

Diseño y Selección de Equipos de un Sistema de Pre-molienda de Clinker y Aditivos para la Industria Cementera

Juan Andres Coello Cassinelli^(a), Federico Camacho Brausendorff, M.Sc. ^(b)
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción ^{(a), (b)}
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, km 30.5 Vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil - Ecuador
M.Sc. Mechanical Engineering ^(b)
University of Illinois at Urbana - Champaign, Profesor de la ESPOL ^(b)
juancoe@espol.edu.ec ^(a), fcamacho@espol.edu.ec ^(b)

Resumen

La implementación de nuevas tecnologías y sistemas que aumenten la eficiencia de las plantas cementeras es imprescindible, debido al aumento de la demanda del producto para el desarrollo de obras públicas y del sector inmobiliario. Esto se podría lograr con la incorporación al proceso de producción del cemento de un sistema de Pre-molienda de clinker y aditivos.

Para la incorporación del sistema de Pre-molienda que tendrá una capacidad de 150 toneladas por hora de Clinker, puzolana, yeso y caliza, se procederá primero al análisis de los aspectos físicos y químicos de las materias primas que componen el cemento, descripción del proceso de producción, normas y estándares técnicos, seguridad y medio ambiente. Se procederá al diseño de unos equipos por medio de software de diseño, mientras que otros serán seleccionados por medio de catálogos de los fabricantes. Se realizará una breve descripción de los requerimientos del sistema para automatizar la Pre-molienda de Clinker y Aditivos. Finalmente, se presentará el análisis de costos donde se detallarán los costos de importación, fabricación y montaje de quipos, puesta en marcha y costos de operación, lo cual nos dará una idea general del presupuesto para la implementación de este tipo de proyectos industriales.

Palabras claves: *Tecnologías, planta, cemento, Pre-molienda, clinker, aditivos, diseño, selección, costos, presupuesto.*

Abstract

The implementation of new technologies and systems are going to increase the performance of the cement plants is essential, due to the high demand for the product to development of public works and real-estate. As would be to embed to the process of production of cement a Pre-milling system of clinker and additives.

For the incorporation of the Pre-milling system will have a capacity of 150 ton per hour of clinker, pozzolana, gypsum and limestone, First it'll proceed to analyze the physics and chemistry aspects of the materials comprise the cement, the description of the production, technical standards, security and environment. It'll proceed to design some equipments through design software while others will be selected through catalogs given for the manufactures. It'll realize a brief description of the requirements to automate the Pre-milling system. Finally It'll submit the budget where It will detail the import, manufacture and mounting costs of equipments, start up the system and operation costs, which It'll give us an general idea about budget for the implementation of this kind of industrial projects.

Word keys: *technologies, plant, cement, Pre-milling, clinker, additives, design, select, costs, budget.*

1. Introducción

El cemento como producto hidratado mecánicamente resistente y estable tanto al aire como bajo el agua, actualmente tiene una alta demanda principalmente en obras públicas y el sector inmobiliario. Por lo que es importante aumentar la eficiencia y producción de los diferentes procesos de una planta cementera, en este caso para lograr este objetivo, se implementa el sistema de Pre-molienda de Clinker y Aditivos que está comprendido desde la sala de almacenamiento hasta la molienda final del producto.

Algunos equipos del sistema se diseñarán mientras que otros se seleccionarán cumpliendo siempre los conceptos ingenieriles, normas y estándares técnicos. Se realizarán planos con diversos cortes para detallar la ubicación de los equipos.

Finalmente se realizará el presupuesto correspondiente del proyecto realizando un análisis de costos y el consumo del sistema anualmente.

2. Proceso de molienda de cemento

2.1. Definición y clasificación

Se definen como cementos los conglomerantes hidráulicos que convenientemente amasados con agua, forman pastas que fraguan y endurecen a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables tanto al aire como bajo agua.^[1]

El cemento puzolánico que se produce principalmente en el Ecuador, y es indispensable para contrarrestar el efecto de los sulfatos presentes tanto en suelos, como en aguas freáticas, está compuesto mayoritariamente de sílice y alúmina, reacciona químicamente con la cal a temperatura ambiente y en presencia de humedad. Estas reacciones son tardías, lentas y continúan combinándose con el hidróxido de calcio que se libera con la hidratación del cemento. Los hormigones siguen ganando resistencia en forma notoria después de los 28 días de edad. Hasta 15-20% a los 56 días, hasta 30% a los 120 días de edad, siempre que los hormigones estén protegidos (curados)^[2]

Para la fabricación del cemento puzolánico tipo IP debe cumplirse la norma INEN 490:2010^[3]

La norma ASTM C 150 y la norma nacional INEN 152 especifica ocho tipos de cementos enumerados a continuación en la tabla 1:^{[4][5][6][7]}

Tipo	Aplicación
I	Para usarse cuando no se requieren las propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo.
IA	Cemento incorporador de aire para el tipo I donde se desea incorporación de aire.
II	Para uso general, especialmente cuando se desea una moderada resistencia a los sulfatos o calor de hidratación
IIA	Cemento incorporador de aire para el tipo II donde se desea incorporación de aire.
III	Para usarse cuando se desea alta resistencia inicial o temprana.
IIIA	Cemento incorporador de aire para el tipo III donde se desea incorporación de aire.
IV	Para usarse cuando se desea bajo calor de hidratación.
V	Para usarse cuando se desea alta resistencia a la acción de los sulfatos.

Tabla 1. Tipos de cementos según ASTM C150^[4]

2.2 Descripción de la producción de cemento

Entre los mayores productores de cemento en el mundo China lidera la tabla con una producción de 1.800'000.000 de toneladas métricas anuales. El Ecuador se encuentra entre los productores minoritarios de cemento con 5'800.000 toneladas métricas anuales.^[8]

La industria nacional suministra el 100% del cemento gris que se consume en el país, siendo el cemento Portland IP, que se elabora bajo la Norma INEN 490 (ASTM C595), el de mayor comercialización.

A continuación se presenta en la figura 1 el incremento del consumo de cemento desde el 2000 hasta el 2011, con un incremento anual aproximado de 7,9% y el incremento per cápita de 5,8%. Llegando a 5'705.731 Toneladas métricas de consumo en el 2011 y esperando que en el 2012 alcance un consumo de 6'200.000 toneladas métricas.^[9]

Mientras que en la empresa donde se desarrollará el proyecto se produce 450.000 toneladas métricas al año lo que la ubica en tercer puesto de partición en el mercado nacional.^[10]

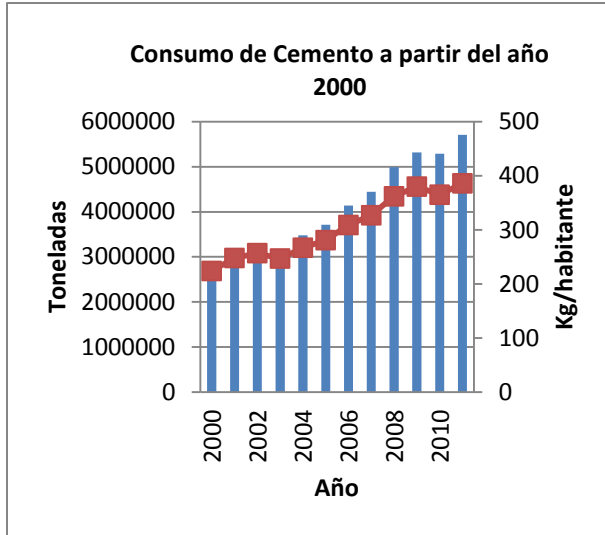


Figura 1. Mercado de cemento gris y consumo per cápita a partir del año 2000 [9]

3. Diseño y selección de equipos primarios del sistema de pre-molienda de clinker y aditivos

3.1 Descripción del sistema de pre-molienda

El sistema de Pre-molienda (ver figura 2) para la producción de cemento puzolánico IP con una capacidad de 150 t/h, deberá preparar la mezcla con 64% de clinker, 25% de puzolana, 7% de caliza y 4% de yeso que van a ser alimentados al molino de bolas con un tamaño de partícula de 4 mm con el siguiente proceso:

Dosificar la mezcla por medio de bandas de placas metálicas, luego por medio de una banda transportadora de 170t/h conducir el material hasta el elevador de cangilones de 320t/h, donde se eleva el material hacia el elemento clasificador; donde se clasifica por el tamaño de la partícula mediante una criba vibratoria o equipo similar, con una capacidad de 320 t/h, el material menor a 4 mm se descargará como producto final al molino de bolas, el material con una granulometría comprendida entre 4 mm a 80 mm se descarga hacia un triturador y el material con un tamaño superior a 80 mm se descargará como rechazo hacia una tolva para otro tratamiento.

Reducción del tamaño de las partículas mediante un triturador, con una capacidad de alimentación de 150 t/h y el producto con un tamaño menor a 4 mm; cuya descarga se alimenta al elemento de transporte hacia el elemento clasificador en un lazo de circuito cerrado.

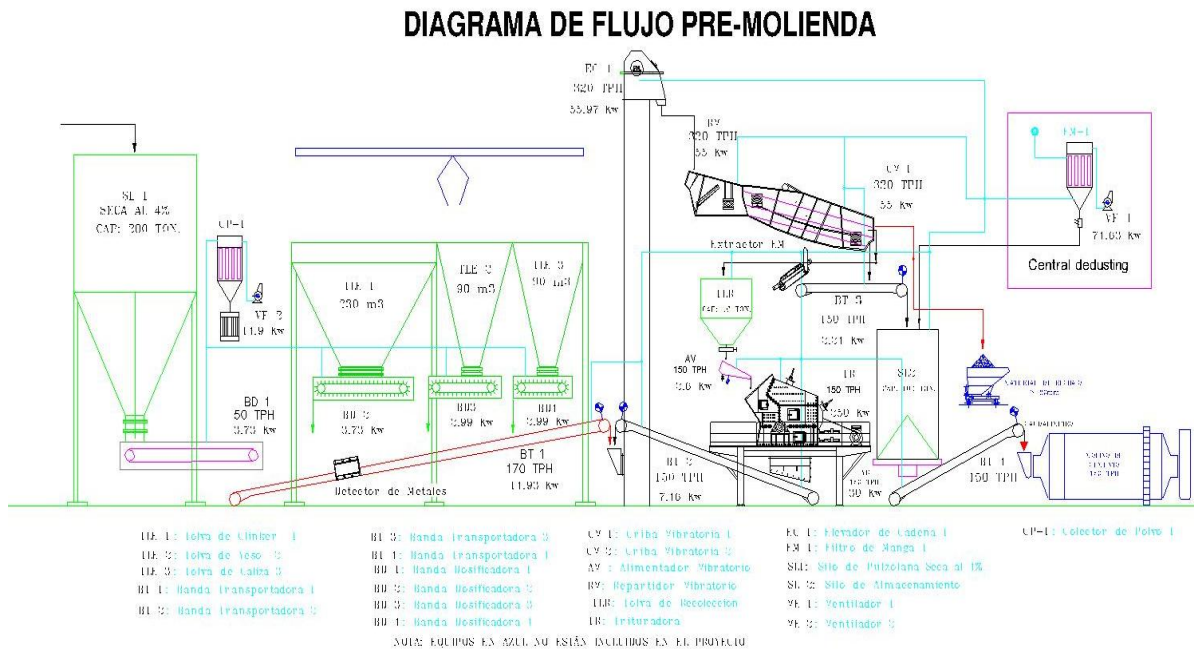


Figura 2. Diagrama de flujo del sistema de Pre-molienda

Como se puede observar en el diagrama de flujo de la figura 2, se muestra que el sistema comienza de la zona de almacenamiento con las tolvas SL1, TLE1, TLE2, TLE3, correspondiente al almacenamiento de puzolana, clinker, yeso y caliza respectivamente. Luego se transporta el material por medio de las bandas dosificadoras BD1, BD2, BD3, BD4 hacia la banda principal BT-1 donde el material es dirigido hacia el elevador de cangilones EC-1, el material es elevado hacia la criba CV1 donde es clasificado, luego el material mayor a 4 mm y menor a 80 mm pasa a la tolva TLR, luego hacia el triturador TR dirigiéndose hacia la banda BT-2 volviendo al elevador EC-1. El material menor o igual a 4 mm es dirigido mediante la banda BT-3 hacia la tolva pulmón SL2, y finalmente dirigido hacia el molino de bolas por medio de la banda transportadora BT-4.

3.2 Selección del triturador

Se alimenta del material dosificado (64% clinker, 25% puzolana, 7% caliza, 4% yeso), todos los agregados ingresan a la trituradora y serán pre-triturados juntos hasta obtener un tamaño de grano de 4 mm.

El material de alimentación es triturado mediante impactos altamente intensos originados por el rápido movimiento rotacional de martillos/barras fijados al rotor. Las partículas resultantes son posteriormente re-trituradas dentro de la trituradora al chocar contra las piezas de la trituradora y entre sí mismas, produciendo un producto más fino y con mejor formato.^[11]

Todas las trituradoras tienen una tasa de reducción limitada, lo que significa que la reducción de tamaño se hace por etapas. El número de etapas depende del tamaño de alimentación y del producto requerido con la siguiente ecuación:

$$R_{TR} = \frac{T_a}{T_p}$$

Donde:

R_{TR} = Es la tasa de reducción

T_a = Tamaño de partícula de alimentación, 80 mm

T_p = Tamaño de partícula del producto, 4 mm

$$R_{TR} = \frac{80}{4} = 20$$

Todas las operaciones de reducción de tamaño, tanto en trituración como en molienda se determinan sin duda por las características de alimentación de los minerales que circula hacia el circuito. La ley de Bond define que el trabajo consumido es proporcional a la nueva longitud de fisura producida por rotura de las partículas. Esta ley depende del índice de Bond que se define como el número de kW/h por tonelada necesarios para reducir un material de dimensión infinita (teóricamente) a un tamaño d_{80} de 100 μ m. Este índice nos indica la capacidad de los materiales de ser fragmentados y se obtiene a través de ensayos sobre muestras.

$$W_{TR} = 11 * w_i * C_a * \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)$$

Donde:

W_{TR} = Trabajo consumido en la operación, kWh/t

w_i = Índice de Bond 13.45 kwh/t

P = Tamaño del producto de grano 80% pasante, 3000 μ m (ver figura 3)

F = Tamaño de la alimentación de grano 80% pasante, 15000 μ m (ver figura 3)

C_a = Capacidad de Alimentación, 150 t/h

$$W_{TR} = 11 * 13.45 * 150 * \left(\frac{1}{\sqrt{3000}} - \frac{1}{\sqrt{15000}} \right) = 224 \text{ kW}$$

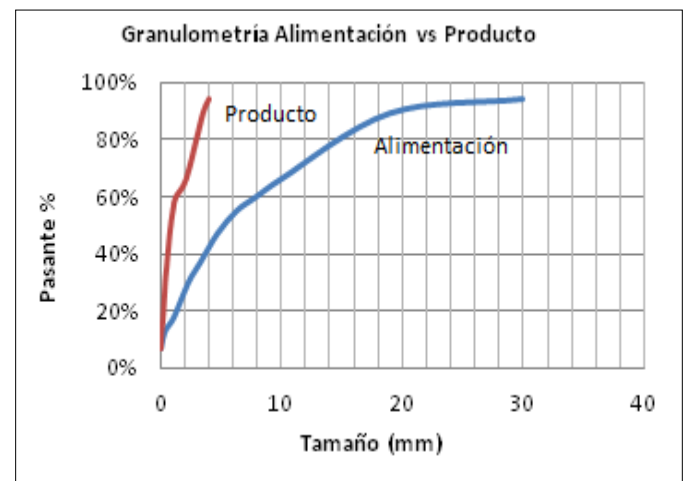


Figura 3. Granulometría de la alimentación y el producto (Clinker)^[12]

Las dimensiones de la entrada del triturador de 570x1500 mm, el tamaño del rotor de 1000x1500 mm, tiene un peso de 9770 Kg, se alimenta hasta tamaños máximos de 200 mm. En la figura 4 se tienen las dimensiones del triturador.

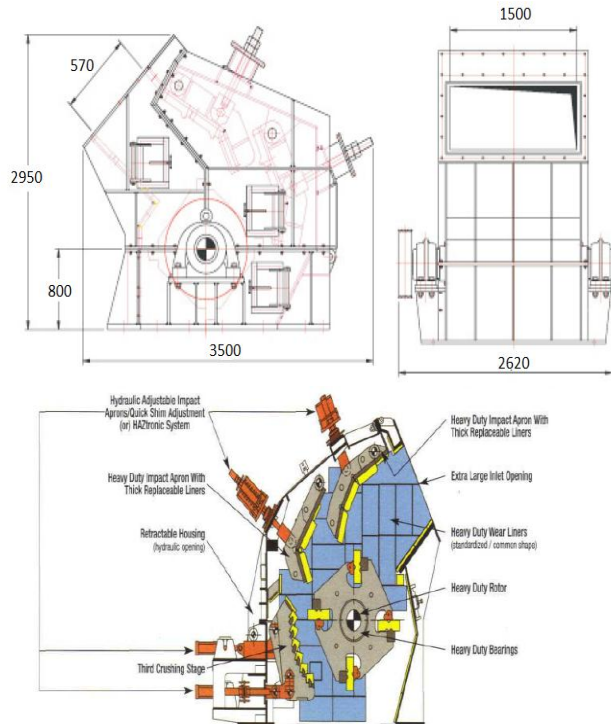


Figura 4. Dimensiones del triturador APSM-1015 [12]

3.3 Diseño de tolvas de almacenamiento

Las tolvas son tipologías estructurales construidas con el propósito de almacenar material granular o polvoriento, u otra sustancia líquida, y forman parte de operaciones de plantas industriales en las cuales son utilizados como almacenamiento de granos y productos de la manufactura.

3.3.1 Diseño de la tolva para puzolana

La primera tolva de alimentación es la tolva de puzolana (SL-1) que tiene una capacidad de 200 toneladas.

Primero se verifica el tipo de flujo que se puede presentar en la tolva, como se observa en la tabla 2 el tipo de flujo puede ser másico o tipo embudo.

Se requiere determinar las propiedades del material y el medio en el que actúa, como son: ángulo de reposo 40°, coeficiente de fricción interna 50,5° y coeficiente de fricción de pared de 28,2°

Tolvas de flujo de masa	Tolvas de Flujo de Embudo
*Las partículas se segregan, pero se reúnen en la descarga	*Las partículas se segregan y permanecen segregadas
*El flujo es uniforme	*La primera porción que entra es la última en salir
*La densidad del flujo es constante	*Pueden haber puntos muertos hasta que se realiza la limpieza completa del sistema
*Los indicadores de nivel funcionan adecuadamente	*Los productos tienden a formar puentes o arcos y luego a que se formen agujeros durante la descarga
*No quedan productos en zonas muertas donde pudieran degradarse	*El flujo es errático
*Mayor altura de la tolva	*La densidad puede variar
*Uso efectivo de la totalidad de la tolva	*Los indicadores de nivel se deben situar en puntos clave, para que puedan funcionar adecuadamente
*Lo primero que entra, lo primero que sale	*Baja altura de la tolva
	*Reducción de la capacidad efectiva de almacenamiento

Tabla 2. Características de flujo en la tolva [13]

Las fuerzas que actúan sobre el material almacenado tienden a compactarlo, y los esfuerzos cortantes en el material hacen que éste fluya. Se demostró que para un elemento en cualquier posición dentro de un silo de flujo masivo, la fracción de los esfuerzos compactadores respecto a los cortantes tiene un valor constante denominado factor de flujo determinado por la siguiente ecuación:

$$\text{factor de flujo, } ff = \frac{\text{Esfuerzo de compactacion}}{\text{Esfuerzos cortantes}}$$

En la parte cónica, el esfuerzo radial del material disminuye a medida que el diámetro del cono disminuye con la altura, de manera que el material podría compactarse y formar un arco y el material se estancará si el esfuerzo radial no podría vencer el esfuerzo de compactación. El esfuerzo de compactación σ_1 se relaciona con el esfuerzo de fluencia del material f_c a través de la siguiente relación:

$$f_c = E \left[\left(\frac{\sigma_1}{F} + 1 \right)^{1/q} + 1 \right]$$

Donde E, F, q son las propiedades cohesivas de los materiales.^[14]

Este esfuerzo es el mínimo que tiene que vencer el material para que fluya sin atascamiento ni arqueos. Para la tolva de puzolana se obtuvo 2.579 kPa.

3.3.2 Análisis de esfuerzos en la tolva de puzolana

Los sólidos en reposo almacenados en un recipiente, transmiten esfuerzos cortantes a las paredes del recipiente, es por ello que parte del peso es soportado por las paredes del recipiente debido a la fricción con las paredes, por lo que la presión no varía linealmente con la altura.

Aplicando la norma DIN 1055-6-2005-03 y el Eurocódigo UNE-ENV-1991-4 los cuales se basan en los métodos de Jenike para determinar los esfuerzos máximos que actúan en la parte cilíndrica y cónica de la tolva.^{[15][16]}

Y con la ayuda del software de diseño AUTODESK INVENTOR 2011 PRO se determinó los espesores de la tolva con el uso del método de elementos finitos como se muestra en la figura 5 (FEM).^[17]

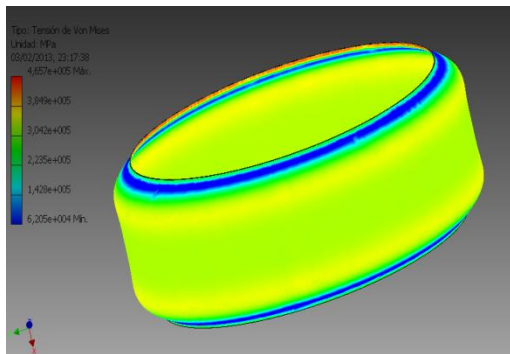


Figura 5. Simulación por medio de autodesk inventor

Entonces se obtienen los siguientes espesores para la tolva de puzolana como se muestra en la figura 6.



Figura 6. Espesores en la tolva de puzolana

Para evitar el desgaste prematuro de las tolvas y aumentar la vida útil de las tolvas, se construirán con chapas antidesgastes Hardox 450 o dilidur 400V.

4. Selección de equipos secundarios

Los equipos secundarios comprenden: el sistema colector de polvo CP-1^[18] cuya función es recolectar el polvo producido de las bandas dosificadoras; el sistema detector de metales^[19], el cual se encarga de detectar cualquier material metálico que pasa por la banda BT-1; el sistema de extracción de metales EM^[20], extrae el material metálico que pasa por la banda BT-3; el sistema de recolección del material de rechazo y el sistema de desempolvado FM-1 el cual controla el polvo que se produce en el edificio de pre-molienda.

4.1 Sistema de desempolvado

El caudal necesario para desempolvar los diferentes equipos del edificio de pre-molienda están determinados por la tabla 3:

MACHINE UNIT	SIZE (mm)	m³/h	DETAILS / REMARKS						
			A	B	C				
BELT CONVEYORS	650	4250	1500	1750	1000	m³/h			
	850	5250	2000	2250	1000				
	1000	6500	2500	2750	1250				
	1200	7750	3000	3250	1500				
	1400	8750	3500	3750	1500				
	1600	10000	4000	4250	1750				
APRON CONVEYORS	800	6500	3500	2000	1000	m³/h			
	1000	7500	4000	2500	1000				
	1200	8750	4500	3000	1250				
	1400	9750	5000	3500	1500				
	1600	11000	5500	4000	1500				
PIVOTING PAN APRON CONV	800		2500	9000	9000	m³/h			
	1000		3000	10000	10000				
	1200		3500	11000	11000				
	1400		4000	12000	12000				
BUCKET ELEVATORS			CHAIN m³/h		BELT m³/h		m³/h		
			A	B	A	B			
			400	1250	1000	2000		1000	1000
			500	1500	1000	2250		1000	1000
			630	2000	1250	2500		1250	1250
			800	2500	1250	3000		1250	1250
			1000	3000	1500	3500		1500	1500
			1250	3500	1500	4500		1500	1500
1600	4000	1500	6000	1500	1500				
TROUGH CHAIN AND SCREW CONVEYORS	200 250 315 400 500 630 800 1000	500 500 500 750 750 1000 1000 1250	PER 10m LENGHT						
AIR SLIDES			120% OF THE AIR BLOWER						
CALSSIFING-SCREEN		50	PER t/h (OPEN)						
VIBRATORY-SCREEN		450	PER m² (CLOSED)						
SWING-SCREEN		600	PER m² (CLOSED)						

Tabla 3. Caudal de Aire a desempolvar según el Equipo^[21]

Se diseñará un filtro de mangas tipo pulse-jet ubicado a +N 19.15 m. Se coloca un sistema de desempolvado para el control de polvos y evitar que el ambiente dentro del edificio se vuelva polvoso y sucio. Luego se colecta ese polvo en las mangas y se la dirige hacia la tolva pulmón.

La caída de presión en los ductos es igual a las pérdidas por accesorios, cabezal dinámico, ramal R_{BT1} y en la sección S:

$$SP_{Ductos} = H_{accesorios} + R_{BT1} + VP + R_S \text{ ec. 3.8}$$

$$SP_{Ductos} = 1.43 + 1.123 + 0.619 + 0.313 \\ = 3.485 \text{ "H}_2\text{O}$$

La caída de presión debido al filtro está en el rango de 4 – 8 “H₂O, se escoge $SP_{filtro} = 6$ “H₂O, por lo tanto la caída de presión total es:

$$SP_{TOTAL} = SP_{Ductos} + SP_{Filtro} \text{ ec. 3.9}$$

$$SP_{TOTAL} = 3.485 + 6 = 9.485 \text{ "H}_2\text{O}$$

Con la herramienta de diseño LOREN COOK^[22], con $SP_{TOTAL} = 9.5$ “H₂O, $Q_{total} = 18330$ CFM, a una altura de 8528 ft y a temperatura ambiente, el ventilador es tipo centrífugo. El programa determina que el modelo 170-MHB-HD con un motor de 100 HP a 2486 RPM. A continuación en la tabla 3 se encuentran las características del ventilador VE1 seleccionado.

Modelo	170-MHB-HD
CFM	18330
SP(in H2O)	9.5
SP(Fan)	2486
Impeler(in)	29.6
Peso(kg)	480
Potencia (HP)	105
Motor (HP)	100

Tabla 3 Características del ventilador VE1^[22]

5. Sistema de automatización

5.1. Descripción

La puesta en marcha comienza con el encendido de forma secuencial de los motores eléctricos desde las bandas dosificadoras (BD1, BD2, BD3, BD4), el ventilador VE2, de ahí sigue la banda BT-1, elevador de cangilones EC-1, el alimentador vibratorio RV, la criba CV-1, la banda BT-2, el alimentador vibratorio RV, el triturador TR, la banda BT-2, la válvula rotatoria VB, la banda BT-4, el ventilador VE1 y la válvula rotatoria VR.

6. ANÁLISIS DE COSTOS

6.1. Costos de fabricación e importación de equipos

El costo por peso de los equipos fabricados localmente son: tolvas, cubierta, cerchas, piso, pasamanos, ductos, escaleras.

Entre los equipos importados como: bandas transportadoras, bandas dosificadoras, elevador de cangilones, pre-cribador, criba, alimentador vibratorio, triturador, válvulas rotatorias, sistemas de control. Sus precios de venta están determinados por los "inconterms" (internacional commercial terms) que son los términos internacionales de comercio, son normas acerca de entrega de mercancías, se usan para dividir los costes de las transacciones comerciales internacionales, delimitando las responsabilidades entre el comprador y el vendedor.

6.2 Costos de montaje y puesta en marcha

Se tiene que el Suministro, Fabricación y Montaje del sistema de Pre-molienda de clínker y aditivos tiene un costo total de 6'500.000 USD.

6.3 Costo de operación

Para este costo se considera el personal trabajando en la planta para el control y desempeño normal de la planta.

A continuación en la tabla 4 se muestra un resumen de los costos obtenidos para el suministro, fabricación, montaje, puesta en marcha y operación del sistema de Pre-molienda de clinker y aditivos.

COSTOS	USD
Fabricación local (metalmecánicos)	987.700
Equipos importados	5'400.000
Montaje	165.000
Operación anual	900.000

Tabla 4. Costos del proyecto

7. Conclusiones y recomendaciones

Para obtener un cemento Puzolánico IP de calidad según la norma INEN 490, se debe controlar la proporción de sus diferentes componentes como el clínker, puzolana, yeso y caliza; tanto su composición química como sus

cualidades físicas, estas últimas debido a los procesos mecánicos de producción.

El consumo del cemento a partir del 2000 se ha incrementado 7.9% cada año, por lo que en el 2012 alcanzaría un consumo de 6'200.000 Toneladas métricas, ya que la empresa se encuentra entre los 3 primeros productores del país por lo que es importante la expansión, creación de nuevas líneas de producción y mejoramiento de la tecnología para cubrir la demanda.

Se tiene 64% de ciner y 25% de puzolana por lo que el 89% del material mezclado es abrasivo, en la parte cónica o en la cuña de las tolvas se deben construir con chapas antidesgastes como Hardox 450 o dillidur 400 V, las bandas tienen protección a la abrasión, el elevador de cangilones debe ser de cadena para soportar la carga y abrasión del material a elevar, el triturador está construido con recubrimientos en las paredes resistentes a la abrasión.

Las cribas y alimentadores vibratorios estarán montados en el edificio por lo que se los debe construir con bancadas antivibración y así evitar la resonancia en la estructura del edificio.

En el diseño de las tolvas se utilizó el programa INVENTOR Professional 2011 por medio del análisis de elementos finitos se logró de una manera segura y rápida la determinación de los esfuerzos y deformaciones que se generan en la tolva; se utilizó la norma Alemana DIN 1055 para la determinación de las presiones en las tolvas.

Para el diseño y selección de las bandas transportadoras se utilizó las normas CEMA y la norma alemana DIN 22101, la marca de las bandas es STHIM.

El Costo de Fabricación local es de 987.700 USD, el costo de importación de equipos es de 5'400.000 USD, el costo de montaje de los equipos es de 165.000 USD, el costo de operación anual del sistema de pre-molienda es de 900.000 USD. No está incluido el costo de instalación eléctrica y obra civil.

El proyecto es coordinado con varias disciplinas como: ingeniería mecánica, eléctrica, electrónica y civil, por lo que se ha establecido la información técnica para el posterior desarrollo de estas ingenierías del proyecto.

Referencias

[1] ANTER, Asociación Nacional Técnica de Estabilizados de Suelos y Reciclado de Firmes.
[2] Folleto Técnico, El Cemento Pórtland Puzolánico Tipo IP, LAFARGE CEMENTOS ECUADOR.

[3] NORMA NTE INEN 490:2011 QUINTA REVISIÓN, Cementos Hidráulicos Compuestos.

[4] NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 152:2010, Cemento Portland. Requisitos.

[5] USER'S GUIDE TO ASTM SPECIFICATION C 94 ON READY-MIXED CONCRETE, CHAPTER 5 MATERIALS, Section 5.1.1, Page 23.

[6] USER'S GUIDE TO ASTM SPECIFICATION C 94 ON READY-MIXED CONCRETE, CHAPTER 5 MATERIALS, Section 5.1.1, Page 21.

[7] Catálogo, Cementos Bio Bio.

[8] USGS: Mineral Commodity Summary 2011.

[9] INECYT, Mercado de Cemento Gris y Consumo per cápita del 2000.

[10] INECYT, Estadística de la Comercialización de Cemento Gris en el Ecuador, Histórico de la participación en el mercado por empresa a partir del año 2000.

[11] METSO, manual de trituración y cribado.

[12] HAZEMAG, APS, APSM, APSH – Secondary Impactors.

[13] PERRY, Manual del ingeniero químico 6ta edición.

[14] Multiphase Flow Handbook, Chapter 9 Dry Powder Flows, Gabriel I. Tardos; Paul R. Mort.

[15] DIN 1055-6:2005-03: Design loads for buildings. Loads in silo bins.

[16] UNE-ENV 1991-4, Acciones en Silos y Depósitos

[17] AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2011.

[18] US AIR FILTRATION Inc, Air to Media Guide.

[19] WAGNER MAGNETE, Metal detector tandem system, reliable protection of machines and plants.

[20] KINDER, Bulk materials handling solutions, magnetic separator.

[21] HGRS LTD., Holcim Design Criteria. Standard Design Criteria, Basic Requirements, 2001.

[22] LOREN COOK COMPANY, Compute A-Fan Version 9.2