece el tamaño máximo permisible para la hélice dependiendo del porcentaje de aglomeración de terrones y el diámetro de la hélice.

3.6 Cálculo de potencia. La potencia necesaria para operar el equipo, con una rata de carga uniforme y regular de alimentación se debe a la sumatoria de la potencia necesaria para mover la espiral venciendo agentes externos como la fricción, mas la potencia necesaria para mover el material, además de un ajuste que se realiza en función del factor de carga y eficiencia dependiente del tipo de transmisión que se emplee. Las expresiones utilizadas para dichos cálculos son:

$$HPf = \frac{L * N * Fd * fb}{1000000} \quad (7)$$

$$HPm = \frac{C * L * W * Ff * Fm * Fp}{1000000} \quad (8)$$

$$HPtotal = \frac{(HPf + HPm) * Fo}{e} \quad (9)$$

donde, HPf es la potencia para mover el transportador desocupado en hp, HPm es la potencia para mover el material en hp, L es la longitud a transportar en pies, N es la velocidad angular en rpm, Fd es el factor según el diámetro del equipo, ver Figura 4, Fb es el factor del tipo de rodamiento utilizado en el soporte intermedio, ver Figura 5, C es la capacidad en ft³/h, W es la densidad del mortero seco en lb/ft³, Ff es el factor debido al porcentaje de carga, ver Figura 6, Fm es el factor de material, Fp es el factor por el número de paletas por paso, Fo es el factor de sobrecarga y e es el factor de eficiencia.

Conveyor Diameter Factor, F _d			
Screw Diameter Inches	Factor F _d	Screw Diameter Inches	Factor F _d
4	12.0	16	106.0
6	18.0	18	135.0
9	31.0	20	165.0
10	37.0	24	235.0
12	55.0	30	360.0
14	78.0	36	520.0

Figura 4. Factor de diámetro del transportador [2].

Hanger Bearing Factor F _b		
Bearing Type		Hanger Bearing Factor F _b
B	Ball	1.0
L	Bronze	2.0
S	*Graphite Bronze	2.0
	*Melamine (MCB)	
	*Oil Impreg. Bronze	
	*Oil Impreg. Wood	
	*Nylatron	
	*Nylon	
H	*Teflon	4.4
	*UHMW	
	*Hard Surfaced	
	*Stellite	
	*Ceramic	

*Non lubricated bearings, or bearings not additionally lubricated.

Figura 5. Factor del tipo de rodamiento [2].

Flight Type	F, Factor for Percent Conveyor Loading			
	15%	30%	45%	95%
Standard	1.0	1.0	1.0	1.0
Cut Flight	1.10	1.15	1.20	1.3
Cut & Folded Flight	NR*	1.50	1.70	2.20
Ribbon Flight	1.05	1.14	1.20	-

*Not Recommended

Figura 6. Factor debido al porcentaje de carga [2].

Fm, está determinado por el tipo de material que se desea transportar, se encuentra en la Tabla 1-2 del código.

Paddle Factor F_p					
Standard Paddles per Pitch, Paddles Set at 45° Reverse Pitch					
Number of Paddles per Pitch	0	1	2	3	4
Paddle Factor F_p	1.0	1.29	1.58	1.87	2.16

Figura 7. Factor de paletas por paso [2].

El factor de sobrecarga (F_o) posee un condicional en el cual, si $HP_f + HP_m > 5.2$, $F_o = 1$, de lo contrario se debe usar la Figura 8.

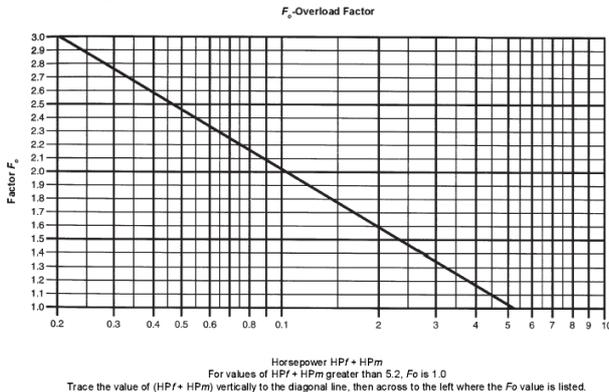


Figura 8. Factor de sobrecarga [2].

El sistema de acople a utilizar es un acople directo entre la caja reductora y el eje de la hélice, este acople directo se hace por medio del eje hueco de la caja reductora, y la transmisión de potencia por cuña.

En ese orden de ideas, se entiende el sistema como si estuviera utilizando un acople de cadena, como lo señala la Figura 9, siendo esta configuración la mejor frente a otras posibles. Por esto se asume eficiencia $e = 0.95$

La eficiencia es uno de los factores más importantes a tener en cuenta por su incidencia en el costo de los equipos.

e Drive Efficiency Factor				
Screw Drive or Shaft Mount w/ V-Belt Drive	V-Belt to Helical Gear and Coupling	Gearmotor w/ Coupling	Gearmotor w/ Chain Driver	Worm Gear
.88	.87	.95	.87	Consult Manufacturer

Figura 9. El factor de eficiencia de la transmisión [2].

Teniendo todos los valores identificados se procede al cálculo de las potencias.

3.7 Límite de resistencia a la torsión.

El torque en el tornillo sinfin determina si la flecha de hélice es capaz de trabajar en estas condiciones, este torque está en función de la potencia y la velocidad con la que gira la hélice,

$$Torque = \frac{63025 * HP_{total}}{N} \quad (10)$$

Luego de hallar el torque, se compara con el máximo torque que puede llegar a soportar la flecha que se seleccionó inicialmente para el equipo, para luego escoger la cantidad de tornillos y el grado a utilizar, Figura 10.

Coupling	Pipe		Couplings		Bolts				
	Sch. 40		Torque In Lbs.*		Bolt Dia. Inches	Bolts In Shear In Lbs.**		Bolts In Bearing In Lbs.	
	Size Inches	Torque In Lbs.	CEMA Std. (C-1045)			No. of Bolts Used		No. of Bolts Used	
1	1½	3,140	999	¾	1,380	2,070	1,970	2,955	
1½	2	7,500	3,727	¾	3,660	5,490	5,000	7,500	
2	2½	14,250	9,233	¾	7,600	11,400	7,860	11,790	
2½	3	23,100	18,247	¾	9,270	13,900	11,640	17,460	
3	3½	32,100	34,427	¾	16,400	24,600	15,540	23,310	
3	4	43,000	34,427	¾	16,400	24,600	25,000	37,500	
3½	4	43,300	51,568	¾	25,600	38,400	21,800	32,700	

Figura 10. Tabla 1-18 del Código CEMA 2002 [2].

3.8 Deflexión y dilatación térmica.

Quizá uno de los grandes problemas a los que se puede enfrentar un diseñador mecánico, es la limitante que genera la presencia de deflexiones en la hélice de un transportador a sinfín, siendo esta la principal causa por la que se implementan los soportes intermedios en estos equipos. Para este caso en especial, no existe ninguna complicación ya que la longitud se encuentra dentro del rango permisible. Pese a ello, de todas maneras, se debe calcular siguiendo la expresión del Código CEMA,

$$D = \frac{5 * W * L^3}{384 * 29E10^6 * I} \quad (11)$$

donde, D es la deflexión en pulgadas, W es el peso total de la hélice en lb, L es la longitud del transportado en pulgadas e I es el momento de inercia de la flecha en pulgadas de cuarto orden.

El momento de inercia de la flecha varía en función de su diámetro y espesor de pared; este valor se puede determinar chequeando la Figura 11, tabla 1-20 o 1-21 del Código CEMA.

Pipe Size	2"	2½"	3"	3½"	4"	5"	6"	8"	10"
I	666	1.53	3.02	4.79	7.23	15.2	28.1	72.5	161

Pipe Size	2"	2½"	3"	3½"	4"	5"	6"	8"	10"
I	868	1.92	3.89	6.28	9.61	20.7	40.5	106	212

Figura 11. Tablas 1-20 y 1-21 Código CEMA 2002 [2].

Los fabricantes de equipos similares afirman que se pueden manejar deflexiones hasta de 6 mm en longitudes considerables pero con velocidades lentas, inferiores a 60 rpm.

Otro aspecto importante para tener en cuenta es la dilatación térmica del material, debido a que puede adquirir temperatura superior a la ambiente a medida que avanza el proceso, por lo que se debe tener en cuenta para la configuración de los rodamientos. Su valor se puede determinar implementando la siguiente ecuación,

$$L' = L * (T_1 - T_2) * C \quad (12)$$

donde, L es la longitud del transportador en pulgadas, T₁ es la temperatura mayor en °F, T₂ es la temperatura menor en °F y C es el coeficiente de expansión lineal en 1/°F, este coeficiente depende del tipo de material con el que se fabrique la hélice, en este caso C = 0.000065 1/°F para aceros rolados en caliente con temperaturas de trabajo entre 20 - 80 °C, equivalentes a la temperatura a la cual entran y salen los materiales del mezclador. La dilatación máxima esperada es L' = 0.08in

4. VERIFICACION DEL DISEÑO.

El tornillo sinfin es el elemento más crítico dentro del equipo, debido a esto la verificación del diseño se centra en este elemento. El tornillo sinfin se encuentra cargado como se muestra en la Figura 12, donde se asume las cargas radiales en z de valor despreciable y las cargas axiales usadas para mezclar y desplazar el mortero seco son trasladadas a los rodamientos del eje.

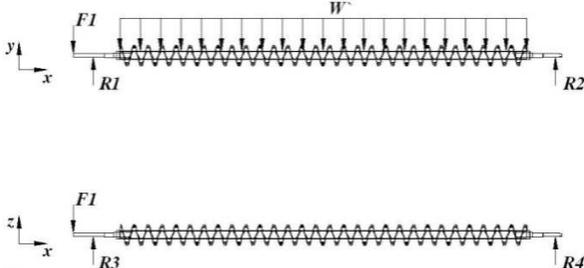


Figura 12. Diagramas de cuerpo libre del tornillo sinfin.

La verificación de los esfuerzos de fatiga sobre el tornillo sinfin por aproximación de Goodman se puede lograr en la Figura 13, donde en azul (G) está la línea de Goodman, en rojo (Y) la línea del esfuerzo de fluencia, en verde (S) el esfuerzo del cuerpo y en rosado (C) el esfuerzo alternante [4, 5].

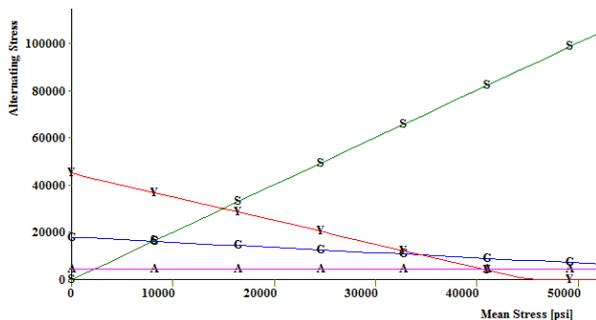


Figura 13. Diagrama de Goodman del tornillo sinfin. .

La verificación de la deflexión de las paletas del tornillo sinfin se analiza por elementos finitos mediante en CosmosWorks 2007; sus resultados se aprecian en la Figura 14. Obviamente, el valor más crítico de la deflexión se encontró en el borde externo de la paleta, y fue de 0,0876 mm de su posición inicial, que es un valor aceptable.

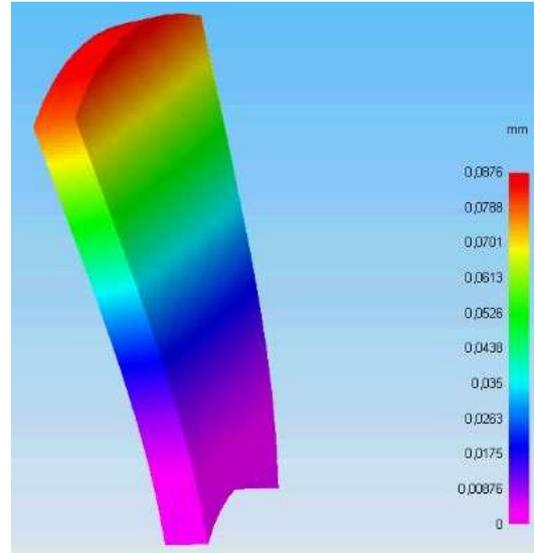


Figura 14. Análisis de deformación por medio de elementos finitos de la paleta del tornillo sinfin

En el siguiente paso se realizó un ensamble virtual para comprobar el tamaño de cada una de las partes, así como la cantidad de elementos de sujeción, posición del reductor, tamaño y cantidad de rodamientos entre otros, ver figura 15.

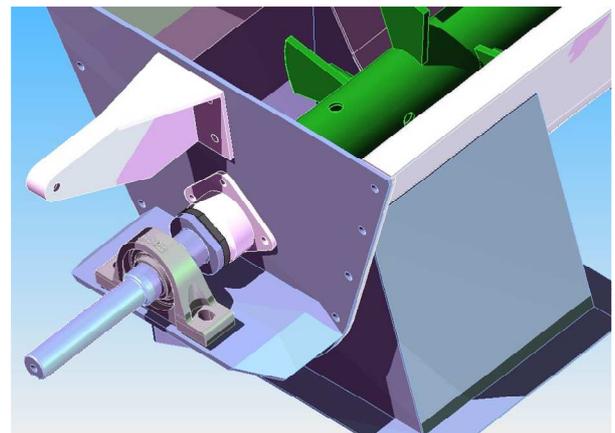


Figura 15. Ensamble virtual del equipo.

Finalmente se procedió a la construcción del prototipo. En la figura 16 se puede apreciar el tornillo sinfin de paletas y en la figura 17 la transmisión del reductor con acople directo al eje del tornillo sinfin, el cual se encuentra en el costado de la salida de la mezcla



Figura 16. Fotografía del tornillo sinfín del prototipo en operación.



Figura 17. Fotografía de la transmisión de potencia por medio de reductor

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para el diseño de sistemas de transporte con mezcla debe tenerse en cuenta que el tornillo transportador a sinfín es el candidato idóneo para suplir las necesidades de transporte, pero en la metodología de mezclado, el más apto es el sistema de paletas. Por lo cual, se realizó una fusión entre estos dos sistemas obteniéndose un mezclador de aletas con características de transportador a sinfín.

Las instalaciones usadas para la producción de mortero seco demanda altos costos de mantenimiento, mano de obra, utilización de equipos auxiliares, espacios muy grandes y porcentajes de desperdicio considerables. En última instancia todos estos costos los asume en su totalidad el consumidor final, de allí la importancia de haber logrado un diseño de mezclador y transportador de tornillo sinfín con alta eficiencia operativa y de bajas dimensiones comparado con otros equipos en el mercado.

Las pruebas con el prototipo demuestran un comportamiento de acuerdo a las consideraciones de

diseño preestablecidas, confirmando el diseño realizado bajo el código CEMA y la verificación resistiva realizada por medio de elementos finitos.

6. BIBLIOGRAFIA.

Normas:

[1] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Bogotá: ICONTEC.

[2] CEMA® SCREW CONVEYORS CATALOG 2002, Texas Division First Edition 2002.

Disertaciones:

[3] Calvo, B., Maya, M., Parra, J.L. Primeras Jornadas Iberoamericanas sobre “Caracterización y Normalización de Materiales de Construcción”. Programa CYTED. Madrid, 2001.

Referencias de libros:

[4] ROMERO C., CALLE G., “Diseño de Elementos de Máquinas”, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2005.

[5] Machinery’s Handbook 26th Edition, Editorial Industrial Press, Inc. New York, 2004.