



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE LODOS EN LA
TRITURACIÓN DE AGREGADOS EN UNA CANTERA DE PIEDRA CALIZA**

Ing. Juan Rodolfo Donis Peter

Asesorado por el MSc. Ing. Sergio David Cortez Ramírez

Guatemala, agosto de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE LODOS EN LA
TRITURACIÓN DE AGREGADOS EN UNA CANTERA DE PIEDRA CALIZA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ING. JUAN RODOLFO DONIS PETER

ASESORADO POR EL MSC. ING. SERGIO DAVID CORTEZ RAMÍREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRÍA (MAGISTER SCIENTIFICAE) EN GESTIÓN INDUSTRIAL

GUATEMALA, AGOSTO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|-------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| VOCAL I | Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno |
| VOCAL II | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL III | Ing. Elvia Miriam Ruballos Samayoa |
| VOCAL IV | Br. Walter Rafael Véliz Muñoz |
| VOCAL V | Br. Sergio Alejandro Donis Soto |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

DIRECTORA DE LA ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

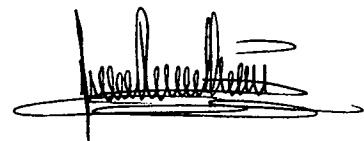
| | |
|-------------|-------------------------------------|
| EXAMINADORA | Dra. Mayra Virginia Castillo Montes |
| EXAMINADOR | Ing. César Augusto Akú Castillo |
| EXAMINADOR | Ing. Pedro Miguel Agreda Girón |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE LODOS EN LA TRITURACIÓN DE AGREGADOS EN UNA CANTERA DE PIEDRA CALIZA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 11 de octubre de 2012.



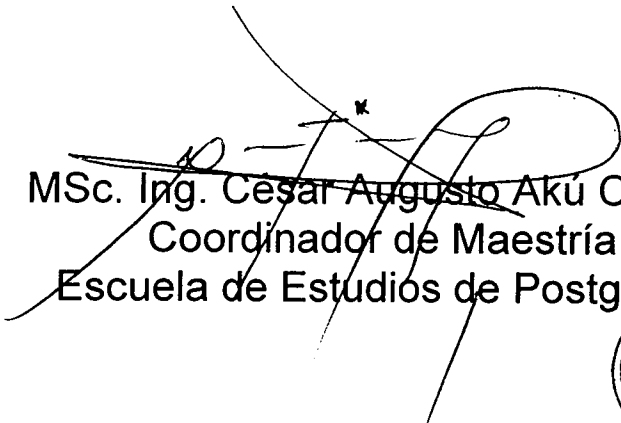
Ing. Juan Rodolfo Donis Peter

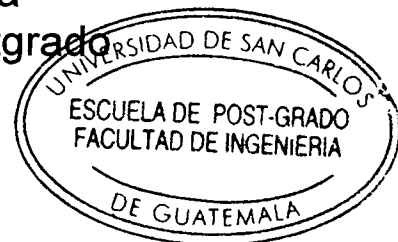


Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios
De Postgrado
Teléfono 2418-9142

Como Coordinador de la Maestría en Gestión Industrial, y revisor del trabajo de graduación titulado **“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE LODOS EN LA TRITURACIÓN DE AGREGADOS EN UNA CANTERA DE PIEDRA CALIZA”**, presentado por el Ingeniero Mecánico **Juan Rodolfo Donis Peter**, apruebo y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


MSc. Ing. César Augusto Akú Castillo
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, agosto de 2013.



Como Revisor de la Maestría en Gestión Industrial del trabajo de graduación titulado **OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE LODOS EN LA TRITURACIÓN DE AGREGADOS EN UNA CANTERA DE PIEDRA CALIZA.** Presentado por el Ingeniero Mecánico **Juan Rodolfo Donis Peter**, apruebo el presente y recomiendo la autorización del mismo.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, agosto de 2013.



Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios
De Postgrado
Teléfono 2418-9142

La Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística del trabajo de graduación titulado **“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE LODOS EN LA TRITURACIÓN DE AGREGADOS EN UNA CANTERA DE PIEDRA CALIZA”** presentado por el Ingeniero Mecánico **Juan Rodolfo Donis Peter**, apruebo el presente y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, agosto de 2013.

Cc: archivo
/la



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al trabajo de graduación de la Maestría en Gestión Industrial titulado: **“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE LODOS EN LA TRITURACIÓN DE AGREGADOS EN UNA CANTERA DE PIEDRA CALIZA”**, presentado por el Ingeniero Mecánico **Juan Rodolfo Donis Peter**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A large, handwritten signature in black ink, enclosed within a large, hand-drawn oval shape. The signature is stylized and appears to read 'Murphy Olimpo Paiz Recinos'.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, agosto de 2013.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | V |
| LISTA DE SÍMBOLOS | VII |
| GLOSARIO | IX |
| RESUMEN..... | XI |
| INTRODUCCIÓN | XIII |
| ANTECEDENTES..... | XV |
| JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN | XIX |
| DEFINICIÓN DEL PROBLEMA | XXI |
| DELIMITACIÓN Y ALCANCES DEL PROBLEMA | XXIII |
| OBJETIVOS..... | XXV |
| | |
| 1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL..... | 1 |
| 1.1. Hipótesis..... | 1 |
| 1.2. Variables..... | 1 |
| 1.2.1. Independientes..... | 1 |
| 1.2.2. Dependientes | 1 |
| 1.3. Costos..... | 2 |
| 1.4. Productividad | 4 |
| 1.5. Logística | 5 |
| 1.5.1. Plan maestro de producción..... | 5 |
| 1.5.2. Transporte..... | 6 |
| 1.6. Materia prima..... | 9 |
| 1.6.1. Evaluación geológica de los yacimientos..... | 9 |
| 1.6.2. Estudio de formaciones o yacimientos..... | 10 |
| 1.6.3. Estudio preliminar de áreas interesantes | 10 |

| | | |
|---------|--|----|
| 1.6.4. | Estudio detallado | 11 |
| 1.6.5. | La cantera..... | 13 |
| 1.7. | Agregados | 14 |
| 1.7.1. | Propiedades de los agregados | 14 |
| 1.7.2. | Clasificación de los agregados | 18 |
| 1.7.3. | Usos de los agregados | 19 |
| 1.7.4. | Requisitos de calidad..... | 20 |
| 1.7.5. | Sustancias nocivas en los agregados..... | 22 |
| 1.8. | Trituración | 23 |
| 1.8.1. | Mecanismos de fractura..... | 23 |
| 1.8.2. | Tipos de trituradoras | 25 |
| 1.8.3. | Circuitos primarios de trituración | 25 |
| 1.8.4. | Circuitos secundarios de trituración | 26 |
| 1.9. | Clasificación | 27 |
| 1.10. | Sistemas de lavado | 28 |
| 1.10.1. | Lavado de gruesos | 29 |
| 1.10.2. | Lavado de arenas | 30 |
| 1.10.3. | Lodos | 31 |
| 2. | MARCO METODOLÓGICO | 37 |
| 2.1. | Enfoque y tipo de investigación | 37 |
| 2.2. | Definición de población | 39 |
| 2.3. | Identificación del marco muestral | 39 |
| 2.4. | Determinación del tamaño de muestra | 39 |
| 2.5. | Análisis estadístico propuesto | 40 |
| 2.6. | Técnicas de recolección de datos | 40 |
| 2.7. | Validación..... | 41 |
| 2.8. | Fuentes de información | 41 |
| 2.9. | Recursos necesarios | 41 |

| | | |
|------|---------------------------------|----|
| 3. | RESULTADOS | 43 |
| 3.1. | Resultado 1..... | 43 |
| 3.2. | Resultado 2..... | 47 |
| 3.3. | Resultado 3..... | 51 |
| 3.4. | Resultado 4..... | 55 |
| 4. | DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 57 |
| 4.1. | Discusión de resultados 1 | 57 |
| 4.2. | Discusión de resultados 2..... | 58 |
| 4.3. | Discusión de resultados 3..... | 61 |
| 4.4. | Discusión de resultados 4..... | 62 |
| | CONCLUSIONES | 65 |
| | RECOMENDACIONES | 67 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 69 |
| | APÉNDICES | 73 |
| | ANEXOS | 87 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|----|--|----|
| 1. | Gráfica de caudal vs Presión..... | 44 |
| 2. | Tiempo de operación vs presión..... | 46 |
| 3. | Porcentaje de humedad vs presión | 47 |
| 4. | Tiempo de operación..... | 50 |
| 5. | Porcentaje de humedad | 51 |

TABLAS

| | | |
|------|--|----|
| I. | Relación de partículas trituradas | 24 |
| II. | Trituradoras según su función | 25 |
| III. | Comparativo tiempo y humedad vs presión | 45 |
| IV. | Tiempo y humedad ensayo cal hidratada..... | 49 |
| V. | Resultados obtenidos en pruebas de campo | 60 |
| VI. | Costos de cambio completo de telas a filtro prensa | 62 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|-------------------------|---------------------------------------|
| kg/m³ | Kilogramo por metro cúbico (densidad) |
| PSI | Libra por pulgada cuadrada (presión) |
| MPa | Mega pascal (presión) |
| m³ | Metro cúbico (volumen) |
| μm | Micrómetro (distancia) |
| mm | Milímetro (distancia) |
| ton | Tonelada métrica (peso) |

GLOSARIO

| | |
|--|--|
| Agregados | En construcción, material utilizado en la fabricación de concreto o asfalto, como relleno en la adición de cemento o bitumen. |
| Angularidad | Explica la forma del material, si es de aristas pronunciados o de bordes redondeados. |
| Calidad | Percepción del bien o servicio por parte del cliente, que permite una comparación con el fin de crear una diferencia que agregue valor. |
| Cantera | Área dedicada a la explotación minera a cielo abierto, de donde se obtienen minerales utilizados para ornamento o industria. |
| Coefficiente de compresibilidad | Mide la resistencia de un material a la compresión uniforme y, por tanto, indica el aumento de presión requerido para causar una disminución unitaria de volumen dada. |
| Costo | Valor monetario necesario para producir un bien o servicio. |
| Covec | Código de Ética, Valores y Conducta, que rige un estándar de vida para los colaboradores de Grupo Progreso. |
| Deshidratación | Reducción de humedad parcial o completa de un cuerpo. |

| | |
|-------------------------------|---|
| Galletas de lodo | Como comúnmente se le conoce a los lodos de arcilla prensados. |
| Lodos | Emulsión de arcillas o limos contenidos recolectados por un afluente de agua, generalmente arrastrada u obtenida de un proceso de limpieza o tratamiento. |
| Optimización | Análisis de un proceso o procedimiento, con el fin de realizarlo de una mejor manera, económica, rápida, eficiente. |
| Proceso | Conjunto de actividades coordinadas, que tienen un fin común. |
| Resistencia específica | Es la resistencia que opone a la filtración una cantidad de lodo depositada en un área de la superficie filtrante. |
| Trituración | Proceso para la reducción del tamaño de un material |

RESUMEN

El estudio busca, principalmente, optimizar el proceso de deshidratación de lodos de arcilla provenientes de la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza, a través de la eficiencia en su manejo. Para llegar al método adecuado de deshidratación de los lodos, como primer punto se debe determinar la influencia de las variables en dicho proceso, posteriormente identificada su naturaleza (dependiente e independiente), se evalúa la posibilidad de realizar cambios en los ajustes directamente en el equipo de filtros prensa y bombas de lodos.

Se identificó como variable independiente la presión de inyección de lodos hacia la cámara de los filtros, como variables dependientes se encontró la humedad de los lodos ya prensados (en forma de galletas), el tiempo completo de operación de los filtros que incluye cierre y presurización de placas, bombeo de lodos, elevación de presión de bombeo, liberación del circuito y traslación de placas.

A 4 MPa de presión en inyección de lodos, se logró una reducción de humedad de 11,83 por ciento respecto la prueba inicial a 0,62 MPa. En este punto los lodos prensados presentaban un 25,91 por ciento de humedad.

A través de las pruebas realizadas, variando la presión desde 0,62 MPa hasta 4 MPa, se realizaban inspecciones rutinarias al equipo, verificando las condiciones operativas, cerciorándose que no existiera ninguna alteración debido al incremento de la presión de inyección. En las dos últimas pruebas se pudo observar la formación de grumos de arcillas, que por su tamaño

ocasionaron daños a las telas filtrantes, por lo tanto, no se recomienda el aumento de presión de inyección por encima de los 3,10 MPa.

Con base en la investigación realizada, se encontró información de manejo y estabilización de suelos, en donde se utilizaba cal hidratada como agente reductor de humedad, por lo que se propuso la utilización de este compuesto como aditivo, con el cual se logró reducir el porcentaje de humedad en los lodos prensados por debajo de 25 por ciento.

Por medio de optimización del proceso de deshidratación de lodos en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza, se obtuvieron varios beneficios dentro de los que destacan: el ahorro en mano de obra, consumo de energía eléctrica y costos de mantenimiento, maximizando las utilidades de los accionistas, además de mejorar la logística de traslado de los lodos, reduciendo contaminación en el traslado y disposición de los mismos.

INTRODUCCIÓN

El incremento en la demanda de agregados para la construcción ha demandado conforme el pasar del tiempo, productos de mejor calidad que ayuden a la reducción de costos y garantizar obras duraderas; la presencia de arcillas en los agregados provenientes de piedra caliza incrementan el consumo de cemento en mezclas para construcción, además ocasionan mala adherencia en el concreto lo que provoca fisuras estructurales.

Según García y Martínez (1992), las arcillas no son más que producto de la meteorización de los materiales presentes, los cuales estuvieron por muchos años sujetos a mayores presiones y temperaturas, generalmente presentes en los yacimientos de cuarzo, feldespato, carbonato, yeso, entre otros.

Por su disposición en el banco de explotación, estas arcillas contienen porcentajes de humedad elevados, este material se adhiere a las paredes de las rocas aún sin procesar, este material por su consistencia permanece adherido al producto dentro del proceso de trituración y es muy difícil removerlo de las partículas ya reducidas (pedrín y arena), debido a esto es necesario contar con un sistema de lavado de material, buscando de esta manera remover el mayor porcentaje de contaminación del producto terminado.

El material era lavado por un sistema de agua a presión generando lodos de arcillas, estos lodos eran desechados a través de un sistema de drenajes hacia una planta de recolección, donde posteriormente eran trasladados a pilas de decantación donde se secaban al sol, esto generaba contaminación en los trayectos del traslado, además, que se requería inversión en camiones y gasto excesivo en combustible y mantenimiento, para darle el tratamiento a dichos lodos.

Con la instalación de un nuevo sistema de lavado de lodos, el proceso de extracción de los lodos y limpieza del agregado mejoró sustancialmente, los lodos recolectados por el mencionado sistema de lavado, son deshidratados a través de filtros prensa para disponer de ellos de manera más económica y menos contaminante. El sistema no fue del todo efectivo, pues los lodos aún poseían bastante presencia de humedad y su manejo no podía ser el adecuado, físicamente se podía notar esto, ya que presentaban aún una consistencia lechosa.

Este estudio tiene como objetivo optimizar el proceso de deshidratación de los lodos, reduciendo la humedad de los lodos ya prensados por debajo de valores manejables, derivado de esto se reducirá la contaminación ambiental, se buscará mejores y más bajos costos por ahorro en energía eléctrica, mantenimiento, horas hombre, entre otros; a través de la reducción de los tiempos de operación de los filtros prensa, con el fin de maximizar las utilidades de la empresa.

ANTECEDENTES

La cantera está compuesta de caliza, roca sedimentaria, mayormente compuesta por carbonato de calcio, CaCO_3 , en su mayoría calcita, los yacimientos de este mineral, generalmente están acompañados de otros minerales como: arcillas, hematita, siderita, cuarzo, entre otros. Según Ingenieros Consultores de Centroamérica, S.A. (2000), estos minerales ponen en riesgo la calidad de este mineral, al ser utilizado y transformado en agregados, para su utilización en concreto, asfalto y otras aplicaciones, pues modifican negativamente la adherencia y dureza de la roca, dentro de la aplicación, ya sea concreto o asfalto.

Teniendo esto en cuenta, en sus inicios, se instaló una planta procesadora de trituración de agregados contiguo al banco de material. La planta contaba con un sistema de lavado superficial del material, para lo cual utilizaban grandes cantidades de agua, esta emulsión de agua/sedimento era recolectada y se decantaba en unas piletas de absorción, en las cuales, a través del tiempo, se secaba. Esto se realizaba dentro de las instalaciones. Las áreas utilizadas para dicho procedimiento se reducían con el tiempo, asimismo, el movimiento de estos desechos, generaba costos altos en logística de transporte, derrames, contaminación, entre otros.

El procedimiento de separación de la arcilla de la roca pura se realizaba en zaranda de preclasificación, en la cual se separaba el material de 38,1 milímetros o menor, el cual, aún contenía bastante piedra caliza aprovechable. Debido a su alto porcentaje de arcilla adherida, este material perdido era el sacrificio para lograr un producto limpio y de buena calidad.

Analizando el gran porcentaje de material desechado durante sus años de operación, en 2009, la Gerencia General ejecutó el proyecto de instalar una sección adicional en el proceso, que se encargaría de lavar y recuperar esa materia prima, acumulada durante varios años y almacenada en las instalaciones de cantera, más las que sería producida a partir de la instalación y puesta en marcha del nuevo equipo, removiendo las cantidades exageradas de arcillas adheridas a la misma, recolectando la arcilla desprendida de la roca, deshidratándola y prensándola, facilitando así su desecho, mejorando costos de traslado y reduciendo la contaminación provocada por derrames.

Luego de instalada la sección de lavado de arcillas, adicionada a la existente trituradora y clasificadora de material, se observa que los filtros prensa, por si solos, no son capaces de escurrir en gran porcentaje la humedad generada durante el lavado del producto terminado.

Esta planta trituradora de agregados es la única en Guatemala que cuenta con un sistema de lavado y prensado de lodos de alta tecnología.

En Guatemala existen varias empresas dedicadas a la trituración de agregados, dentro de los procesos conocidos en el mercado se procesan agregados vía seca y vía húmeda (lavado), en el último caso, el único proceso que llevan a cabo es el lavado de los materiales con agua a presión, el cual incorpora puntos de aspersion a lo largo de las zarandas de clasificación, tolvas de transición de productos, gusanos lavadores, entre otros.

Según el proveedor encargado de la venta del equipo y la investigación que se realizó previo a la venta del equipo, menciona que la instalación de esta sección de filtración de arcillas es la más grande y tecnológica de Centroamérica, que ningún país posee un equipo similar a este, ratificando que, únicamente usan procedimientos de lavado sencillos como el que se mencionó con anterioridad.

No se encontró información de alguna empresa que tuviese inconvenientes con la reducción de humedad en el proceso de prensado de lodos utilizando filtros prensa, ni que utilizara aditivo cal hidratada, como agente de reductor de humedad, sin embargo, la utilización de cal hidratada es común para el tratamiento y estabilización de suelos a nivel agrícola y construcción.

JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El proceso de extracción y limpieza de arcillas del producto terminado, en forma de lodos prensados, a través de la utilización de una línea recién instalada de filtros prensa, no resultó tan eficiente como se esperaba. La instalación de esta sección de la planta tenía como objetivo que el manejo poslimpieza de las arcillas fuera más sencillo, menos contaminante y de costo reducido. Por consiguiente se pretende optimizar la deshidratación de los lodos de arcillas provenientes del lavado, en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza.

La importancia del estudio reside en obtener una reducción de costos en la logística de disposición y desecho de los lodos, generando mayores utilidades para los accionistas. Además, reducir el impacto ambiental ocasionado por el manejo de los lodos de arcilla, contribuyendo de esta manera a la conservación del medio ambiente en el territorio guatemalteco.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Debido al bajo índice de plasticidad de los lodos prensados de arcilla y la problemática del manejo de estos desechos, se plantea la gran pregunta de investigación así:

¿Cómo optimizar el proceso de deshidratación de lodos de arcillas provenientes del lavado en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza?

Se plantean 4 preguntas secundarias de investigación:

- ¿Cómo influye la variable presión de inyección sobre las variables: tiempo de prensado y porcentaje de humedad de los lodos, en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza?
- ¿Qué variable química está involucrada en la reducción del porcentaje de humedad de los lodos, en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza?
- ¿Cuál es el menor costo obtenido con la mejora de la deshidratación de lodos en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza?
- ¿Cómo minimizar el impacto ambiental en el área de influencia, ocasionado por la disposición y transporte de lodos, en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza?

DELIMITACIÓN Y ALCANCES DEL PROBLEMA

En este trabajo de graduación se desarrollará la optimización del proceso de deshidratación de lodos, provenientes del lavado de materiales en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza.

Sin embargo, el presente trabajo cubrirá, solamente, los lodos de la cantera de piedra caliza descrita al inicio del documento, en donde se realizarán las pruebas respectivas con el fin de mejorar el índice de plasticidad de las galletas de arcilla.

La finalidad de este estudio es maximizar la generación de utilidades de los accionistas, buscando una reducción en costos por traslado de desechos y reducción de tiempos de operación.

Por otro lado, se busca la minimización del impacto ambiental por la generación de desechos líquidos.

OBJETIVOS

General

Optimizar el proceso de deshidratación de lodos de arcilla, en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza.

Específicos

1. Determinar la influencia de la variable presión de inyección sobre las variables: tiempo de prensado y porcentaje de humedad de los lodos, en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza.
2. Determinar la existencia de una variable química que reduzca el porcentaje de humedad de los lodos en la trituración de agregados, en una cantera de piedra caliza.
3. Definir el menor costo operativo en el proceso de deshidratación de lodos en la trituración de agregados, en una cantera de piedra caliza.
4. Minimizar el impacto ambiental en el área de influencia, reduciendo la contaminación por mala disposición y transporte de lodos húmedos, en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza.

1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

1.1. Hipótesis

- La deshidratación de lodos en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza, está determinado por el tiempo y presión de bombeo de lodos.
- La reducción del tiempo de prensado genera ahorros en costos por menor consumo de energía eléctrica y mano de obra.
- Es más fácil y económica la logística del manejo de desechos sólidos vs desechos líquidos.

1.2. Variables

1.2.1. Independientes

- Presión de inyección de lodos
- Composición del lodo

1.2.2. Dependientes

- Humedad presente en la galleta de arcilla
- Tiempo de prensado de lodos

1.3. Costos

Según Horngren et al (2007), un costo se define como un valor monetario o no monetario, destinado al proceso de producción tanto de bienes como de servicios.

Se define costo directo al costo que está ligado directamente al proceso productivo, este puede ser asignado con facilidad a las unidades producidas, un costo indirecto no puede ser fácilmente asignado, su asignación debe realizarse bajo una distribución secundaria, de esta manera ya puede repartirse el costo a través de criterios razonables y justos.

Además, enuncia que existen 3 factores que influyen en la clasificación de un costo como directo o indirecto:

- La importancia del costo: mientras más bajos sean los costos, más difíciles de rastrear serán.
- Tecnología disponible para recopilar información: gracias a la tecnología es más fácil adjudicar costos a un proceso fabril, por lo que puede realizarse una mejor clasificación, e incluir un mayor porcentaje de costos como directos.
- El diseño de las operaciones: cuanto más exclusivas de un proceso sean las instalaciones, más fácil la clasificación de los costos.

Los costos, también pueden clasificarse en variables y fijos. Un costo variable, como su nombre lo indica, varía al ritmo de producción, su relación es directamente proporcional a las unidades fabricadas, se puede mencionar

dentro de estos costos: el combustible, materia prima, comisiones de ventas, empaques, entre otros.

Un costo fijo es aquel que estará no importando cuándo y cuánto se produzca, no está relacionado directamente con las unidades de fabricación, por ejemplo, alquileres de inmuebles, en algunos, casos mano de obra, etc.

Según su origen, los costos podrían clasificarse como:

- Costos de mantenimiento: estos están definidos por los valores de materiales, repuestos y mano de obra utilizados en la reparación de equipos.
- Costos de materia prima: se define como el costo de adquisición de los insumos directos necesarios para la fabricación de un bien.
- Costos de transporte: comprende los costos logísticos de traslado de materias primas hacia el proceso productivo, como también, deben contemplarse el movimiento de producto terminado hacia el consumidor final o almacenes transitorios.
- Costos de ventas: costos relacionados con la actividad comercial de una empresa, pago de asesores de venta, comisiones, entre otros.
- Costos de fabricación: costos directos en que se incurre con la finalidad de realizar una unidad de un bien o servicio.

- Costos administrativos: todos aquellos costos legales, impuestos, papelería y útiles, mobiliario y otros rubros que no se contemplen dentro de los costos fabriles.

1.4. Productividad

Según Olavarrieta (1999), la productividad está definida como una relación entre algo que sale y lo que entra en un proceso; lo que se obtiene contra los recursos utilizados con el fin de obtener el producto final. Puede expresarse como porcentajes o bien como una relación de una unidad de medida entre otra unidad de medida. Puede estar definida también, como la relación entre la producción y la capacidad instalada de un equipo, buscando el rendimiento de dicho proceso.

Optimizar implica la búsqueda de un punto máximo o mínimo de una función restringida por ciertos valores. El alcanzar alguno de estos puntos, dependiendo cuál es el objetivo, significa obtener la mejor solución dentro de las posibles planteadas.

La optimización en un proceso de trituración de agregados, se enfoca en hacer eficiente una operación, basándonos 3 restricciones que son: calidad, costos y tiempo.

- Un producto de calidad implica la inversión en equipos especializados, plantas productoras más complejas que contribuyan a obtener un producto más limpio, con características uniformes, sin contaminación, etc.

La reducción de costos será determinada por ahorros en rubros administrativos y operativos como compras, mantenimiento y materiales y repuestos, combustibles y demás insumos directos e indirectos.

Optimización en costos unitarios, está definido por la relación costo/unidad producida, por ende, mientras más se produzca, mayor dilución de costos habrá, por lo que será más eficiente, ya que se aprovechan de mayor manera los insumos disponibles.

El tiempo influye directamente en la optimización del proceso, aprovechando al máximo la disponibilidad del equipo, recurso humano y horas laborales ordinarias, luz natural y así evitando la utilización de energía eléctrica generada o comprada.

1.5. Logística

La logística comprende el conjunto de herramientas, personal, actividades y procedimientos para cumplir un objetivo, ya sea prestar un servicio o la fabricación de algún bien; comprende tareas específicas de compra de insumos, traslados de los mismos, producción, ventas, almacenamiento, distribución final, entre otras.

1.5.1. Plan maestro de producción

Según Anaya (2007), un plan maestro de producción establece los detalles para la planificación de una producción, considera el tiempo y programación de materia prima, coordinación de turnos productivos, personal administrativo y operativo para las tareas críticas, tipos de productos, volúmenes, tiempos de entrega; prácticamente encierra toda la logística del

proceso productivo. Desde los insumos hasta la entrega del producto final, involucrando actividades directas e indirectas.

El plan maestro tiene como objetivo:

- Cumplimiento de fechas pactadas
- Utilizar eficientemente la capacidad instalada
- Reducción de costos de insumos

1.5.2. Transporte

La función del transporte es el método de movilizar un bien o servicio de un punto a otro. El transporte está compuesto de varios elementos:

- Infraestructura: es el medio físico donde se realiza el movimiento, se habla de carreteras locales, estatales, líneas férreas, cables eléctricos, ductos hídricos, gaseosos, rutas aéreas, entre otros.
- Vehículo: es el instrumento utilizado para realizar dicho transporte, se puede clasificar en terrestre, marítimo, aéreo y en esta era de crecimiento tecnológico; puede contemplarse el informático.
- El operador: es la persona encargada de realizar el transporte.
- Normativa: leyes y normas viales a las que está sujeto el transporte, estas regulan la operación y la alinean a los estándares y políticas locales, las cuales pueden cambiar geográficamente.

1.5.2.1. Transporte pesado

- Camiones de volteo: son vehículos diseñados para transportar carga con capacidad, generalmente de 12 metros cúbicos, construido sobre un chasis resistente, que en su parte posterior tiene una palangana, cerrada en todas sus caras excepto la superior, este posee un sistema hidráulico que permite el levantamiento de la palangana pivotando en el extremo trasero, ayudando de esta manera a descargar segura y rápidamente el contenido de la misma a través de una compuerta trasera; la construcción de la palangana no permite hermeticidad.

Este tipo de transporte está diseñado para movilizar materiales secos. Debido al mal uso o abuso de las unidades, las juntas de compuerta/palangana presentan deformidades, en caso de transportar materiales con dimensiones pequeñas, existen riesgos de derrames y contaminación de la infraestructura vial donde transite, un ejemplo claro es el transporte de arena en camiones con palanganas dañadas.

Este tipo de vehículo es el más común en el transporte de materiales para la construcción, que por sus altas densidades es muy difícil su manejo manual.

Por ser uno de los vehículos de transporte pesado más comunes, su precio de mercado, así como el mantenimiento y repuestos, son inferiores respecto a otros más especializados y que requieren más cuidados.

- Pipas o tanques cilíndricos: este tipo de transporte se utiliza cuando el producto a transportar es un líquido con alta o baja viscosidad, existen diversos tanques designados para aplicaciones en específico, las de fondo plano son utilizadas para el transporte de líquidos con bajas viscosidades,

estas pueden ser descargadas con ayuda de una bomba de succión, o simplemente por gravedad, su boca se encuentra generalmente, en la parte baja del cilindro horizontal.

Los designados para movilizar líquidos viscosos o sólidos finos; están construidas generalmente con tolvas en su inferior, con compuertas de descarga en los puntos más bajos de dichas tolvas, la construcción de este tipo de tanque ayuda al fluído del material, que por los ángulos el material no queda estancado dentro del tanque, mejorando el vaciado del material.

Por el tipo de construcción y los cuidados que requiere este tipo de transporte, es más costoso de mantener. Dependiendo del tipo de material que transporten en su interior, así deberán de ser los cuidados, recubrimiento de metal, reparaciones por picaduras, entre otros.

En Guatemala existe una restricción de transporte pesado en horarios críticos dentro del perímetro capitalino, el artículo 9 del Reglamento de Tránsito, Acuerdo Gubernativo número 273-98, indica que dicho tránsito no puede circular en el horario de 5:30 a 9:00 horas y de 16:30 a 20:30 horas, aplicable a todos los vehículos con peso superior a 3,5 toneladas, con esto la Municipalidad de Guatemala, se garantiza reducir el parque vehicular, evitando congestionamientos en horarios pico de ingreso y egreso de labores y asistencia a centros educativos.

1.6. Materia prima

Se define como materia prima de un proceso, aquel material necesario para la fabricación de un producto terminado, el cual está sujeto a una serie de procesos de transformación, con la finalidad de obtener alguna característica específica.

Una materia prima puede ser un producto terminado de otro proceso manufacturero o de servicio, no necesariamente ser un producto virgen.

1.6.1. Evaluación geológica de los yacimientos

La evaluación geológica consta de un conjunto de etapas que aseguran el adecuado conocimiento de los yacimientos, así como su explotación adecuada.

Las etapas de la prospección e investigación geológica son las siguientes:

- Elección de las zonas objeto de inspección mediante un estudio bibliográfico o un reconocimiento.
- Búsqueda de posibles yacimientos mediante un estudio de formaciones o macizos rocosos.
- Estudio preliminar de uno o varios yacimientos posibles.
- Estudio detallado de los yacimientos considerados como más probables.
- Estudio de la explotación.

El desarrollo de la prospección, siguiendo las pautas anteriores, tiene como objetivo minimizar los riesgos cuando se toma la decisión de iniciar la explotación, y por otro, a reducir el elevado e innecesario costo que supondría abordar de entrada una prospección muy detallada, (Watson 2006 pp. 6).

1.6.2. Estudio de formaciones o yacimientos

Según Watson (2006), se inicia con el análisis fotogeológico de la zona, con el fin de delimitar las áreas que presentan mejores características como masas rocosas o zonas ocupadas por materiales aprovechables.

Posteriormente se hacen las comprobaciones de campo, donde se hacen las tomas de muestras, se recogen datos litológicos y estructurales que permitan la creación de planos a escala 1: 25 000.

También se recorrerán las canteras existentes, reflejadas en los planos litológicos.

1.6.3. Estudio preliminar de áreas interesantes

Según Watson, R. (2006), técnicamente se estudian e investigan con más detalle, empleando técnicas geofísicas, realizando sondeos, tomando muestras y efectuando ensayos de laboratorio, aquellas zonas más interesantes localizadas en la fase anterior, con el fin de clasificarlas en forma definitiva en áreas interesantes, dudosas o sin interés.

Debe tomarse en cuenta, además, del estudio técnico, la disponibilidad del área para su utilización, quienes son los dueños de los terrenos que abarquen

el yacimiento, si existiesen restricciones legales, conflictos socio ambientales, licencias de explotación, entre otros.

1.6.4. Estudio detallado

Comprende los estudios necesarios con vistas a establecer una explotación. En esta etapa se delimitan de forma precisa, Watson, R. (2006):

- Los volúmenes de recursos geológicos y reservas.
- El tipo y potencia tanto de las masas aprovechables como de los recubrimientos.
- Las características geomorfológicas del yacimiento y aquellas propiedades de las rocas o materiales que influyen en la definición de la explotación y la maquinaria más recomendada en cada caso, así como las etapas que seguirán durante la explotación.
- Las calidades de los materiales que serán extraídos para estudiar los posibles tratamientos aplicables, con el fin de ajustarse a las normas que impone el mercado.
- Las características geotécnicas de los taludes a excavar y de los estériles.
- Los trabajos de investigación permiten la confección de los siguientes planos:
 - Topográficos de ubicación de sondeos

- De curvas isocapas de espesores de recubrimiento
- De curvas de nivel del techo de los materiales aprovechables
- De curvas de isocapas de espesores de materiales útiles
- De curvas del nivel límite de explotación
- De capas freáticas

Los datos geológicos y medioambientales son la base de la realización de estudios previos e inventarios de áridos. Estos inventarios consisten básicamente, en definir las explotaciones potenciales de áridos en las proximidades de las zonas de demanda, grandes ciudades, grandes estructuras lineales (ferrocarriles, carreteras, etc.).

Se tendrán en cuenta los espacios protegidos por razones ecológicas, vías de comunicación, suelo urbanizable, agrícola, impacto visual, etc. Todo ello debe hacerse tomando en consideración la demanda de áridos previsible en cantidad y calidad, así como las características geológicas, geotécnicas y tecnológicas de los áridos de las zonas seleccionadas. Un buen inventario contemplará la posición del nivel freático respecto de la futura explotación, así como los planes de restauración de las explotaciones para su integración después del abandono (Herrera 2007 pp. 2).

1.6.5. La cantera

Es una explotación superficial con un solo banco o con pocos en una pequeña área, sin necesidad de tener que descubrir el material explotable por aflorar y por tanto, con muy bajo o nulo ratio de estéril/mineral (Watson 2006).

El ritmo de producción es, en general, pequeño y marcado por las necesidades de unos mercados muy próximos. Normalmente las características físicas y granulométricas, más que las químicas del producto vendible marcan el precio de venta, que es muy bajo, salvo en el caso de las rocas ornamentales. Se subdividen en canteras de rocas para la construcción y canteras de rocas ornamentales.

Es probablemente, el método minero más abundante, pero al mismo tiempo con unas producciones unitarias más pequeñas, sin unos grandes problemas de vertederos, pero muy importantes de restauración. Como cuánto mayor es la cantera, más sencillo es resolver los problemas de restauración ambiental y una mayor saturación de los equipos mineros de proceso, y esta es la razón por la que existe una lógica corriente mundial hacia la disminución del número de explotaciones con un mayor tamaño de las mismas.

1.6.5.1. Explotación de canteras

La explotación de canteras comprende una parte importante de la minería que se realiza a cielo abierto en el mundo, con el objetivo de aportar los materiales reconstrucción que se extraen. Estas canteras abarcan la extracción de áridos de construcción y rocas ornamentales.

Este tipo de minería se caracteriza por la creación de un fuerte impacto al medio, ya que en la mayoría de las pequeñas empresas no prestan la debida

atención. De aquí la necesidad de conocer los diferentes aspectos necesarios para la correcta explotación de una cantera.

1.7. Agregados

El agregado es el material granular, generalmente inerte, resultante de la desintegración natural, desgaste o trituración de rocas, de escorias siderúrgicas convenientemente preparadas para tal fin o de otros materiales suficientemente duros, que permiten obtener partículas de forma y tamaños estables, destinadas a ser empleadas en hormigones.

Los agregados fino y grueso ocupan alrededor del 60 al 75 por ciento del volumen del concreto (70 a 85 por ciento de la masa) e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, en las proporciones de la mezcla y en la economía del mismo, pudiendo así garantizar la calidad de un concreto durable. No hay agregados perfectos.

1.7.1. Propiedades de los agregados

Forma de la partícula y textura de la superficie:

La forma determina cómo se va a agrupar, qué densidad tendrá y cómo se moverá dentro de la mezcla, las 2 consideraciones en la forma del material son:

- Angularidad
- Planas y alargadas

Partículas angulares: se obtienen al triturar piedra, al pasar el tiempo las esquinas se rompen formando partículas subangulares, al transportarse y rodar entre si las esquinas se pueden volver redondas.

- Los angulares producen masas con mayor estabilidad.
- Los redondos son más fáciles de colocar
- Planas y alargadas conocidas eventualmente con el término *Flakiness* describe la relación entre la menor y la mayor dimensión del agregado.

En cuanto a la textura: los agregados rugosos son más difíciles de compactar, se adhieren mejor entre sí y presentan mejor rozamiento entre partículas, por lo tanto son preferidos para el hormigón asfáltico, porque aumentan la estabilidad del hormigón.

Los agregados redondos se prefieren, porque mejoran la manejabilidad y movilidad de la mezcla.

Integridad y durabilidad: es la propiedad de los agregados de resistir la desintegración debida a agentes climáticos, el congelamiento y los ciclos de hielo/deshielo son los ataques climáticos más peligrosos para los agregados.

Tenacidad, dureza y resistencia a la abrasión: es la propiedad de los agregados de resistir los efectos dañinos de las cargas, los agregados deben resistir: trituración, degradación, desintegración; cuando están almacenados, mezclados, colocados, compactados, expuestos a cargas. La resistencia a la abrasión se evalúa mediante la conocida prueba de Los Angeles, según las Normas ASTM C131, C535 y AASHTO T96.

Absorción es la propiedad de absorber agua en los vacíos superficiales. El agua que los agregados absorben no está disponible para reaccionar con el cemento o mejorar la manejabilidad.

Según Candisano (2009), los cuatro estados de humedad de un agregado son:

- Seco (al horno): no contiene nada de humedad.
- Seco al aire: puede tener humedad, pero sin llegar a saturarse.
- Saturado con superficie seca: los vacíos están llenos de humedad, pero la superficie está seca.
- Húmedo: vacíos llenos y la superficie también húmeda.

Basado en lo anterior, la absorción se define también como: la cantidad de agua necesaria para llenar los vacíos superficiales o lo que es lo mismo: la cantidad de humedad en la condición seca saturada.

La gravedad específica es el cociente entre su peso específico y el peso específico del agua.

Granulometría y tamaño máximo:

- La granulometría describe la distribución de tamaños de las partículas de agregados.

- Agregados grandes se prefieren porque tienen menos superficie y, por lo tanto requieren menos aglomerante, sin embargo, agregados grandes son más difíciles de colocar en obra.
- Por lo tanto, consideraciones constructivas limitan el tamaño máximo de agregados (capacidad del equipo, dimensiones de la formaleta, distancia entre aceros de refuerzo).
- Tamaño máximo del agregado: el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100 por ciento de los agregados.
- Tamaño máximo nominal del agregado: el tamiz más grande que retiene algún agregado (usualmente no mayor que el 10 por ciento).

La granulometría se establece haciendo pasar los agregados por una serie de tamices.

Los tamices cuyas aberturas son mayores de 6,35 milímetros se designan por el tamaño de la abertura.

Los tamices cuyas aberturas son menores de 6,35 milímetros se designan por el número de aberturas por pulgada lineal.

Los resultados de una granulometría se describen usando el porcentaje acumulado de agregados que, ya sea pasan o quedan retenidos en un determinado tamaño de tamiz.

Los resultados, generalmente se dibujan en una gráfica semi-logarítmica.

Especificaciones de granulometría ASTM C33 para agregados finos de hormigón de cemento Portland.

Módulo de finura: es una medida de la granulometría del agregado fino.

1.7.2. Clasificación de los agregados

- Por su densidad pueden clasificarse de la siguiente forma:
 - Normales: son los agregados de uso más generalizado y en el 90 por ciento de las construcciones se los utiliza. El peso unitario está comprendido entre 1 000 a 1 800 kilogramos por metro cúbico.
 - Livianos: su peso unitario está por debajo de los 1 000 kg/m³ (700 a 800 kg/m³) y con su uso se obtienen hormigones livianos.
 - Pesados: tienen un peso unitario superior a los 2 000 kilogramos por metro cúbico y provienen de rocas que contienen elementos pesados, por ejemplo: hierro, bario, plomo. Se los emplea para la elaboración de hormigones pesados para pantallas contra radiaciones.

- Por su composición mineralógica se clasifican en:
 - Según el tipo de roca pueden ser:
 - Ígneas
 - Metamórficas
 - Sedimentarias

- Según el procedimiento de producción:
 - Naturales
 - Artificiales
 - Minerales tratados térmicamente
 - Trituración
 - Reciclado

- Por su tamaño pueden ser:
 - Agregado grueso: es el agregado, que de acuerdo con su tamaño nominal, queda retenido en el tamiz IRAM 4,75 mm (N° 4).

 - Agregado fino: es el agregado que pasa por lo menos el 95 por ciento el tamiz IRAM 4,75 milímetros (N° 4), y queda retenido en el tamiz IRAM 75 micrómetros (N° 200).

1.7.3. Usos de los agregados

- Como material subyacente para fundiciones y pavimentos (base y subbase).
 - Añade estabilidad a la estructura
 - Proveen una capa de drenaje
 - Protegen la estructura de las heladas

- Como ingrediente del hormigón a partir de cemento Portland
 - Ocupan 60-75 % del volumen y 79-85 % del peso

- Actúan como relleno para reducir el cemento necesario en la mezcla
- Agregan estabilidad de volumen
- Ingrediente de hormigón asfáltico
 - Constituyen >80 % del volumen y 92-96 % de la masa
 - El rozamiento entre las partículas de agregados provee la resistencia y la estabilidad del pavimento.

1.7.4. Requisitos de calidad

Carrasco (2007), define que los requisitos de calidad establecidos para los agregados se pueden clasificar en dos grupos:

- Grupo A: las partículas deben ser duras, resistentes y durables.
- Grupo B: las partículas deben estar limpias, libres de impurezas, de tamaño y forma adecuadas.

Si el material en estudio no reúne algunas de las características del grupo A, no podrá ser empleado como agregado para hormigón, por ser estas características determinantes, no es posible modificarlas.

Si en cambio, no se cumplen las condiciones del grupo B, las mismas se pueden corregir, por lavado o cribado.

Grupo A: resistencia la cual puede evaluarse en dos formas:

- Ensayos sobre probetas cúbicas o cilíndricas

- Ensayos de resistencia estructural

Partículas blandas: son partículas que poseen fisuras o se encuentran alterados sus minerales.

Dureza – desgaste: esta propiedad cobra importancia en obras como conductos, canales, vertederos, playas industriales, pavimentos, entre otros.

Durabilidad: es la capacidad de resistir las acciones del medio ambiente.

- Congelamiento y deshielo
- Alteración de basaltos
- Presencia de sílice reactiva

Grupo B: el polvo se adhiere a la superficie de las partículas de agregado:

- Es frecuente en arenas de lechos de ríos o playas.
- Puede aparecer entre los agregados en el proceso de trituración.
- Puede aparecer por transporte mediante palas de arrastre con la incorporación de partículas del suelo.

La contaminación presente en los agregados provoca:

- Disminución de la resistencia de la interfaz, por lo cual la resistencia mecánica del hormigón disminuye, y en especial, la resistencia a tracción.

- El polvo, por el proceso de exudación, llega a la superficie del hormigón formando una película de polvo, cemento y agua fácilmente desgastable.
- Puede provocar aumento del contenido cemento, el contenido de agua de mezclado, o ambos, manteniendo constante la relación a/c.

1.7.5. Sustancias nocivas en los agregados

Es cualquier material en los agregados que afecta la calidad del concreto hecho con ellos:

- Impurezas orgánicas
- Partículas menores que 0,075 mm
- Carbón, lignita u otros materiales livianos
- Grumos de arcilla y partículas friables
- Partículas suaves
- Para el hormigón asfáltico
- Grumos de arcilla
- Sales minerales
- Partículas suaves o friables

Los terrones de arcilla pueden disgregarse durante el mezclado con agua, transformándose en polvo de alta superficie específica, pueden también, no disgregarse al mezclarse con el agua y quedan como tales. En condiciones húmedas dentro de la masa de hormigón al cabo de unos días pierden su poder cementante convirtiéndose en partículas blandas.

La materia orgánica provoca una demora en el fraguado y un retardo en la adquisición de resistencia, desconociendo si el hormigón alcanzará la resistencia prevista en los cálculos para poder seguir avanzando en las etapas constructivas programadas.

Como sales minerales están los sulfatos, los cuales reaccionan con el aluminato tricálcico del cemento provocando expansiones, los cloruros atacan las armaduras y elementos metálicos embebidos en el hormigón.

Los carbonatos o los bicarbonatos aumentan el pH del hormigón lo que puede ocasionar un retardo del proceso de hidratación o provocar manchas denominadas eflorescencia.

Se pueden identificar otras impurezas como: partículas livianas, carbonosas y arcillosas capaces de generar fallas en áreas donde exista concentración de tensiones o simplemente problemas estéticos.

1.8. Trituración

Trituración es el proceso que busca la transformación del tamaño del agregado, partiendo de una masa de mayor tamaño a una de menor tamaño.

1.8.1. Mecanismos de fractura

Se conoce como mecanismo de fractura a la forma en que la roca, como materia prima se convierte en rocas de menor tamaño.

- Abrasión: en este mecanismo la roca de mayor tamaño se reduce por desgaste superficial, reduciendo así el tamaño, pues lo que se logra es

poco a poco llegar al núcleo de la misma, este desgaste tiene como resultado un gran porcentaje de arena obtenida.

- **Compresión:** la compresión consiste en la aplicación de una fuerza extrema a la roca, la cual la comprime fracturándola en pocas partes, generalmente de tamaños similares.
- **Impacto:** en este tipo de fractura la roca es lanzada a una alta velocidad y fuerza contra alguna pared o bien entre rocas, lo que provoca un estallido y la fragmentación de la roca inicial en muchos pedazos, de diferentes dimensiones.

Existe una relación de tamaño cantidad de partículas obtenidas detallada como se muestra en la tabla I.

Tabla I. **Relación de partículas trituradas**

| METODO | CANTIDAD DE PARTÍCULAS | TAMAÑO DE PARTÍCULAS |
|------------|------------------------|----------------------|
| Abrasión | Pocas | Grande |
| Compresión | Medio | Medio |
| Impacto | Muchas | Pequeñas |

Fuente: elaboración propia.

Las trituradoras combinan estos mecanismos, sin embargo, uno es siempre el más importante.

1.8.2. Tipos de trituradoras

Vásquez, (2004) divide las plantas de trituración en circuitos, los cuales llama circuitos primarios y secundarios.

Tabla II. Trituradoras según su función

| FUNCIÓN | DISEÑO |
|--|--|
| Reducción de Gruesos (200 - 1 500 mm) | Trituradoras giratorias Trituradoras de mandíbulas Trituradoras de impacto |
| Reducción de medios (20 – 200 mm) | Trituradoras giratorias secundarias Trituradoras cónicas Trituradoras de impacto secundarias |
| Reducción de finos (0 – 20 mm) | Trituradoras cónicas Molinos de martillos Impactoras de eje vertical (VSI) |

Fuente: elaboración propia.

1.8.3. Circuitos primarios de trituración

Para efectuar la primera etapa de reducción de tamaño, principalmente se cuenta con dos tipos:

- Las trituradoras de mandíbulas: baja capacidad, bajo mantenimiento e inversión, potencias relativamente bajas, buen desempeño en materiales arcillosos.

- Las trituradoras giratorias: alta capacidad productiva, mantenimiento más caro, mayores potencias.

Sin embargo, en ciertas aplicaciones cuyos materiales tienen poca abrasión, por ejemplo, caliza, se pueden utilizar impactoras.

1.8.4. Circuitos secundarios de trituración

Para efectuar las restantes etapas de reducción de tamaño se cuenta, principalmente con tres tipos de equipos:

- Trituradoras de cono: alta capacidad productiva, altas potencias, buena relación de reducción, problemas con materiales arcillosos.
- Trituradoras de impacto: baja capacidad productiva, costos elevados de mantenimiento, razón de reducción baja, excelente cubicidad del producto, manejo excelente de materiales húmedos y arcillosos.

Las trituradoras de cono son los equipos más populares, se utilizan como secundarios y terciarios, existen desde los más sencillos manejados mecánicamente hasta unos con controles automatizados súper modernos. Su producto, en general tiene buena forma.

Las trituradoras de impacto existen de eje vertical y horizontal, hay 2 tipos de impacto: roca-roca o roca-metal, se utilizan como cuaternarios o para dar forma final al producto, por su producto obtenido con altas calidades y cubicidad, es muy utilizado para obtener productos utilizables en asfalto y concreto.

1.9. Clasificación

Los sistemas de cribado son procesos mecánicos que permiten separar las partículas con base al tamaño.

Se deben considerar los siguientes factores:

- Sobre el material:
 - Densidad: materiales más densos tienden a segregarse con mayor facilidad, lo que contribuye al proceso de clasificación).
 - Distribución granulométrica: cuando la granulometría del material alimentado se aproxima al tamaño de selección final, el proceso de cribado es más eficiente.
 - Forma de la partícula: materiales lajedos tienden a fluir con dificultad y obstruyen la superficie de la zaranda, el canto rodado, tiende a cribarse con mayor facilidad.
 - Humedad del material: en materiales finos, la humedad genera pastas difíciles de manejar.
- Sobre el equipo:
 - Área de cribado: es el área libre que tienen las partículas para circular a través de la zaranda o criba.
 - Tipo de superficie de cribado.

- Vibración: amplitud y frecuencia. Sus principales efectos son la segregación y el transporte a lo largo de la criba.
- Ángulo de inclinación: a mayor ángulo, más rápido fluirá el material, ángulos pequeños se utilizan cuando se pretende mantener lo más tiempo posible el material en el área de cribado.
- Espesor de la cama de material.

La eficiencia de las cribas tiene una relación inversamente proporcional a la tasa de alimentación. A más alimentación, se reduce su eficiencia, a menor alimentación, aumenta su eficiencia.

La superficie de cribado debe tener una combinación de resistencia y flexibilidad. Debe ser fuerte para soportar el peso del material, resistente al desgaste y flexible para soportar la vibración.

Experimentalmente se ha demostrado que el largo de la criba debe ser al menos el doble del ancho.

1.10. Sistemas de lavado

El lavado de materiales se puede dividir en dos grandes grupos:

- Lavado de gruesos
- Lavado de arenas

Los factores críticos en el proceso de lavado son:

- El consumo y disponibilidad de agua
- El manejo de los desechos
- Las pérdidas de materiales aprovechables

Para poder seleccionar un sistema de lavado adecuado se debe considerar:

- El grado de contaminación de la materia prima.
- Cantidad de limos y arcillas.
- Consistencia física de las impurezas, pelotas de arcilla duras, finos indeseables mezclados con materiales de buena calidad.
- Fuentes de agua disponibles.
- Disposición de las aguas residuales del proceso.
- Restricciones financieras.
- Legislación ambiental del país.

El agua de lavado debe tener una concentración de sólidos menor al 10 por ciento en peso (menos de $0,1 \text{ Kg/m}^3$).

1.10.1. Lavado de gruesos

El contenido de arena debe, por lo general, fijar los requerimientos de agua en la fase de lavado de gruesos, con base en la etapa posterior de lavado.

Para esto se pueden utilizar los siguientes equipos:

- Cilindros lavadores: estos manejan un tamaño máximo de 400 mm, se utilizan para el lavado de materiales con altos contenidos de arcilla.
- Lavadores de paletas: manejan entre 6 y 80 mm, se utilizan para deshacer pelotas de arcilla mediante un lavado enérgico.
- Lavadores de tornillo: manejan entre 0 y 25 mm, se utilizan, principalmente en el producto terminado, cuando hay arcilla adherida al material.
- Cribas con riego: varía su utilización dependiendo de la suciedad del material, su lavado es suave.

1.10.2. Lavado de arenas

El contenido de limos y arcillas debe fijar siempre la aportación de agua en la fase de lavado de arenas. Se utilizan los siguientes equipos:

- Lavadores de tornillo y norias: utilizados en materiales no mayores a 10mm, tienen un consumo de 2 m³ de agua por cada tonelada producida.
- Hidrociclones: estos trabajan con base en una especie de torbellino en su interior, consumen entre 1,50 - 3,50 m³ de agua por cada tonelada producida, son los equipos más modernos para dicha aplicación.

1.10.3. Lodos

Bosch (1976) definió el término lodos como: cuerpos contaminantes eliminados de la fase líquida, a lo largo del tratamiento de depuración de aguas, cualquiera que sea su naturaleza, más o menos concentrados en suspensiones acuosas.

1.10.3.1. Tratamiento de aguas residuales de lavado

Cuando se lleva a cabo el lavado de agregados, ya sean gruesos o finos, siempre se obtienen aguas residuales, las cuales deben ser tratadas para reducir el impacto ambiental que estas generan.

El hecho de tratar las aguas residuales siempre implicará un costo adicional al proceso, sin embargo, siendo una empresa conciente legal y ambientalmente, es un deber el realizar este tratamiento, la manera más sencilla de llevar a cabo el manejo de lodos es su secado o deshidratación, de esta manera la logística de transporte será más sencilla y económica, pues es más fácil transportar sólidos que líquidos, además que, el peso se verá reducido sustancialmente.

Bosch (1976) “El componente principal de los lodos, es el agua, Un lodo tipo, puede contener el 95 por ciento de agua. Por tanto la eliminación de ella es el objetivo primordial, para reducir su peso y volumen que facilitara su manejo y evacuación”.

Los métodos para el secado de lodos se pueden resumir en contacto, convección o radiación.

- El método de contacto consiste en el contacto o tránsito de los lodos a través de paredes calientes.
- El método de convección se consigue mediante el tratamiento de los lodos con aire caliente.
- El método de radiación suministra calor al lodo, por ejemplo, radiación solar o calentamiento mediante rayos infrarrojos.
- Otro método utilizado para reducir la humedad de los lodos, es la deshidratación ejerciendo presión (método de filtros prensa).

Para elegir el mejor método se deben evaluar las siguientes condiciones:

- Adherencia segura
- Compatibilidad medioambiental
- Flexibilidad del método de secado/deshidratado con los volúmenes de lodo y su variabilidad.

Se enfocará, específicamente, en dos métodos, secado solar y prensado de lodos.

1.10.3.2. Secado solar

Basado en el método de radiación, consiste en recolectar y depositar los lodos en tanques o pozas preparadas para el efecto, en donde permanecerán en contacto con el medio ambiente, expuestos al calor y la luz solar, la cual se

encargará de evaporar el agua presente en los lodos, quedando depositados los sedimentos al fondo de dicha poza, para su posterior recolección, extracción y transporte.

1.10.3.3. Prensado de lodos

La filtración es uno de los métodos más modernos y más utilizados para el tratamiento de aguas residuales, consiste en la utilización de filtros prensa, los cuales desplazan la humedad de los lodos a causa de las altas presiones ejercidas sobre los mismos, aun siendo el procedimiento más utilizado, es el más costoso.

Un filtro prensa se compone de una serie de placas verticales, confrontadas, a las cuales se les aplica una extrema presión, perpendicularmente. Cada par de placas forma una recámara en la cual se almacenará una cantidad de lodo.

El ciclo de filtración de lodos está compuesto de 4 pasos:

- a) Cierre de placas: estando vacío el filtro, el sistema mecánico se encarga de cerrar las placas, aplicando una presión establecida.
- b) Rellenado: consiste en la inyección de los lodos a la serie de cámaras conformadas por las placas, este proceso no lleva mucho tiempo, el tiempo de llenado dependerá de la capacidad o flujo de la bomba de alimentación.
- c) Filtración: una vez rellenas las cámaras, se inicia un proceso de incremento en la presión aplicada a las placas, para de esta manera

expulsar el agua presente en los lodos, dejando solamente una pasta sólida, entre las cámaras de las placas.

- d) Apertura del filtro: el mecanismo retirará la presión y comenzará la traslación de placas, que consiste en movilizar una por una, obteniendo de esta manera, el desprendimiento de lo que se conoce por galleta (debido a su forma y consistencia), las cuales caen por su propio peso.

El tiempo de prensado no debe exceder las 4 horas. La filtración depende de:

- Espesamiento de la pasta
- Concentración del lodo
- Resistencia específica
- Coeficiente de compresibilidad

“Teóricamente, la resistencia específica de un lodo es independiente de la mayor parte de las condiciones de secado; es una característica propia de la materia, independientemente de su concentración”. (Bosch 1976).

1.10.3.4. Características de los lodos

Consistencia es una característica física que relaciona las fuerzas de cohesión-adhesión, se define como la resistencia de un material a ser moldeado o amasado, estas fuerzas permiten que las partículas se mantengan unidas. Estas fuerzas dependen del contenido de humedad.

Se puede clasificar un lodo como seco, húmedo, mojado y saturado.

Los límites de Atterberg, o límites de consistencia, se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo del contenido de agua:

- Líquido: propiedades y apariencia de una suspensión.
- Semilíquido: con las propiedades de un fluido viscoso.
- Plástico: el suelo se comporta plásticamente.
- Semisólido: en este el material tiene la apariencia de un sólido, pero aún disminuye de volumen al estar sujeto a secado.

La arcilla, por ejemplo, al agregarle agua, pasa gradualmente de estar en estado sólido al estado plástico y finalmente al estado líquido.

Las fuerzas de cohesión determinan la atracción entre partículas de la misma naturaleza.

La adhesión determina la tensión superficial que presenta el material (lodo) y las moléculas de agua.

En el límite líquido, el contenido de humedad en la película de agua es bastante alto por tanto, la cohesión decrece.

El límite plástico representa el contenido máximo de humedad que puede contener un suelo o lodo para pasar de una consistencia suelta a una consistencia plástica, en este por debajo de este máximo de humedad, se

puede decir que el material es estable, se encuentra en su estado sólido-semisólido.

Las arcillas provenientes de caliza poseen un peso específico de 1 280 Kg/m³.

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Enfoque y tipo de investigación

La investigación se basa en un análisis cuantitativo, debido a que recolecta y analiza datos que responden las preguntas de investigación, además verifica y valida la hipótesis planteada. En donde la hipótesis desarrollada es de un enfoque causal, ya que existe una relación entre dos o más variables.

Según Van Dalen y Meyer (1971), el fin de una investigación experimental es, manipular variables determinadas, conocidas como variables independientes, las cuales estarán sujetas a experimentos en ambientes rigurosamente controlados, las cuales ocasionarán efectos sobre una variable dependiente, variándola y describiendo situaciones provocadas por esos cambios.

Cuando se clasifican las investigaciones tomando como criterio el papel que ejerce el investigador sobre los factores o características que son objeto de estudio, la investigación puede ser clasificada como experimental o no-experimental. Cuando es experimental, el investigador no solo identifica las características que se estudian sino que las controla, las altera o manipula con el fin de observar los resultados al tiempo que procura evitar que otros factores intervengan en la observación. Cuando el investigador se limita a observar los acontecimientos sin intervenir en los mismos entonces se desarrolla una investigación no experimental (Grajales 2000).

La investigación experimental puede dividirse de acuerdo con las categorías de Campbell y Stanley (1966), en preexperimentos, experimentos puros y cuasi experimentos, en donde el tema a investigar se basa en un experimento puro, en donde según Sampieri, Collado y Lucio (1991), los experimentos puros manipulan variables independientes para ver sus efectos sobre variables dependientes en una situación de control.

El tipo de diseño experimental, será el de posprueba únicamente y grupo control, este diseño se basa en dos grupos, uno recibe el tratamiento experimental y el otro no, lo que indica que hay una presencia y ausencia de la variable independiente en donde los sujetos son asignados aleatoriamente. El tiempo de prensado, la presión de bombeo de lodos y la composición del lodo, tendrán un efecto sobre la humedad de los lodos prensados, buscando como finalidad obtener un adecuado porcentaje de humedad en la galleta de lodo de arcilla, mejorando la logística, al menor costo posible.

El experimento se validará internamente por medio del muestreo similar de ambos grupos sujetos a evaluación, se analizará el momento productivo en el cual tanto el circuito de trituración como en sistema de lavado de lodos contengan la misma concentración de material, para evitar de esta manera que una variación en dicha concentración, sea un factor que afecte la veracidad en la toma de muestras.

Externamente la validación del experimento no tendrá limitantes, puesto que la aplicación o modificación de parámetros para análisis de los grupos experimentales es factible y es sencilla la replicación a nivel industrial dentro del proceso.

2.2. Definición de población

La población serán las galletas de arcilla recuperadas a través de los filtros prensa en el área de planta Eral.

2.3. Identificación del marco muestral

No se tiene un marco muestral propiamente dicho, pues no existe un archivo o listado con el nombre de cada una los sujetos a evaluar (galletas).

2.4. Determinación del tamaño de muestra

La población a evaluar será infinita, en donde no se conoce la cantidad exacta de elementos que tiene la población (galletas de lodos de arcilla prensados), utilizando un nivel de confianza del 99 por ciento, se determina el margen de confiabilidad con un valor de 2,58, se asumirá un error del 1 por ciento para el cálculo de la muestra, por lo que, según los datos indicados a continuación, se calculará la muestra a evaluar (n).

Z: margen de confiabilidad (2,58)

p: probabilidad a favor (99%)

q: probabilidad en contra (1%)

e: error de estimación (5%)

$$n = \frac{Z^2 p * q}{e^2} = \frac{2,58^2 * 0,99 * 0,01}{0,05^2} = \frac{25,2943}{0,1975} = 26 \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Siguiendo el método aleatorio simple se tomaron 26 galletas como sujetos de estudio, en el que se determinará su porcentaje de humedad aún presente.

Las 26 galletas se seleccionarán aleatoriamente a lo largo del filtro prensa, se estima y se cree que este valor será representativo. La presión de inyección se aplica desde un extremo, por lo que tomando varias muestras a lo largo del mismo, se espera tener un dato confiable.

2.5. Análisis estadístico propuesto

Se utilizó el análisis estadístico inferencial, basado en el modelo de una investigación cuantitativa, en donde los datos obtenidos fueron recolectados a partir de una serie de pruebas realizadas en campo, obteniendo muestras aleatorias de lodos prensados, posteriormente llevados a laboratorio para determinar su porcentaje de humedad.

Se utilizó como control de calidad, la determinación del promedio de los resultados obtenidos, referente al porcentaje de humedad y el tiempo de operación de los filtros prensa.

Por medio de gráficos de control se muestra la tendencia en la relación de las variables dependientes: tiempo de operación y porcentaje de humedad, respecto de la variable independiente: presión de inyección.

Utilización de la desviación estándar para determinar los límites de control en el ensayo utilizando cal hidratada como aditivo, con el fin de determinar el comportamiento del muestreo.

2.6. Técnicas de recolección de datos

La recolección de los datos se hizo por medio de formatos previamente diseñados, llenados con información recolectada de las pruebas realizadas en laboratorio y las observaciones de los procedimientos en campo,

posteriormente fueron tabulados para la respectiva comparación. En los anexos 1 y 2 pueden observarse los formatos base que fueron utilizados para la anotación de datos durante dichas pruebas (el autor, 2013).

2.7. Validación

Según Sampieri et al (1991), la validez se alcanza mediante el control de varios grupos comparados y su equivalencia y congruencia, en donde se mantienen aspectos similares en la evaluación y manipulación de variables.

2.8. Fuentes de información

La información fue recolectada en distintos medios escritos y electrónicos, entrevistas verbales y escritas a personas expertas en el tema, además se realizó la consulta a bibliografías de metodología de investigación para determinar la metodología del trabajo.

2.9. Recursos necesarios

Se describen los equipos que se utilizarán para el registro de variables independientes y dependientes, en las distintas pruebas en el área de prensado de lodos en la trituración de agregados.

- Cronometro: se cronometran los tiempos de prensado y traslación de placas en el área de filtros prensa, esta información puede obtenerse de los tableros electrónicos de los filtros prensa, utilizando el formato toma de datos, en la columna de tiempo de prensado (ver anexo 1).

- Manómetro: utilizado para identificar la presión de bombeo de lodos hacia el conjunto de filtros prensa, este dato se registrará en el formato toma de datos, en la columna de presión de bombeo (ver anexo 1).
- Balanza: este instrumento es utilizado para realizar la medición del peso de la galleta de arcilla, luego de ser secada en el horno se realiza la misma prueba de pesado para ver la pérdida de peso que se asume como pérdida por humedad. La balanza, también se utiliza para realizar las mediciones de peso para la determinación de peso unitario compactado y suelto (PUC, PUS), Peso específico y absorción, se registran los datos en el formato muestreo de materiales (ver anexo 2).
- Horno: el horno se utiliza para secar (deshidratar) la galleta de arcilla y determinar la reducción de humedad para determinar su porcentaje en peso, se registran los datos en la columna de humedad de galleta, en el formato toma de datos (ver anexo 1).
- Tamices: utilizados para determinar la composición la granulométrica de las galletas de arcilla y el módulo de finura (MF), registrándose los datos en el formato muestreo de materiales (ver anexo 2).

3. RESULTADOS

Para la obtención de resultados, en cada una de las pruebas, se realizó la evaluación de 26 galletas obtenidas de diferentes filtraciones semanales. Al cabo de una semana, se modificó la presión de bombeo de lodos, buscando así, una posible disminución tanto en los tiempos de prensado como en la humedad final de los lodos prensados (galletas de arcilla).

3.1. Resultado 1

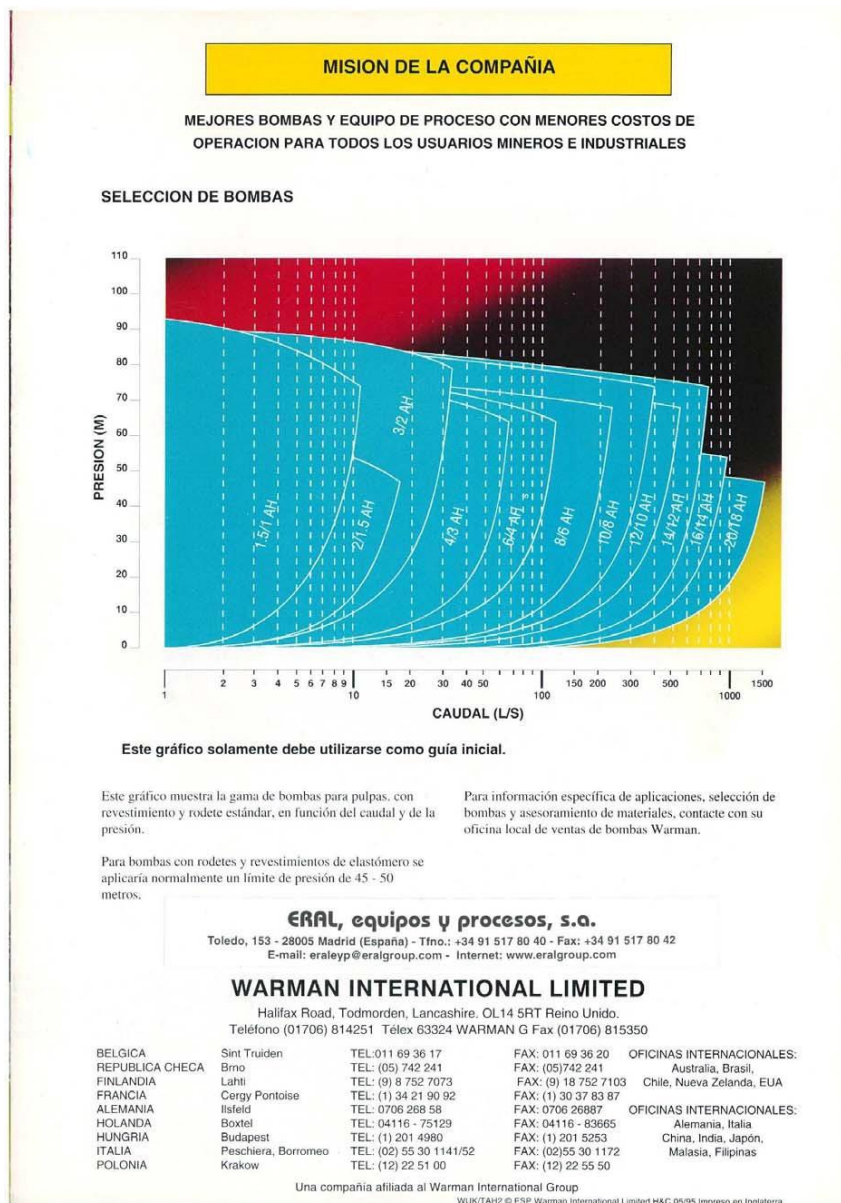
- Determinar la influencia de la variable presión de inyección, sobre las variables: tiempo de prensado y porcentaje de humedad de los lodos, en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza.

Previamente identificadas las variables del proceso de deshidratación de lodos y con base en un estudio realizado a los manuales operativos y de mantenimiento, e inspecciones mecánicas de los equipos involucrados, se estableció que el tiempo de operación de los filtros prensa está determinado por el desplazamiento de humedad de los lodos inyectados.

Teniendo presión de inyección de lodos, como variable independiente, se buscó la manera de poder variar los parámetros. Dentro de la hoja técnica de la marca de bombas WARMAN, para la selección de bombas, se identificó dentro de la gráfica de caudal vs presión, que el modelo WP 6/4 D-AH, tenía un rango amplio de presión de trabajo, desde 0 hasta un valor aproximado de 9,65 megapascales. Para un caudal de 58 litros por segundo (0,058 metros cúbicos

por segundo), la presión recomendada para el modelo específico es de 4,41 megapascales.

Figura 1. Gráfica de caudal vs presión



(Manual de servicio y mantenimiento AREA 40 – Tratamiento de lodos)

Fuente: Warman International Limited.

Por medio de un variador de frecuencia eléctrico instalado dentro de los paneles eléctricos del equipo, se pudo manipular la velocidad de motor de la bomba, obteniendo a través de este, variaciones en la velocidad de los motores, por ende, variaciones en la presión de inyección de lodos.

Se realizaron 9 pruebas con su respectiva variación de presión, desde 0,62 hasta llegar a 4 megapascales, definido como valor máximo respetando un 10 por ciento de margen de seguridad respecto a recomendaciones del fabricante. A partir de esto se obtuvieron valores de tiempo de operación y de humedad de los lodos.

Los datos registrados en las pruebas realizadas en campo, se pueden observar en la tabla III:

Tabla III. **Comparativo tiempo y humedad vs presión**

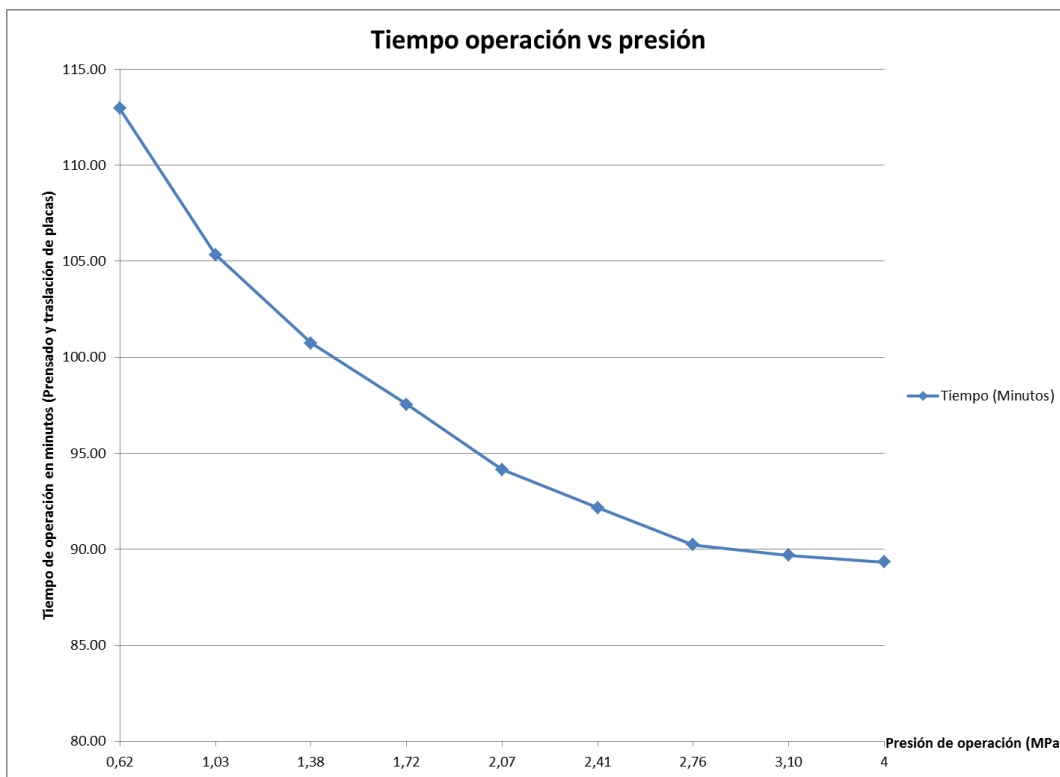
| Presión (MPa) | Tiempo (minutos) | Humedad (% en peso) |
|---------------|------------------|---------------------|
| 0,62 | 112,96 | 37,74 |
| 1,03 | 105,35 | 34,51 |
| 1,38 | 100,73 | 32,93 |
| 1,72 | 97,54 | 31,21 |
| 2,07 | 94,15 | 29,32 |
| 2,41 | 92,15 | 27,96 |
| 2,76 | 90,23 | 27,18 |
| 3,10 | 89,69 | 26,52 |
| 4 | 89,35 | 25,91 |

Fuente: elaboración propia.

Si se deseara consultar las tablas individuales de cada uno de los ensayos por presión, conteniendo número de muestra, el tiempo de operación del filtro y el porcentaje de humedad, podrán ubicarse dentro de la sección de apéndices.

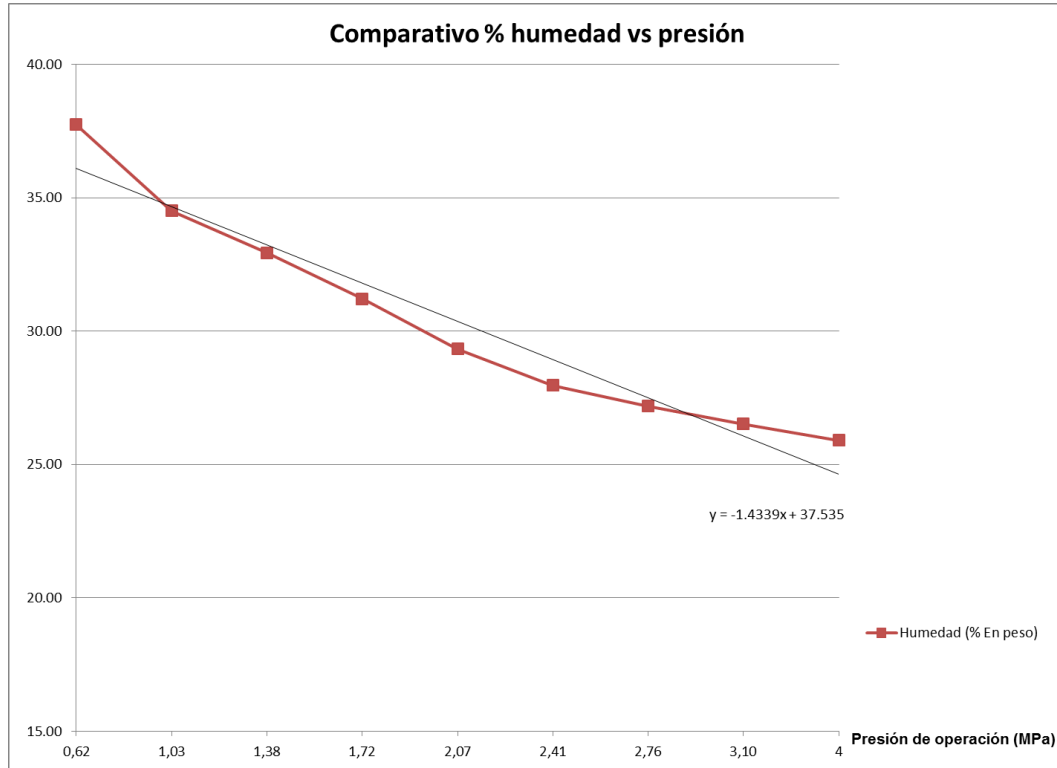
Tabulando los resultados del cuadro anterior, se generan 2 gráficas que relacionan: tiempo de prensado vs presión y porcentaje de humedad vs presión.

Figura 2. **Tiempo de operación vs presión**



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. **Porcentaje de humedad vs presión**



Fuente: elaboración propia.

3.2. Resultado 2

- Determinar la existencia de una variable química que reduzca el porcentaje de humedad de los lodos, en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza.

Habiendo identificado y analizado las 3 variables anteriores (Porcentaje de humedad de lodos prensados, tiempo de operación de filtros prensa y presión de inyección de lodos), se procede a realizar un análisis químico de la muestra,

para determinar la composición de los lodos, dado que se enumera como una variable independiente del estudio.

El resultado se muestra a continuación:

- 12,5 % dióxido de silicio (SiO_2)
- 1,17 % óxido férrico (Fe_2O_3)
- 43,59 % óxido de calcio (CaO)
- 0,59 % óxido de magnesio (MgO)
- 0,08 % óxido de potasio (K_2O)
- 0,10 % óxido de sodio (Na_2O)
- 0,09 % óxido de titanio III (TiO_2)
- 0,05 % óxido de cromo (Cr_2O_3)
- 0,05 % óxido de manganeso (MnO) y
- 37,29 % material perdido en el ensayo a 950°C LOI.

(Ver anexo 3: Análisis químico arcillas realizado por el centro tecnológico de Cementos Progreso S.A.).

Se empleó cal hidratada, como aditivo en el proceso de filtrado de lodos,

La dosificación ideal agregada es de 6 sacos de 20 kilogramos por cada silo de pulpa de arcilla, un silo completo abastece 5-6 circuitos de filtrado, de $8,08 \text{ m}^3$ de lodo cada uno.

Se trabajó el ensayo 0,62 MPa.

La tabla IV que se muestra a continuación, tabula los resultados obtenidos, de tiempo de operación y porcentaje de humedad.

Tabla IV. **Tiempo y humedad ensayo cal hidratada**

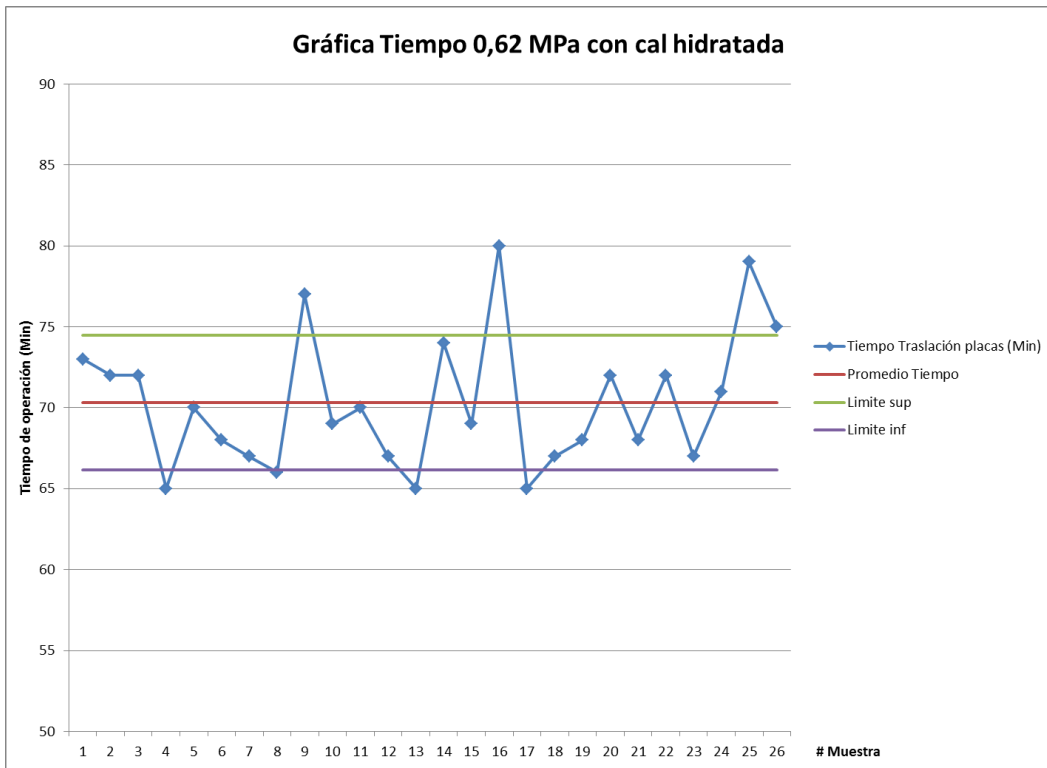
| No. muestra | Tiempo traslación placas (min) | % Humedad | No. muestra | Tiempo traslación placas (min) | % Humedad |
|-------------|--------------------------------|-----------|-------------|--------------------------------|-----------|
| 1 | 73 | 25,11 | 14 | 74 | 21,87 |
| 2 | 72 | 26,35 | 15 | 69 | 24,68 |
| 3 | 72 | 23,15 | 16 | 80 | 18,00 |
| 4 | 65 | 22,85 | 17 | 65 | 18,57 |
| 5 | 70 | 25,12 | 18 | 67 | 26,88 |
| 6 | 68 | 26,63 | 19 | 68 | 25,79 |
| 7 | 67 | 21,71 | 20 | 72 | 26,00 |
| 8 | 66 | 27,00 | 21 | 68 | 21,90 |
| 9 | 77 | 28,12 | 22 | 72 | 21,56 |
| 10 | 69 | 26,75 | 23 | 67 | 24,76 |
| 11 | 70 | 22,00 | 24 | 71 | 22,51 |
| 12 | 67 | 21,54 | 25 | 79 | 22,38 |
| 13 | 65 | 22,19 | 26 | 75 | 28,00 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados tabulados en el cuadro anterior son presentados en dos gráficas a continuación, relación porcentaje de humedad vs presión de inyección y tiempo de operación vs presión de inyección.

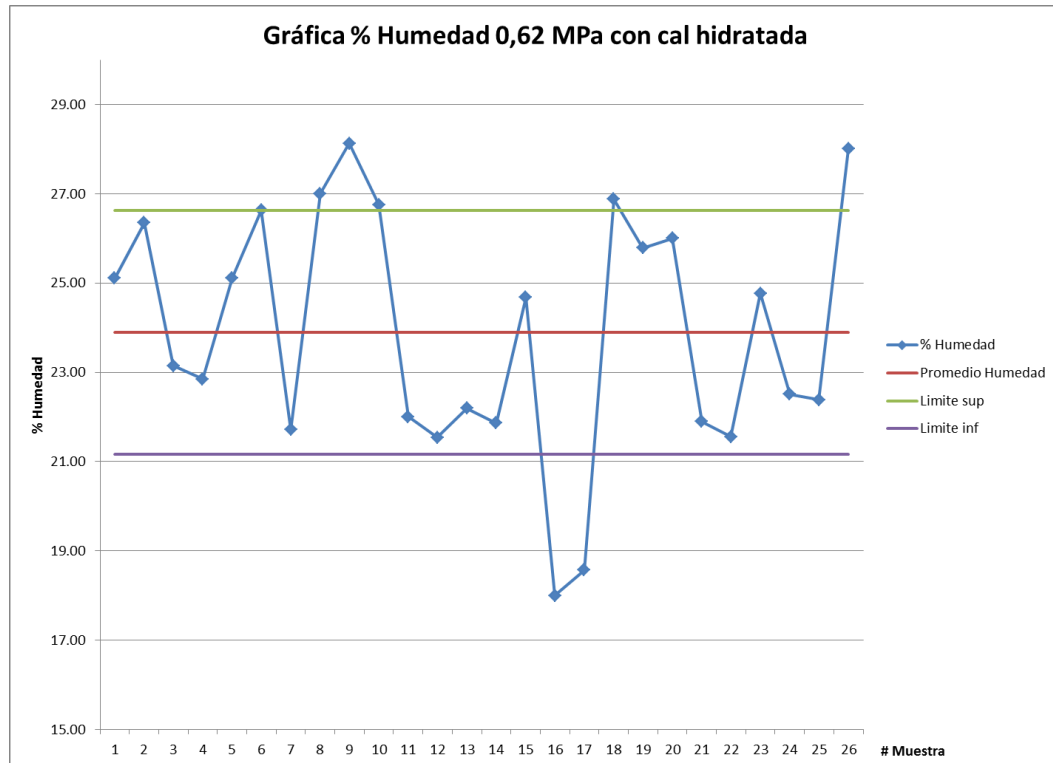
En cada una de las gráficas se pueden observar: valores de las 26 muestras realizadas, promedio de los valores y límites superior e inferior resultantes del promedio \pm desviación estándar.

Figura 4. Tiempo de operación



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Porcentaje de humedad



Fuente: elaboración propia.

3.3. Resultado 3

- Definir el menor costo operativo en el proceso de deshidratación de lodos, en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza.

Se evaluó para el costeo productivo, la prueba realizada a 4 MPa, que arrojó el menor valor de tiempo de operación.

Datos obtenidos de planificación productiva de planta:

- Producción diaria agregados: 2 500 ton
- Extracción diaria lodos: 600 ton
- Horas producción diaria: 16 h
- Horas filtración lodos diaria: 23 h
- Capacidad de filtro prensa: 8,08 m³
- Costo MO: Q152,51/h

Asumiendo 23 horas de filtrado diario (1 380 minutos)

Tomando el valor de 89,35 minutos de operación de filtración, se obtiene aproximadamente 46 procesos de filtrado en un día (15,4455 x 3 filtros).

$$46 \text{ filtradas} \times 8,08 \text{ m}^3/\text{filtrada} \times 1,28 \text{ ton/m}^3 = 475,75 \text{ ton}$$

$$475,75 \text{ ton} / 600 \text{ ton} = 80 \%$$

$$20 \% = 124,25 \text{ ton}$$

Realizando 46 filtradas diarias se lograría procesar un 80 por ciento de los lodos extraídos durante las 16 horas de producción de agregados.

Se tiene estipulado trabajar únicamente 20 días al mes (lunes a viernes), los fines de semana se dedican a mantenimientos preventivos programados para mantener el estándar y calidad de los equipos.

Trabajando 20 días a 23 horas, al ritmo de filtración de lodos a una presión de 4 MPa, el equipo es capaz de filtrar únicamente 9 515 toneladas, quedando pendientes 2 485 toneladas de filtrado y prensado. Manteniendo el ritmo de

filtrado y prensado de lodos aún con el tiempo óptimo resultante en las pruebas, el equipo es capaz de procesar únicamente el 80 por ciento de los lodos recuperados, quedando un 20 por ciento remanente que los silos de pulpa de arcilla no son capaces de almacenar diariamente, debido a esto el proceso de filtrado y prensado de lodos está casi en línea, con el proceso de trituración de agregados. El trabajar bajo estas condiciones obligaba a reducir los tiempos operativos, a modo de vaciar los remanentes de lodos aún no filtrados y presados en el área de silos.

La capacidad filtrante es de 475,75 ton/día, teniendo un remanente de 124,25 ton, el tiempo necesario para el reproceso diario sería de 6 horas, un aproximado de 6 días al mes, adicionalmente a los 20 días operativos estimados en el presupuesto de producción, en dicho caso, el filtrar y prensar lodos en este tiempo adicional, comprometerá la planificación de mantenimiento preventivo estipulado.

Se puede definir el costo mensual de operación de los filtros prensa de la siguiente manera: utilizando los datos obtenidos de la prueba de filtración y prensado a 4 MPa.

Para este cálculo no se tomarán en cuenta costos por mantenimiento, consumos de energía eléctrica y combustible, insumos, entre otros, por lo tanto se determina únicamente como el costo de mano de obra directa.

$$Q. 152,51 \times 23 \times (20+6) = Q. 91 200,98$$

Por último, se realiza el costeo del ensayo con valor de 0,62 MPa, utilizando cal hidratada. Los valores son los siguientes:

- El promedio de tiempo de operación de los filtros prensa, en las condiciones de 0,62 MPa + aditivo cal hidratada fue de 70,31 minutos.
- Con la operación de los 3 filtros, a 19,62 filtraciones diarias (1 380 minutos x día / 70,31 minutos x filtrada), se obtienen en total 59 filtraciones en 23 horas de trabajo diario.

$$59 \text{ filtradas} \times 8,08 \text{ m}^3/\text{filtrada} \times 1,28 \text{ ton/m}^3 = 610,20 \text{ ton}$$

$$610,20 \text{ ton} / 600 \text{ ton} = 101,7 \%$$

Bajo este escenario no se programan días adicionales de filtración pues se cumple diariamente en 23 horas con la filtración de 16 horas de producción de agregados, existe un ahorro de 7 horas al mes por sobrepasar el 100 por ciento de filtrado diario.

El costo mensual como rubro de mano de obra será:

$$Q. 152,51 \times ((23 \times 20) - 7) = Q. 69 087,03$$

El precio de la cal hidratada adquirida para la realización de las pruebas fue de Q. 25,45.

$$59 \text{ filtradas} \times 1 \text{ saco de } 44 \text{ lbs de cal} \times Q. 25,45/\text{saco cal} \times 20 \text{ días} = \\ Q. 30 031,00$$

- El costo total de filtración en condiciones de 0,62 MPa + aditivo cal hidratada fue de: Q. 99 118,03.

3.4. Resultado 4

- Minimizar el impacto ambiental en el área de influencia, reduciendo la contaminación por mala disposición y transporte de lodos húmedos.

El porcentaje más bajo de humedad presente en los lodos de arcilla ya prensados, de la primera parte del experimento arroja el valor de 25,91 por ciento, obtenido a 4 MPa.

El resultado utilizando cal hidratada como aditivo, a 0,62 MPa, fue de 23,90 %.

Durante los ensayos en los patios de acumulación de lodos prensados, se puede identificar presencia de humedad en área desplazada por gravedad hacia el suelo donde se almacenaron las galletas resultantes de las pruebas.

Tres de las pruebas realizadas: 3,10 MPa, 4 MPa y 0,62 MPa + cal hidratada, tuvieron resultados favorables, no se encontró humedad en el suelo donde se almacenaron.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Discusión de resultados 1

- Determinar la influencia de la variable presión de inyección, sobre las variables: tiempo de prensado y porcentaje de humedad de los lodos, en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza.

Tanto el tiempo de operación como el porcentaje de humedad, variables dependientes del proceso, presentan una variación inversa a la presión de inyección de lodos, a mayor presión, menor tiempo de operación y porcentaje de humedad.

En el cuadro III de la sección de resultados se tabulan los resultados de la manipulación de la variable presión, en la sección de apéndices se encuentran las tablas individuales por manipulación de presión, donde se muestrean 26 galletas de lodos de arcilla por lote.

Los primeros resultados de las pruebas arrojaron valores altos de tiempo y humedad. 112,96 minutos de tiempo de operación y 37,74 por ciento de humedad.

Los límites de Atterberg para suelos arcillosos establecen que el área plástica está comprendida entre el 25 y el 40 por ciento de humedad, por debajo del primer valor el material tiende a estar seco y desmoronarse, por arriba del segundo valor el material estará pastoso y líquido con tendencia a escurrirse.

El valor inicial de humedad se encuentra dentro del rango plástico del material, pero no tiene la consistencia adecuada para su manejo, el valor debe acercarse lo más al 25 por ciento establecido, lo que se va logrando conforme se realiza el incremento de presión, en intervalos de 0,345 MPa (50 PSI), llegando al mínimo de 37,74 por ciento.

Los filtros 3 filtros prensa trabajan 23 horas diarias, 20 días al mes, durante este tiempo los filtros deberán ser capaces de procesar los lodos producidos durante los turnos de trituración de 16 horas diarias.

Evaluando el tiempo obtenido de la prueba a 0,62 MPa, de 112,96 minutos, serían necesarios 11,65 días adicionales, valor que sobrepasa el concepto de mes calendario, por lo que no es viable el trabajo del equipo bajo estas condiciones, bajo ningún punto de vista. Conforme avanza el incremento de presión, el resultado de 4 MPa, arroja un valor más congruente, en este caso sería necesario 6 días adicionales a los 20 planificados, teóricamente es posible el concepto de trabajar 26 días en filtración de lodos, esto implicaría la reducción de tiempo disponible de los equipos para la ejecución de mantenimientos programados, que conllevaría a descuidar el cuidado adecuado de los mismos. De igual manera, no existe capacidad dentro de los silos, para poder almacenar pulpa de arcilla sin procesar, se cuenta con 4 silos con capacidad total de almacenaje de 20 filtraciones, menos de medio día de procesamiento de lodos.

4.2. Discusión de resultados 2

- Determinar la existencia de una variable química que reduzca el porcentaje de humedad de los lodos, en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza.

Dentro del análisis químico de la arcilla se identificaron 2 compuestos, característicos del carbonato de calcio: el óxido de calcio y el óxido de magnesio, compuestos principales de la cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$, previo al proceso de calcinación e hidratación para la obtención de la misma.

Se eligió este compuesto como aditivo por varias razones:

- Por sus bondades en el tratamiento y estabilización de suelos (arcillas), gracias a sus propiedades reductoras de humedad, en donde los iones de Ca, son expuestos en la superficie de las partículas arcillosas, desplazando la humedad.
- Por la similitud en la composición química, tanto de los lodos de arcilla como de la cal hidratada, diferenciándose únicamente en el proceso de fabricación del mismo, así como de la composición física (granulometría), se garantiza no variar estas 2 características en los lodos prensados.

Con el solo hecho de adicionar cal hidratada al proceso de filtrado y prensado de lodos, se nota una mejoría en los tiempos de operación y porcentaje de humedad, en este cuadro mostrado a continuación se tabulan los valores de tres pruebas, 0,62 MPa, 4 MPa y 0,62 MPa con cal hidratada.

Tabla V. **Resultados obtenidos en pruebas de campo**

| Presión (MPa) | Tiempo (minutos) | Humedad (% en peso) |
|----------------------|------------------|---------------------|
| 0,62 | 112,96 | 37,74 |
| 4,00 | 89,35 | 25,91 |
| 0,62 + Cal hidratada | 70,31 | 23,90 |

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar la reducción sustancial de ambas variables, tiempo de operación y porcentaje de humedad, utilizando el aditivo cal hidratada.

Las figuras 4 y 5 (ver resultados), se generan a partir de los datos presentados en el tabla IV, graficando individualmente tiempo de operación y porcentaje de humedad vs presión de inyección. En cada gráfica, están identificados, el promedio de los valores y límites superior e inferior, definidos por el promedio y la desviación estándar.

Se puede observar en las gráficas que no existe ningún comportamiento tipo racha, el máximo de puntos por arriba o debajo del promedio es de 5 unidades, una racha o tendencia está determinado por arriba de 6 unidades para muestreos de 21-100 puntos.

Aunque la dispersión de los valores no demuestra ningún comportamiento atípico como una racha, alguna tendencia, ciclo o cambio repentino en el proceso, hay algunos puntos de ambas gráficas que están por fuera de los

límites de control, en ambos casos, se identifican 7 puntos fuera de dichos límites, tanto inferior como superior.

Esta dispersión puede deberse a varios factores durante el proceso de toma de muestras: tipo de material procesado, operadores de maquinaria, instrumentos de medición y, en el caso del cálculo del porcentaje de humedad, equipo y personal de laboratorio utilizado. El proceso experimental se llevó a cabo en un tiempo aproximado de 3 meses, durante dicho tiempo, el material de alimentación al proceso de trituración pudo variar, dependiendo de qué banco de explotación de la cantera se extrajo el material.

Excluyendo estos valores, puede igual determinarse, que el promedio de los valores del tiempo de operación de los filtros prensa, así como el porcentaje de humedad en el ensayo de inyección de lodos y filtración a 0,62 MPa + aditivo cal hidratada, es representativo como dato final de dicho ensayo para ambas variables.

4.3. Discusión de resultados 3

- Definir el menor costo operativo en el proceso de deshidratación de lodos, en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza.

Con los valores económicos de operación del equipo, según los cálculos a 4 MPa y a 0,62 MPa + cal hidratada, Q. 91 200,98 y Q. 99 118,03 respectivamente, se podría tomar como mejor elección la operación del equipo con el incremento máximo de presión.

En las inspecciones visuales al equipo posterior a las pruebas por arriba de los 3,10 MPa, se registraron daños a las telas filtrantes ocasionadas por la

formación de partículas, superiores a los 0,5 mm resultantes de aglomeraciones de arcillas, o partículas que fueron arrastradas desde el sistema, e inyectadas a altas presiones dentro de las recámaras de los filtros.

Estos daños se tomarán como un costo oculto al trabajar el equipo a la máxima presión permitida, el riesgo a provocar daños a las telas filtrantes, se incrementa sustancialmente. Estos costos pueden ascender a un valor según el cuadro detallado a continuación, en el cual sería necesario revestir un filtro completamente.

Tabla VI. **Costos de cambio completo de telas a filtro prensa**

| Número de material | Descripción de material | Cantidad por filtro | Costo unitario | Total por filtro |
|--------------------|--|---------------------|----------------|----------------------|
| 6798-0638 | TELA SOPORTE SENCILLA P-510-M/160 | 298 | Q. 244,78 | Q. 72 944,44 |
| 6798-0639 | TELA DOBLE PA-100% N-323-FC/178 | 149 | Q. 1 164,57 | Q. 173 520,93 |
| 6798-0640 | TELA SOP. SENC.FINAL PP-100% P-510-M/160 | 4 | Q. 180,50 | Q. 722,00 |
| 6798-0642 | TELA SENCILLA FINAL PA-100% 1607X1600 mm | 4 | Q. 491,35 | Q. 1 965,40 |
| | | | TOTAL | Q. 249 152,77 |

Fuente: elaboración propia.

4.4. Discusión de resultados 4

- Minimizar el impacto ambiental en el área de influencia, reduciendo la contaminación por mala disposición y transporte de lodos húmedos.

El Código de Valores, Ética, y conducta (COVEC) establece en uno de sus ejes (valores), compromiso con la sostenibilidad de la empresa: la responsabilidad social y ambiental de la empresa con el país, buscando desarrollar y mejorar procesos productivos que minimicen la contaminación ambiental.

Definido esto, uno de los objetivos en la optimización del proceso de deshidratación de lodos en la trituración de agregados, es obtener un porcentaje de humedad de los lodos prensados igual o por debajo de 25 por ciento, con lo que se obtendrá lodos secos, estos ya podrán ser transportados de manera segura y limpia, en camiones de volteo o góndolas tradicionales, hacia su lugar de destino, en donde se irá fabricando y añadiendo material formando capas y plataformas recuperando áreas explotadas, estabilizando terrenos y conformando plataformas a las que posteriormente se les podrá dar usos diversos.

Trasladar lodos húmedos o mojados tendrá consecuencias ambientales durante su traslado, contaminando carreteras, afluentes durante el trayecto en época de lluvia, en el área de apilamiento implicará atrasos por secado de material, difícil compactación y operación de maquinaria por plataformas aguadas, generando riesgos laborales, generación de focos de proliferación de mosquitos por la presencia de agua estancada, entre otros.

CONCLUSIONES

1. Se logró la optimización del proceso de deshidratación de lodos en una cantera de piedra caliza, por medio de la reducción de tiempos de operación y la disminución del porcentaje de humedad por debajo de 25 por ciento, presente en los lodos, obtenidos luego del proceso de filtrado y prensado de los mismos.
2. Un proceso adecuado de separación de contaminantes (arcillas) de los agregados, garantizará la calidad del producto, reduciendo los riesgos por desperfectos en la construcción de obras a base de concreto y asfalto.
3. Las variables: tiempo de prensado (y) y porcentaje de humedad (y) en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza según la tabla III, presentan una variación inversa a la presión de inyección (x). Los resultados pueden transcribirse a un modelo matemático lineal para ambas variables: ($y = -2,7968x + 110,89$) y ($y = -1,4339x + 37,535$) respectivamente.
4. Es determinante conocer la composición química de los lodos de arcilla en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza, para la selección y uso de un aditivo reductor de humedad como método alternativo, que no altere las propiedades fisicoquímicas de los lodos.
5. El costo de operación de los filtros prensa, está determinado por los valores de: mano de obra, consumos de energía eléctrica generada y comprada, materiales, repuestos y mantenimiento.

6. El menor costo de operación de los filtros prensa se logra mediante la aplicación de baja presión de inyección, evitando incurrir en costos altos por daños al equipo en el rubro de mantenimiento fuera de programación.

7. Los lodos de arcilla provenientes del proceso de trituración de agregados en una cantera de piedra caliza con porcentaje de humedad menor a 25 por ciento, presentan una consistencia sólida al tacto, sin exceso de humedad, lo que reduce el impacto ambiental en el área de influencia, al evitar derrames y escorrentías que contaminen tramos carreteros, afluentes en las áreas de desecho y almacenaje.

RECOMENDACIONES

1. Las presiones de inyección de lodos en el proceso de deshidratación de lodos en la trituración de agregados en una cantera de piedra caliza, no deben sobrepasar los 3,10 MPa.
2. Realizar una medición de eficiencia y tiempos operativos de los equipos, comparar los datos con capacidades nominales teóricas para verificar productividad del equipo y del personal operativo a cargo.
3. Darle seguimiento al proceso de adición de cal hidratada, para determinar la dosificación idónea por ciclo de filtrado, definiendo una posible reducción en su uso y por ende, una reducción de costos de compra del aditivo.
4. Evaluar la posibilidad de instalar un silo y dosificadora de aditivo, evitando el manejo de los sacos de cal hidratada hacia el área de los filtros prensa.
5. Por su composición química, los lodos prensados obtenidos del proceso, pueden utilizarse como posible materia prima de Clinker en el proceso de fabricación de cemento.
6. Identificar dentro del territorio capitalino, áreas de posible disposición para los lodos.

7. Realizar un análisis granulométrico a la cal hidratada mensualmente, para verificar, que no existan partículas superiores a 0,5 mm, que generan daños en las telas filtrantes.

BIBLIOGRAFÍA

1. Anaya, J. 2007. Logística integral, la gestión operativa de la empresa. 3a ed. España, ESIC. 292 p.
2. Armstrong, J y Menon, R. n.d. Minas y canteras, Industrias basadas en recursos naturales, Cap. 74. 64 p.
3. Bosch, J R. 1976. Secado de lodos de aguas residuales por filtración-evaporación natural, eras de secado. Tesis de doctorado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, España. 224 p.
4. Candisano, J. 2009. Tecnología del hormigón, propiedades físicas de los agregados, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina, s.e. 8 p.
5. Carrasco, M F. 2007. Roca y agregados para hormigones. Universidad Tecnológica Nacional, s.e. 31 p.
6. Collado, C F; Lucio, P B; Sampieri, R H. 1991. Metodología de la investigación. México, Pearson Educación. 304 p.
7. Degremont 1991. Water Treatment Handbook. 6a edición, Reino Unido.
8. García J. 1992. Recursos minerales de España. España, CSIC editorial. 1250 p.

9. Grajales, T. 2000. Tipos de investigación. Recuperado de <http://tgrajales.net/investipos.pdf>. [Consulta: 15 de Agosto 2012]
10. Herberth, J H. 2007. Diseño de explotaciones de cantera, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. s.e. 41 p.
11. Horngren, C; Datar, S; Foster, G. 2007. Contabilidad de costos: un enfoque gerencial. 12a edición. México, Pearson Educación. 896 p.
12. Ingenieros Consultores de Centroamérica, S.A. 2000. Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes, Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, Guatemala.
13. Leidinger, O. 1997. Procesos industriales. Perú, Fondo Editorial. 289 p.
14. Olavarrieta, J. 1999. Conceptos generales de productividad, sistemas, normalización y competitividad para la pequeña y mediana empresa. México, s.e.80 p.
15. Ramos-Álvarez, M; Catena, A. 2003. Normas para la elaboración y revisión de artículos originales experimentales en ciencias del comportamiento. Universidad de Jaén y Universidad de Granada, España.
16. Romero, O; Muñoz, D; Romero, S. 2006. Introducción a la ingeniería, un enfoque industrial. México, Thomson Editoriales. 391 p.
17. Sanz, J J. 1975. Fundamentos de mecánica del suelo, proyecto de muros y cimentaciones. 2a edición. Barcelona, España. Editores Técnicos Asociados. 417 p.

18. Sinisterra, G. s.f. Contabilidad de costos. ECOE Ediciones. 424 p.
19. Terex Roadbuilding. 2004. Cuidados com os agregados. Presentación. Brasil. 21 p.
20. Van Dalen, D; Meyer, W. 1971. Manual de técnicas de la investigación educacional. Barcelona, España, Centro Regional de Ayuda Técnica. 542p.
21. Watson, R. 2006. Explotación de canteras. 53 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabulación de primera prueba a 0,62 MPa**

| No. Muestra | Tiempo traslación placas (min) | % Humedad |
|-------------|--------------------------------|-----------|
| 1 | 112 | 37,23 |
| 2 | 110 | 36,98 |
| 3 | 114 | 37,02 |
| 4 | 112 | 38,45 |
| 5 | 112 | 36,64 |
| 6 | 113 | 38,22 |
| 7 | 112 | 38,14 |
| 8 | 113 | 38,22 |
| 9 | 114 | 37,41 |
| 10 | 112 | 36,01 |
| 11 | 114 | 37,92 |
| 12 | 113 | 37,04 |
| 13 | 110 | 37,17 |
| 14 | 116 | 36,09 |
| 15 | 112 | 37,67 |
| 16 | 113 | 36,72 |
| 17 | 112 | 38,81 |
| 18 | 111 | 37,36 |
| 19 | 113 | 38,99 |
| 20 | 115 | 38,76 |
| 21 | 114 | 38,73 |
| 22 | 113 | 37,97 |
| 23 | 117 | 37,87 |
| 24 | 113 | 37,10 |
| 25 | 114 | 40,96 |
| 26 | 113 | 37,75 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Tabulación de primera prueba a 1,03 MPa**

| No. Muestra | Tiempo traslación placas (min) | % Humedad |
|-------------|--------------------------------|-----------|
| 1 | 105 | 34,35 |
| 2 | 104 | 34,07 |
| 3 | 103 | 34,64 |
| 4 | 104 | 34,02 |
| 5 | 109 | 34,65 |
| 6 | 109 | 34,74 |
| 7 | 106 | 33,15 |
| 8 | 105 | 33,53 |
| 9 | 104 | 34,95 |
| 10 | 109 | 33,06 |
| 11 | 103 | 34,85 |
| 12 | 102 | 34,19 |
| 13 | 106 | 36,69 |
| 14 | 108 | 34,29 |
| 15 | 108 | 34,39 |
| 16 | 105 | 35,97 |
| 17 | 106 | 34,90 |
| 18 | 103 | 33,86 |
| 19 | 102 | 34,16 |
| 20 | 106 | 34,59 |
| 21 | 103 | 33,67 |
| 22 | 105 | 33,80 |
| 23 | 106 | 35,70 |
| 24 | 103 | 34,67 |
| 25 | 109 | 36,62 |
| 26 | 106 | 33,63 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Tabulación de primera prueba a 1,38 MPa**

| No. Muestra | Tiempo traslación placas (min) | % Humedad |
|-------------|--------------------------------|-----------|
| 1 | 99 | 32,03 |
| 2 | 101 | 33,62 |
| 3 | 101 | 32,90 |
| 4 | 98 | 33,41 |
| 5 | 106 | 31,52 |
| 6 | 102 | 33,04 |
| 7 | 102 | 33,37 |
| 8 | 101 | 33,49 |
| 9 | 99 | 33,87 |
| 10 | 99 | 32,56 |
| 11 | 98 | 31,83 |
| 12 | 101 | 32,65 |
| 13 | 99 | 32,63 |
| 14 | 101 | 33,09 |
| 15 | 104 | 33,36 |
| 16 | 99 | 33,77 |
| 17 | 105 | 32,86 |
| 18 | 100 | 32,88 |
| 19 | 101 | 32,06 |
| 20 | 105 | 32,56 |
| 21 | 101 | 33,17 |
| 22 | 99 | 33,70 |
| 23 | 100 | 33,25 |
| 24 | 102 | 31,80 |
| 25 | 98 | 33,71 |
| 26 | 98 | 33,13 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Tabulación de primera prueba a 1,72 MPa**

| No. Muestra | Tiempo traslación placas (min) | % Humedad |
|-------------|--------------------------------|-----------|
| 1 | 96 | 32,64 |
| 2 | 97 | 30,48 |
| 3 | 96 | 31,39 |
| 4 | 99 | 31,22 |
| 5 | 102 | 30,15 |
| 6 | 102 | 31,14 |
| 7 | 95 | 31,92 |
| 8 | 96 | 30,81 |
| 9 | 97 | 31,19 |
| 10 | 95 | 31,11 |
| 11 | 98 | 30,22 |
| 12 | 96 | 31,45 |
| 13 | 97 | 30,73 |
| 14 | 97 | 31,84 |
| 15 | 99 | 31,45 |
| 16 | 99 | 31,23 |
| 17 | 96 | 31,92 |
| 18 | 100 | 31,72 |
| 19 | 97 | 29,95 |
| 20 | 96 | 31,11 |
| 21 | 99 | 31,43 |
| 22 | 96 | 32,01 |
| 23 | 97 | 31,53 |
| 24 | 100 | 31,64 |
| 25 | 98 | 30,42 |
| 26 | 96 | 30,83 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Tabulación de primera prueba a 2,07 MPa**

| No. Muestra | Tiempo traslación placas (min) | % Humedad |
|-------------|--------------------------------|-----------|
| 1 | 92 | 27,95 |
| 2 | 94 | 31,24 |
| 3 | 97 | 31,60 |
| 4 | 95 | 28,32 |
| 5 | 97 | 29,56 |
| 6 | 94 | 31,25 |
| 7 | 96 | 31,30 |
| 8 | 93 | 28,56 |
| 9 | 95 | 29,12 |
| 10 | 92 | 29,59 |
| 11 | 95 | 28,35 |
| 12 | 92 | 27,76 |
| 13 | 94 | 28,53 |
| 14 | 97 | 31,70 |
| 15 | 93 | 28,05 |
| 16 | 95 | 28,26 |
| 17 | 93 | 28,83 |
| 18 | 94 | 28,56 |
| 19 | 92 | 28,59 |
| 20 | 95 | 27,41 |
| 21 | 92 | 30,44 |
| 22 | 93 | 28,83 |
| 23 | 96 | 28,04 |
| 24 | 91 | 31,84 |
| 25 | 95 | 30,19 |
| 26 | 96 | 28,53 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6.

Tabulación de primera prueba a 2,41 MPa

| No. Muestra | Tiempo traslación placas (min) | % Humedad |
|-------------|--------------------------------|-----------|
| 1 | 90 | 27,42 |
| 2 | 91 | 27,61 |
| 3 | 95 | 28,85 |
| 4 | 91 | 28,56 |
| 5 | 94 | 28,67 |
| 6 | 93 | 28,35 |
| 7 | 91 | 28,64 |
| 8 | 90 | 27,51 |
| 9 | 95 | 27,37 |
| 10 | 92 | 27,85 |
| 11 | 91 | 29,07 |
| 12 | 93 | 26,94 |
| 13 | 93 | 28,04 |
| 14 | 96 | 27,94 |
| 15 | 91 | 27,64 |
| 16 | 92 | 27,48 |
| 17 | 90 | 27,23 |
| 18 | 93 | 27,49 |
| 19 | 90 | 26,91 |
| 20 | 94 | 26,63 |
| 21 | 92 | 28,34 |
| 22 | 90 | 29,20 |
| 23 | 93 | 27,40 |
| 24 | 90 | 28,70 |
| 25 | 92 | 28,37 |
| 26 | 94 | 28,78 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Tabulación de primera prueba a 2,76 MPa**

| No. Muestra | Tiempo traslación placas (min) | % Humedad |
|-------------|--------------------------------|-----------|
| 1 | 89 | 27,51 |
| 2 | 92 | 26,74 |
| 3 | 90 | 25,82 |
| 4 | 89 | 28,38 |
| 5 | 97 | 27,66 |
| 6 | 91 | 26,60 |
| 7 | 90 | 28,37 |
| 8 | 92 | 26,45 |
| 9 | 89 | 26,98 |
| 10 | 90 | 25,06 |
| 11 | 88 | 27,58 |
| 12 | 93 | 28,30 |
| 13 | 90 | 26,40 |
| 14 | 93 | 26,98 |
| 15 | 88 | 26,92 |
| 16 | 90 | 26,72 |
| 17 | 90 | 27,56 |
| 18 | 89 | 28,55 |
| 19 | 89 | 26,89 |
| 20 | 89 | 27,10 |
| 21 | 91 | 28,44 |
| 22 | 88 | 26,04 |
| 23 | 90 | 29,07 |
| 24 | 88 | 27,53 |
| 25 | 89 | 25,21 |
| 26 | 92 | 27,92 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8.

Tabulación de primera prueba a 3,10 MPa

| No. Muestra | Tiempo traslación placas (min) | % Humedad |
|-------------|--------------------------------|-----------|
| 1 | 90 | 26,04 |
| 2 | 90 | 29,16 |
| 3 | 89 | 25,95 |
| 4 | 89 | 26,47 |
| 5 | 89 | 26,01 |
| 6 | 88 | 26,17 |
| 7 | 89 | 25,64 |
| 8 | 90 | 28,08 |
| 9 | 92 | 26,26 |
| 10 | 90 | 25,64 |
| 11 | 89 | 25,58 |
| 12 | 90 | 26,08 |
| 13 | 91 | 27,02 |
| 14 | 92 | 26,95 |
| 15 | 88 | 25,90 |
| 16 | 89 | 25,76 |
| 17 | 92 | 26,59 |
| 18 | 89 | 27,03 |
| 19 | 88 | 26,87 |
| 20 | 88 | 25,87 |
| 21 | 92 | 27,33 |
| 22 | 90 | 25,57 |
| 23 | 89 | 27,64 |
| 24 | 89 | 26,92 |
| 25 | 90 | 26,81 |
| 26 | 90 | 26,17 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Tabulación de primera prueba a 4 MPa**

| No. Muestra | Tiempo traslación placas (min) | % Humedad |
|-------------|--------------------------------|-----------|
| 1 | 90 | 24,89 |
| 2 | 88 | 25,81 |
| 3 | 92 | 25,36 |
| 4 | 88 | 25,71 |
| 5 | 93 | 26,07 |
| 6 | 89 | 25,38 |
| 7 | 88 | 25,41 |
| 8 | 90 | 27,42 |
| 9 | 88 | 25,43 |
| 10 | 89 | 26,26 |
| 11 | 90 | 25,92 |
| 12 | 88 | 27,95 |
| 13 | 92 | 24,52 |
| 14 | 89 | 26,29 |
| 15 | 90 | 26,04 |
| 16 | 89 | 24,75 |
| 17 | 88 | 27,01 |
| 18 | 89 | 25,89 |
| 19 | 88 | 26,35 |
| 20 | 90 | 24,78 |
| 21 | 88 | 24,55 |
| 22 | 88 | 26,33 |
| 23 | 88 | 26,52 |
| 24 | 90 | 25,74 |
| 25 | 89 | 26,97 |
| 26 | 92 | 26,28 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Filtro prensa**



Fuente: área de filtros prensa.

Apéndice 11. **Sacos de cal prueba a 0,62 MPa**



Fuente: área de filtros prensa.

Apéndice 12. **Bomba de inyección de lodos hacia los filtros**



Fuente: estación de bombeo de lodos.

Apéndice 13. **Silos de lodos de arcilla**



Fuente: alimentación de filtros prensa.

Apéndice 14. **Traslación de placas**



Fuente: área de filtros prensa.

Apéndice 15. **Caída de galletas de lodo**



Fuente: patios de almacenaje de lodos.

Apéndice 16. **Galleta de lodos de arcilla**



Fuente: área de filtros prensa.

Apéndice 17. **Consistencia galleta de arcilla**



Fuente: laboratorio control de calidad.

ANEXOS

Anexo 1. Toma de datos

| | | | | |
|--|-----------------|-------------------|--------------------|-------------------------|
| | | | | |
| Ensayo | | | | |
| Fecha | | | | |
| Procedencia | | | | |
| Ejecutante | | | | |
| INFORME DE ENSAYOS | | | | |
| | Tiempo prensado | Presión de filtro | Humedad de galleta | Características galleta |
| Prueba 1 | | | | |
| Prueba 2 | | | | |
| Prueba 3 | | | | |
| Prueba 4 | | | | |
| Prueba 5 | | | | |
| Prueba 6 | | | | |
| Prueba 7 | | | | |
| Prueba 8 | | | | |
| Prueba 9 | | | | |
| Prueba 10 | | | | |
| OBSERVACIONES: | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| <small>Toda la información en esta hoja es una aproximación de las características del producto. Los productos actuales pueden variar.</small> | | | | |


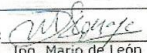
Fuente: empresa trituradora de agregados.

Anexo 2. Muestreo de materiales

| | | | | | | | | |
|---|------|------|---|------|-----|-----|------|--|
| | | | | | | | | |
| Cliente | | | | | | | | |
| Muestra | | | | | | | | |
| Procedencia | | | | | | | | |
| Fecha | | | | | | | | |
| INFORME DE ENSAYOS | | | | | | | | |
| Absorción (%) <small>Astm C-127</small> | | | Masa Unitaria Compactada (kg/m³) <small>Astm C-29</small> | | | | | |
| Partículas Planas y L_a <small>Astm D-4791</small> | | | Masa Unitaria Suelta (kg/m³) <small>Astm C-29</small> | | | | | |
| Pasa Tamiz 0.075mm <small>Astm C-117</small> | | | Humedad (%) <small>Astm C-566</small> | | | | | |
| Módulo de Finura (MF) <small>Astm C-136</small> | | | Peso Específico (kg/m³) <small>Astm C-127</small> | | | | | |
| Cleanness Value <small>Calif. 227</small> | | | Abrasión en Maquina de Los Angele <small>Astm C-131</small> | | | | | |
| ANÁLISIS GRANULOMETRICO ASTM C-33 | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| Estándar (mm) | 9.5 | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | |
| Nominal (pulg) | 3/8" | 4 | 8 | 16 | 30 | 50 | 100 | |
| % Pasa Acumulado | | | | | | | | |
| OBSERVACIONES: | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| Toda la información en está hoja es una aproximación de las características del producto. Los productos actuales pueden variar. | | | | | | | | |

Fuente: empresa trituradora de agregados.

Anexo 3. Análisis químico arcilla T200

|  | CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Av. 18 - 01 Zona 6, La Pedrera Tel: 2286 - 4178 Fax: 2286 - 4181 | | OT: | 12382 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|-----------------|---|--------|-----------------------|--|----------------------|-------|------------------------------------|------|------------------------------------|------|--------|-------|--------|------|---------------------|------|----------------------|------|---------------------|------|-----------------------------------|------|----------------------|------|------------------------------------|------|--------|------|-----------------|-------|-----------------|--------------|
| | | | FECHA: | ---- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | PÁGINA: | 3 DE 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | CORRELATIVO INFORME: | 633 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ANÁLISIS QUÍMICO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MEDIANTE DIFRACCIÓN DE RAYOS X* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CLIENTE: | AGREGUA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DIRECCIÓN: | ----- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CONTACTO: | ----- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TELÉFONO: | ----- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: | CLARIFICADOR T 10 ARCILLA (TAMIZ 200) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PROCEDENCIA: | AGREGUA ZONA 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">COMPOSICIÓN QUÍMICA**</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>SiO₂, %</td><td>12.50</td></tr> <tr><td>Fe₂O₃, %</td><td>1.17</td></tr> <tr><td>Al₂O₃, %</td><td>2.85</td></tr> <tr><td>CaO, %</td><td>43.59</td></tr> <tr><td>MgO, %</td><td>0.59</td></tr> <tr><td>K₂O, %</td><td>0.08</td></tr> <tr><td>Na₂O, %</td><td>0.10</td></tr> <tr><td>SO₃, %</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>P₂O₅, %</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>TiO₂, %</td><td>0.09</td></tr> <tr><td>Cr₂O₃, %</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>MnO, %</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>LOI (950 °C), %</td><td>37.29</td></tr> <tr><td>Total, %</td><td>98.36</td></tr> </tbody> </table> | | | | | COMPOSICIÓN QUÍMICA** | | SiO ₂ , % | 12.50 | Fe ₂ O ₃ , % | 1.17 | Al ₂ O ₃ , % | 2.85 | CaO, % | 43.59 | MgO, % | 0.59 | K ₂ O, % | 0.08 | Na ₂ O, % | 0.10 | SO ₃ , % | 0.00 | P ₂ O ₅ , % | 0.00 | TiO ₂ , % | 0.09 | Cr ₂ O ₃ , % | 0.05 | MnO, % | 0.05 | LOI (950 °C), % | 37.29 | Total, % | 98.36 |
| COMPOSICIÓN QUÍMICA** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ , % | 12.50 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fe ₂ O ₃ , % | 1.17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Al ₂ O ₃ , % | 2.85 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CaO, % | 43.59 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MgO, % | 0.59 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| K ₂ O, % | 0.08 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Na ₂ O, % | 0.10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SO ₃ , % | 0.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| P ₂ O ₅ , % | 0.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TiO ₂ , % | 0.09 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cr ₂ O ₃ , % | 0.05 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MnO, % | 0.05 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| LOI (950 °C), % | 37.29 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Total, % | 98.36 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| * El ensayo se realizó en el Laboratorio de Control de Calidad de Cementos Progreso. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ** Expresada como porcentaje en masa (w/w). | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Observaciones: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ANALISTA: | RAÚL GÓMEZ | AUTORIZADO POR: |  Ing. Mario de León Jefe de Laboratorio | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fecha de ensayo: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <small>Los resultados presentados por este informe de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el interesado. El laboratorio no se responsabiliza por las condiciones de manejo y transporte de las mismas antes de su llegada al CETEC. Prohibida la reproducción total o parcial de este informe.</small> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

SGL - CT - QC - IE - 01/Rev 01

Fuente: CETEC, Cementos Progreso.