

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA DEL USO DE
YESO SINTÉTICO EN LA FABRICACIÓN DE CEMENTO
PÓRTLAND.**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Aru M, Betsy D
Para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2007

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA DEL USO DE
YESO SINTÉTICO EN LA FABRICACIÓN DE CEMENTO
PÓRTLAND.**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Andrés Rosales
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Rodolfo Ramírez.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Aru M., Betsy D.
Para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2007

Caracas, Noviembre, 2007

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Betsy Aru, titulado:

“Estudio de la factibilidad técnica del uso de yeso sintético en la fabricación de Cemento Pórtland.”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran **APROBADO**.



Prof. Aimee Ramos

Jurado



Prof. Leonardo Oropeza

Jurado



Prof. Andrés Rosales

Tutor Académico



Ing. Rodolfo Ramírez

Tutor Industrial

DEDICATORIA

Con todo cariño a:

*A mis queridos padres Raymundo Aru Bracutti y María Rosalba Montes Chapeta
A mis hermanos Raymundo José Aru Montes y Freddy Reynaldo Aru Montes
A mi novio Luís Alfonso Dávila Vivas
Amigos y demás familiares*

Quienes siempre me han apoyado brindándome todo su amor y acompañándome en los momentos difíciles.

Sobre todo a *Dios* por ayudarme a salir de todos los inconvenientes y permitir que haya alcanzado ésta meta tan importante de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría aprovechar este espacio para mostrar mi más profundo agradecimiento a todas aquellas personas, que de alguna manera, forman parte importante de este logro tan significativo para mí. Considero que esta tesis es fruto de un gran trabajo en equipo y que todas las personas con las que participé, ayudaron a la culminación y el alcance de todas las metas propuestas.

En primer lugar quiero agradecer a la Facultad de ingeniería de la Universidad Central de Venezuela la cual junto con la Fábrica Nacional de cementos C.A (LAFARGE) planta Ocumare, hicieron posible para mí este trabajo, al igual que mis tutores de tesis Prof. Andrés Rosales y el Ing. Rodolfo Ramírez, quienes me prestaron su ayuda y brindaron sus conocimientos.

Al personal de Control de Calidad de la empresa, quienes me brindaron su ayuda en la realización de los ensayos como sus conocimientos y experiencia a; Rafael Fernández, Noemí Corredor, Manuel Navas, Lourdes de Pérez, Wolfan Urbina, Jakson Morales, José Aponte, José Olivares, Oswaldo Silva, Thulio Terán y a la Ing. Ana Acebedo.

Las demás personas que conforman la institución que me brindaron sus conocimientos y experiencia en el área; Stiwer Martínez, Cesar Franquiz, Darío Morán, Henry Méndez, Oscar Escola, Eliézer Quintero.

A los profesores de la facultad de ingeniería Francisco Yáñez, Humberto Kum, Nelson Camacho, Aimee Ramos, Leonardo Oropeza, Armando Vizcaya.

En el plano personal, me gustaría agradecer primeramente a mis padres Raymundo y Rosalba, por su ejemplo y su constante apoyo, quiero que sepan que estos logros son también fruto de toda su enseñanza. A mis hermanos Raymundo y Freddy por el apoyo que me han brindado en todos los aspectos. A mi adorado novio Luís Alfonso por su apoyo incondicional y por estar a mi lado en los malos y buenos momentos. También me gustaría dar las gracias a todos mis familiares y amigos, por su gran afecto y apoyo.

Aru M., Betsy D.

ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA DEL USO DE YESO SINTÉTICO EN LA FABRICACIÓN DE CEMENTO PÓRTLAND.

Tutor Académico: Prof. Andrés Rosales. Tutor Industrial: Ing. Rodolfo Ramírez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Año 2007, 135Pág.

Palabras Claves: Cemento Pórtland, Cemento Eco Plus, yeso Español, fosfoyeso, fraguado, molinos de cemento.

Resumen. En el proceso de fabricación del cemento se utiliza como materia prima la caliza, la arcilla, la arcilla ferrosa y el yeso. El yeso regula los tiempos de fraguado, influye en la expansión, y aporta resistencias a temprana edad. Actualmente el yeso empleado por la empresa es yeso natural importado, proveniente desde España y se estudió la sustitución del yeso natural, por una mezcla de yeso natural y yeso sintético. En esta mezcla se varió las proporciones de yeso sintético hasta obtener yeso sintético puro en el cemento. El fosfoyeso es producido por la empresa TRIPOLIVEN ubicada en Morón, estado Carabobo.

La metodología consistió en conocer la composición química del yeso natural y sintético a través de un conjunto de ensayos de laboratorio, como son, complexometría, gravimetría, y determinación del agua libre y combinada. A su vez se realizaron siete (7) muestras de cemento haciendo uso de un molino de prueba a escala de laboratorio, las muestras presentaron una composición típica del cemento Eco Plus, que es 80% de clinker, 15% de caliza y 5% de yeso, cuyo porcentaje de yeso estaba conformado por diferentes concentraciones de yeso natural y sintético, el barrido se realizó desde 100% yeso natural y 0% de yeso sintético hasta 100% yeso sintético y 0% yeso natural, a cada una de las muestras se realizaron ensayos

químicos para conocer su composición y ensayos físicos para conocer su comportamiento en obra, como lo son tiempos de fraguado inicial y final, resistencia a la compresión y expansión. Se realizó un enyesado óptimo o concentración óptima a nivel de laboratorio.

Se obtuvo que el yeso natural y el yeso sintético presentaron gran similitud y que el yeso sintético se puede emplear en el yeso total que conforma el cemento hasta un 30% a nivel de laboratorio, cumpliendo con la Norma COVENIN 3134 “cemento Pórtland con adiciones”. Se presentó un 5% de yeso en el cemento como concentración óptima a nivel de laboratorio.

Se realizó una prueba a nivel industrial, con un 20% de yeso sintético en el yeso total que conforma el cemento, haciendo uso de los molinos industriales, este porcentaje empleado se debió a que la cantidad máxima que ofrece la empresa Tripoliven, equivale al 20% de sustitución del yeso natural en la empresa y se estudió la influencia en las propiedades físicas del cemento (fraguado, resistencia a la compresión y expansión), obteniendo como resultado fraguados y resistencias dentro de la norma y problemas de expansión, debido a la presencia de cal libre en el cemento. Durante la prueba industrial se realizó el enyesado óptimo resultando que un 4,72% de yeso en el cemento, genera las mayores resistencias.

Se llevó a cabo un análisis económico y se determinó que la alternativa de usar 20% de yeso sintético en la producción del cemento genera un ahorro de **140.253 \$/año.**

ÍNDICE DE CONTENIDO

	<i>Pág</i>
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
CAPÍTULO II ANTECEDENTES	4
CAPÍTULO III MARCO TEÓRICO	6
3.1. Cemento	6
3.2. Clasificación	7
3.3. Calidad	9
3.4. Proceso productivo del cemento	10
3.4.1 Materias primas	10
3.4.2 Explotación y trituración de la arcilla y la caliza	11
3.4.3 Molienda de crudo	12
3.4.4 Homogeneización.	13
3.4.5 Cocción	14
3.4.6 Molienda de cemento	17
3.5. Composición química.	- 22 -
3.6. Estabilidad térmica de los sulfatos durante la molienda.	- 25 -
3.7. Hidratación.	- 26 -
3.7.1 Reacciones químicas	- 27 -
3.7.2 Papel que desempeñan los sulfatos	- 29 -
3.8. Sulfatado óptimo o concentración óptima	- 32 -
3.9. Finura	- 33 -
3.10. Consistencia normal	- 34 -
3.11. Fraguado	- 35 -
3.11.1 Parámetros que influyen en el fraguado	- 36 -
3.11.2 Tipos de fraguado	- 39 -
3.12. Resistencias	- 40 -
3.13. Expansión	- 42 -
3.14. Otros equipos.	- 43 -
3.14.1 Molino de prueba	- 43 -
3.14.2 Molino Herzong HSM 250H	- 44 -
3.14.3 Prensa Herzong http 40	- 44 -
3.14.4 Espectrómetro de Rayos X (Axios Cement)	- 45 -
3.15. Yeso	- 46 -
3.15.1 Origen del yeso	- 47 -

3.15.2 Síntesis de ácido fosfórico para obtención de fertilizantes fosfatados	- 48 -
CAPÍTULO IV METODOLOGÍA GENERAL	53
4.1. Revisión Bibliográfica	54
4.2. Toma de muestra	54
4.3. Preparación de las muestras	55
4.4. Análisis químico de las muestras de yeso natural y sintético.	55
4.5. Molienda de cemento a nivel de laboratorio	56
4.5.1. Análisis Químicos	57
4.5.2. Análisis Físicos	58
4.5.3. Enyesado óptimo o concentración óptima	59
4.6. Molienda de cemento a nivel industrial	59
4.6.1. Enyesado óptimo	60
4.7. Análisis de resultados	60
4.8. Evaluación económica	61
CAPÍTULO V RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	62
5.1. Análisis químico de las muestras de yeso natural y sintético	62
5.2. Molienda de cemento a nivel de laboratorio	64
5.2.1 Resultados de los análisis químicos	64
5.2.2 Resultados de los análisis físicos	68
5.2.3. Estudio de la influencia del aumento de la finura en las propiedades físicas del cemento.	73
5.2.4 Enyesado óptimo o concentración óptima	75
5.3. Molienda de cemento a nivel industrial	76
5.3.1. Análisis químicos y físicos	77
5.3.2 Enyesado óptimo o concentración óptima	80
5.3.3 Efecto en proceso	81
6. Análisis económico	83
CAPÍTULO VI CONCLUSIONES	85
CAPITULO VII RECOMENDACIONES	87
CAPÍTULO VIII REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
CAPÍTULO IX APÉNDICES	90
APÉNDICE A. NORMA COVENIN 3134: “CEMENTOS PÓRTLAND CON ADICIONES”	90
APÉNDICE B. INSTRUCTIVOS DE TRABAJO PARA REALIZAR LOS ENSAYOS DE LABORATORIO	97
APÉNDICE C. MOLTURABILIDAD DE LOS MATERIALES QUE CONFORMAN EL CEMENTO	125
APÉNDICE D. CARTILLA DE OPERACIÓN DEL MOLINO DE CEMENTO2	125

APÉNDICE E. PESO UNITARIO DEL YESO NATURAL Y SINTÉTICO	_____ 126
APÉNDICE F. DIAGRAMAS DE FLUJOS DEL SISTEMA DE MOLIENDA DE CEMENTO 2	_____ 126
APÉNDICE G. BALANCE DE ENERGÍA DEL MOLINO DE CEMENTO N° 2	_ 134
APÉNDICE H. CONSUMO ELÉCTRICO DE LOS EQUIPOS DEL MOLINO DE CEMENTO N° 2	_____ 135

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág
Figura N ° 1 Vista frontal del patio de Pre – Homogeneización de arcilla_____	11
Figura N ° 2 Vista del molino de crudo_____	13
Figura N ° 3 Vista del silo MS y a la derecha los silos FLS_____	13
Figura N ° 4 Vista de las torres de ciclones de Horno 1 (izquierda), y Horno 2 _____	14
Figura N ° 5 Vista de Horno 2 y sus enfriaderas de satélite_____	15
Figura N ° 6 Esquema general del proceso de cocción_____	16
Figura N ° 7 Componentes que conforman a un molino_____	18
Figura N ° 8 Esquema del sistema de molienda de circuito abierto_____	19
Figura N ° 9 Esquema del sistema de molienda de circuito cerrado _____	20
Figura N °10 Flujograma del proceso de fabricación del cemento_____	21
Figura N °11 Desarrollo de la resistencia a la compresión de los minerales que constituyen el Clinker_____	25
Figura N °12 Solubilidad en agua de los distintos tipos de sulfato de calcio__	26
Figura N °13 Esquema de la hidratación sin la adición los sulfatos _____	30
Figura N °14 Esquema de hidratación con adición de sulfato de calcio_____	31
Figura N °15 Fotografía del permeabilímetro Blaine _____	34
Figura N °16 Partes que conforman al aparato Vicat a la izquierda y a la derecha fotografía del equipo _____	35
Figura N °17 Fotografía de la prensa hidráulica para la resistencia a la compresión _____	42
Figura N °18 Fotografía del autoclave_____	43
Figura N °19 Molino de prueba _____	43
Figura N °20 Molino Herzong HSM 250H_____	44
Figura N °21 Prensa Herzong http 40 _____	45

Figura N° 22	Espectrómetro de rayos X _____	46
Figura N° 23	Diagrama de bloques del proceso de fabricación del ácido fosfórico _____	52
Figura N° 24	Esquema general de la metodología _____	53
Figura N° 25	Variación del tiempo de fraguado inicial Vicat en función del porcentaje de yeso sintético en el yeso que conforma el cemento _____	68
Figura N° 26	Variación del tiempo de fraguado final Vicat en función del porcentaje de yeso sintético en el yeso que conforma el cemento _____	69
Figura N° 27	Resistencias a la compresión a diferentes edades en función del porcentaje de yeso añadido al cemento y su correspondiente porcentaje de trióxido de azufre _____	76
Figura N° 28	Resistencia a la compresión a diferentes edades en función del porcentaje de yeso añadido al cemento y su correspondiente porcentaje de trióxido de azufre _____	80
Figura N° 29	Esquema del procedimiento complexométrico _____	100
Figura N° 30	Diagrama de flujo de la trituración y transporte de yeso _____	127
Figura N° 31	Diagrama de flujo de la dosificación al molino de cemento n° 2 _____	129
Figura N° 32	Diagrama de flujo del molino de cemento n° 2 _____	133

ÍNDICE DE TABLAS

	<i>Páginas</i>
Tabla N° 1	Fases que constituyen la etapa de la cocción. _____ 16
Tabla N° 2	Principales constituyentes químicos de la materia prima _____ 22
Tabla N° 3	Principales constituyentes químicos de los productos intermedios _____ 23
Tabla N° 4	Principales minerales constituyentes del clinker _____ 23
Tabla N° 5	Propiedades principales de los constituyentes del clinker _____ 24
Tabla N° 6	Composición del yeso natural y sintético en el 5% de yeso que conforman las muestras de cemento _____ 57
Tabla N° 7	Análisis químicos del yeso natural y sintético _____ 62
Tabla N° 8	Análisis químicos del clinker _____ 64
Tabla N° 9	Análisis químico de la caliza de la cantera el Melero _____ 66
Tabla N° 10	Análisis químicos de las muestras de cemento obtenidas de la variación de la composición de yeso sintético en el yeso añadido al cemento _____ 67
Tabla N° 11	Influencia del porcentaje de yeso sintético en la consistencia y demanda de agua en el cemento _____ 70
Tabla N° 12	Variación de los parámetros físicos del cemento con respecto a los porcentajes de yeso sintético en el yeso que conforma el cemento _____ 71
Tabla N° 13	Variación de la resistencia a la compresión a diferentes edades al aumentar la cantidad de yeso sintético en la cantidad de yeso añadida al cemento _____ 72
Tabla N° 14	Influencia del aumento de la superficie específica Blaine en las propiedades físicas del cemento _____ 74
Tabla N° 15	Influencia del aumento de la superficie específica Blaine en las resistencias a la compresión a diferentes edades _____ 75
Tabla N° 16	Análisis físicos y químicos de las muestras realizadas a nivel industrial _____ 77
Tabla N° 17	Resistencias a la compresión de las muestras realizadas a nivel industrial _____ 79
Tabla N° 18	Análisis económico del empleo del yeso natural y del empleo del yeso sintético en la fabricación del cemento Pórtland _____ 83

Tabla N° 19	Molturabilidad de los materiales que conforman el cemento_____	125
Tabla N° 20	Cartilla de operación del molino de cemento n° 2_____	125
Tabla N° 21	Peso unitario del yeso natural y sintético_____	126
Tabla N° 22	Etiquetas y función de los equipos que conforman al sistema de trituración y transporte de yeso_____	126
Tabla N° 23	Etiquetas y función de los equipos que conforman el sistema de dosificación al molino de cemento n° 2_____	128
Tabla N° 24	Etiquetas y función de los equipos que conforman al sistema de molienda de cemento n° 2_____	130
Tabla N° 25	Balance de energía del molino de cemento n° 2_____	134
Tabla N° 26	Consumo eléctrico de los equipos del sistema de molienda de cemento n° 2_____	135

DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

- **Álcalis:** Se refiere a los alcalinos totales, óxido de sodio y potasio, expresados como:

$$\text{Álcalis} : 0,658 \times K_2O + NaO$$

- **Bancos o terrazas:** Niveles en que se divide una explotación a cielo abierto para facilitar el trabajo de los equipos de perforación, carga y transporte.
- **Cemento a granel:** Cemento que se despacha en camiones cisternas.
- **Cenizas volantes:** Son puzolanas artificiales que se producen en la combustión de carbón mineral, fundamentalmente en las plantas térmicas de generación de electricidad.
- **Ciclones:** Equipo de desempolvado, que permite separar de un flujo gaseoso, el polvo que contenga, valiéndose para ello de la reducción de velocidad de las partículas que entran de manera tangencial al ciclón.
- **Cuarteo mecánico:** Se denomina cuarteo a la acción de dividir el material en dos partes iguales por medio de un equipo denominado cuarteador, hasta obtener la cantidad de muestra deseada, con la finalidad de tomar una muestra representativa del material total triturado.
- **Enfriador de satélites:** Equipo compuesto, por una serie de cilindros adheridos al horno, en el cual se da el intercambio térmico, entre el clinker que sale y el aire tomado del ambiente.
- **Escoria de altos hornos:** Es un subproducto del proceso de fundición de aleaciones ferrosas en altos hornos, las escorias al ser separado del metal fundido contiene todas las impurezas del mismo como son óxidos metálicos, sulfuros de metal, material silíceo.
- **Fraguado:** Es el paso de un estado líquido o pastoso a un estado sólido o es un estado de consistencia ligado a un carácter de irreversibilidad de los enlaces entre las partículas.
- **Molturabilidad:** Es la aptitud de un material para ser reducido a polvo. Puede ser medida en laboratorio con la ayuda de un molino de bolas de tipo BB-10 de 1kg de capacidad, equipado de una carga de bolas perfectamente definida, del que se mide el número de vueltas necesaria para alcanzar diferentes niveles de finura. Este molino permite conocer los Kwh. /Ton que se consumen al moler un determinado material por medio de la siguiente relación $\text{Kwh. /Ton} = 0,0142 * n$ vueltas.

- **Paletizado:** Colocar los sacos de cemento sobre una paleta.
- **Pérdida al fuego:** Es la pérdida de peso que tiene una muestra debido a la descarbonatación o volatilización cuando es sometida durante un tiempo a una temperatura determinada. La pérdida al fuego del cemento se determina con exposición de la muestra durante media hora a la temperatura de 1050°C.
- **Peso unitario:** Es la relación de la masa total de la muestra contenido en un volumen dado. Este valor es necesario para determinar la cantidad de agregado que puede ser acomodado en un determinado lugar, depende de su tamaño, forma, textura, compactación entre otros.
- **Puzolanas:** Materiales silíceos o aluminio-silíceos quienes por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes, se dividen en naturales como las de origen volcánico (cenizas volcánicas) o artificiales como cenizas volantes, escorias de altos hornos.
- **Reología:** Es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir.
- **Segregación:** Se refiere al hecho de ser separado de otros del mismo tipo. El término ha sido utilizado para describir un fenómeno en la manipulación del material, donde las partículas con propiedades idénticas tienen la tendencia a aglomerarse en cierta parte de la masa. Es gobernado por las siguientes propiedades de las partículas, como son: Tamaño de las partículas, densidad, forma entre otros.
- **Torre de precalcinación o torre de ciclones:** Sistema de intercambio térmico, compuesto por ciclones, en donde la harina cruda que desciende, se calienta en contracorriente gracias a las calorías aportadas por los gases de combustión que ascienden. En este la harina adquiere una temperatura de 850°C en la cual el carbonato de calcio se descarbonata para dar paso a la formación de óxido de calcio y dióxido de carbono y en menor proporción el carbonato de magnesio a 450 °C se descompone en óxido de magnesio y dióxido de carbono que se pierde con los gases, a través de la chimenea.
- **Trabajabilidad:** Grado de fluidez y manejabilidad que posee la pasta de cemento durante un tiempo, permitiendo su puesta en obra.
- **Transporte neumático:** Medio que permite el transporte de un material polvoriento, por medio de inyección de aire a través de una tubería.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La Fábrica Nacional de Cementos, planta Ocumare del Tuy, produce diferentes tipos de cemento Pórtland los cuales son Pórtland tipo I (La Vega Tradicional), cemento de albañilería (El Albañil), cemento tipo CPCA I (la Vega Eco Plus) y cemento Pórtland tipo IR (La Vega Ultra), y utiliza como materias primas para su fabricación, los siguientes materiales: Caliza, arcilla, arcilla ferrosa y yeso. La caliza, la arcilla y la arcilla ferrosa se dosifican a los *molinos de crudo*, en donde se obtiene un producto muy fino denominado harina cruda, ésta luego de homogeneizada es transportada hasta los silos de almacenamiento. La harina extraída de almacenaje se lleva a los ciclones (torre de intercambio de calor) en donde se incrementa su temperatura desde 80 °C hasta 850°C, ocurriendo la descarbonatación de la caliza, luego entra al horno (cilindro metálico revestido internamente de ladrillos y concreto refractario), en éste, la temperatura se va incrementando a lo largo del cilindro hasta alcanzar aproximadamente unos 1450°C, ocurriendo una serie de reacciones en donde la harina cruda se transforma en clinker Pórtland.

El clinker es transportado luego a los *molinos de cemento*, en donde se alimenta en promedio un 80% clinker, 5% de yeso y un 15% de caliza, para producir cemento tipo CPCA I (La Vega Eco Plus), dichas proporciones varían dependiendo del tipo de cemento que se produzca, esta mezcla finamente molida constituye el cemento Pórtland.

El yeso constituye una de las materias primas más importantes en el proceso de fabricación de cemento Pórtland, regula los tiempos de fraguado, influye en la expansión, y aporta resistencias a temprana edad. Actualmente el yeso empleado por la empresa es yeso natural importado, proveniente desde España y se desea reemplazar en ciertas proporciones o completamente por yeso sintético o fosfoyeso. El yeso natural es la materia prima de costo más elevado y la que causa mayor impacto económico en el proceso de producción, debido principalmente a los costos de importación, como son costos en transporte (flete marítimo y terrestre), tasa portuaria del yeso entre otros; teniendo un costo unitario de importación de 86\$/ton. La empresa que fabrica el fosfoyeso (TRIPOLIVEN) se encuentra ubicado en Morón, estado Carabobo, que por su cercanía a la planta en comparación a las canteras de yeso natural podría significar ahorros para la empresa, además que posee un costo unitario de 64\$/ton. Otro beneficio que obtendría la empresa es la uniformidad de las composiciones presentes en el yeso, ya que al variar de cantera y el frente de explotación dentro de la misma cantera, las composiciones de los elementos que conforman el yeso varían haciendo necesario ajustes de proporciones dentro del proceso.

El uso del yeso sintético trae además importantes beneficios a nivel ambiental debido a que el yeso sintético o fosfoyeso es un subproducto de la industria de los fertilizantes, que al estar apilado genera problemas de contaminación y ocupa espacio, situación que puede ser evitada por su utilización en la fabricación de nuevos productos, otra ventaja de este aprovechamiento es la disminución de la explotación del yeso natural en las minas, lo cual trae como consecuencia deforestación, contaminación de cuerpos de agua y aire.

Por todo ello, se desea conocer en que proporciones se puede emplear en el proceso el yeso sintético sin afectar la calidad del producto, realizando así el estudio de la factibilidad técnica del uso del yeso sintético en la fabricación del cemento

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Determinar la factibilidad técnica y económica del uso de yeso sintético en la fabricación del Cemento Pórtland tipo CPCA I (La Vega Eco Plus), a través de ensayos en la Fábrica Nacional de Cemento C.A.

1.2.2 Objetivos Específicos

- (a) Determinación de la composición química del yeso sintético y comparación con la del yeso natural.
- (b) Estudiar la sustitución del yeso natural por mezclas de yeso natural y sintético, variando la proporción del yeso sintético en dicha mezcla de yeso determinando la influencia en las propiedades físicas (fraguado, resistencia a la compresión, y expansión) del cemento, empleando un molino de cemento de prueba a escala de laboratorio para obtener las muestras de cemento.
- (c) Evaluar a nivel industrial la concentración de yeso sintético que posea mayor factibilidad para ser empleado en el proceso de fabricación determinando su influencia en las propiedades físicas del cemento (fraguado, resistencia a la compresión y expansión), haciendo uso de los molinos industriales para obtener las muestras.
- (d) Determinación de la concentración de yeso que genere las mayores resistencias a la compresión en el cemento (concentración óptima).
- (e) Realizar un estudio económico para determinar si el uso del yeso sintético en el proceso es favorable económicamente con respecto al uso del yeso natural.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES

El fosfoyeso es un subproducto industrial de la fabricación del ácido fosfórico, en el mundo, anualmente se producen elevadas toneladas de este material y se presentan varios problemas ambientales y de almacenaje, causando contaminación de las aguas, debido a la presencia de la cantidad de impurezas presentes en él, como lo son: metales pesados, fluorosilicatos, fluoruros de hidrógenos entre otros. La adecuada disposición de este material es de suma importancia, por ello el estudio de la reutilización del fosfoyeso en la industria cementera ha sido realizado por varios investigadores.

Altum y Sert (2002), realizaron un estudio acerca de la utilización del fosfoyeso como retardador del cemento Pórtland, y establecieron “*Que el fosfoyeso puede ser empleado como retardador en lugar del yeso natural en el cemento Pórtland*”, observaron que a medida que los porcentajes de adición de fosfoyeso aumentaban, la cantidad de impurezas se incrementaban y los tiempos de fraguado aumentaban, en otros estudios realizados, también fue divulgado que los fluoruros retardaron los tiempos de fraguado.

McCrintle y sus colaboradores (2003), realizaron una comparación del funcionamiento de varios yesos sintéticos en ensayos de planta durante la fabricación del cemento Pórtland y establecieron que el cemento Pórtland producido con fosfoyeso tratado con cal; era el que menos fijaba el tiempo inicial de fraguado, a 30 minutos mas largo con respecto al promedio, del cemento que posee yeso natural.

Los investigadores Potgieter y Howell (2001), describen en esta investigación la substitución acertada del fosfoyeso por el yeso natural como fijador del fraguado

en el cemento, en donde muestran que las impurezas presentes en el fosfoyeso se pueden tratar con éxito para hacer al fosfoyeso conveniente para retardar el fraguado en el cemento, y sea su comportamiento similar al del yeso natural, debido a una reducción importante de las impurezas solubles en agua especialmente del fosfato y del fluoruro, realizando un tratamiento con cal viva (CaO) y cal apagada (Ca(OH)₂).

Por otro lado, Singh (2001), estudió al fosfoyeso tratado con una solución acuosa de ácido cítrico y luego lavado con agua para mejorar así su calidad y emplearlo en la fabricación del cemento; encontró que los cementos Pórtland y cemento Pórtland escoria, presentaban características en la resistencia a la compresión similar a éstas producidas por el yeso mineral. El investigador Tahar (2007), realizó un estudio de la “*influencia del fosfoyeso tratado térmicamente en las propiedades del cemento Pórtland escoria*”, en este estudio se sometió a diversas temperatura 200°C, 400°C y 800°C el fosfoyeso, para purificarlo y tener poca cantidad de impurezas como fosfatos, fluoruros y material orgánico y poder emplearlo en la fabricación del cemento Pórtland escoria; obteniendo como resultado que el cemento Pórtland escoria producido usando 6% de fosfoyeso tratado a 800 °C mejora sus propiedades.

Actualmente el grupo Lafarge posee dos cementeras en Venezuela, y solo la ubicada en el estado Táchira, utiliza en su proceso de fabricación de cemento el yeso sintético como regulador de fraguado. La planta Táchira se caracteriza por un proceso de fabricación por vía húmeda, sin embargo, la planta Ocumare el proceso trabaja por vía seca, por tener diferencias en el proceso de fabricación se desea estudiar la sustitución parcial o total del yeso natural, por yeso sintético, tomando en cuenta las impurezas como fosfatos, fluoruros, y material orgánico en el mismo para obtener buenos resultados en el fraguado del cemento en planta Ocumare.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1. Cemento

El cemento es un material inorgánico finamente pulverizado, que al agregarle agua ya sea solo o mezclado con arena, grava u otros materiales similares, tiene la propiedad de endurecer incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas (hidratación) y que una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad. También es considerado como un conglomerante hidráulico, ya que es un material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por transformaciones químicas en su masa que originan nuevos compuestos, por lo que se utiliza como adherente y aglutinante en la construcción. F.N.C (1995).

El cemento cuando es mezclado con agua y arena forma mortero, y cuando es mezclado con arena y piedras pequeñas forma una piedra artificial llamada concreto u hormigón. El cemento debe cumplir con las normas dictadas para tales materiales, especialmente en lo relativo a resistencia y estabilidad de volumen.

Cuando decimos cemento, implícitamente se quiere decir cemento Pórtland ó cemento a base de clinker Pórtland, ya que son los productos aglomerantes que se usa casi exclusivamente con fines estructurales. El cemento Pórtland es el producto obtenido de la pulverización del clinker Pórtland con la adición de sulfato de calcio (yeso), en donde el clinker Pórtland (trozos redondos de mayor o menor tamaño formados por la semifusión a que estuvo sometido el polvo de las materias primas iniciales) consiste esencialmente en una mezcla silicatos de calcio (dicálcicos y tricálcicos) fabricado a través de arcillas y calizas.

3.2. Clasificación

Dentro de los límites generales de composición con los cuales se obtiene el clinker, se pueden establecer algunas variantes, las cuales dan lugar a productos de características algo diferentes entre sí, que constituyen los distintos tipos de cemento, como se observa a continuación:

(a) La Norma COVENIN 28 “*Cemento Pórtland. Especificaciones*”, los clasifica como: Cemento Pórtland de uso general y cementos Pórtland de uso especial.

- **Cemento Pórtland de uso general**

Tipo I: Para ser usado en construcciones de concreto en general, cuando no se requieran las propiedades especiales correspondientes a los otros. Denominado como *la Vega Tradicional* nombre comercial que le asigna el grupo Lafarge.

- **Cemento Pórtland de uso especial**

Tipo IR: Para ser usado en construcciones de concreto donde se requieran altas resistencias mecánicas. Denominado *La Vega Ultra* nombre comercial que le asigna el grupo Lafarge.

Tipo II: Para usarse en obras expuestas a la acción moderada de los sulfatos, o donde se requiera de un calor de hidratación moderado.

Tipo III: Para usarse en construcciones que requieran resistencias mecánicas a temprana edad.

Tipo IV: Para usarse en obras donde sea necesario un bajo calor de hidratación.

Tipo V: Para usarse en construcciones que requieran alta resistencia a los sulfatos.

(b) Cemento con adiciones

Además de los cementos Pórtland, es frecuente el uso de cementos a base de clinker Pórtland y una proporción de otro material que, pueden ser activos (capacidad de reaccionar con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para dar lugar a hidrosilicatos que proporcionen un cierto valor aglomerante) como lo son las puzolanas, las escorias de altos hornos, las

cenizas volantes, entre otras o inactivos como la caliza, el cuarzo y las arenas o areniscas en conjunto con el sulfato de calcio. Gomá (1979).

A estos se le denominan cementos Pórtland con adiciones, y se clasifican según el tipo de material de adición, por ejemplo: cemento Pórtland con adición de puzolanas, cemento Pórtland con adición de cenizas volantes, y el cemento Pórtland con adición de caliza del tipo CPCA I, *La Vega Eco Plus nombre comercial que le asigna el grupo Lafarge*, es aquel cuyo contenido de caliza u otro material calcáreo es menor al 15% del peso total. La calidad de estos cementos se rige por la norma COVENIN 3134 “*Cemento Pórtland con adiciones*”.

(c) Otros cementos

Además del Pórtland, se emplean en la construcción otros tipos de cementos cuyas características de índole técnica o económica, pueden hacerlos importantes en algún tipo de obra. A continuación se cita los más conocidos:

- Cemento de albañilería o La Vega El Albañil nombre comercial que le asigna el grupo Lafarge, es un cemento formulado con un aditivo especial que favorece la retención de agua, mejorando significativamente la trabajabilidad de la mezcla, proporcionando acabados excelentes y duraderos, se emplea en mortero para frisos, pega de bloque y albañilería en general, según la norma COVENIN 3374 “Cemento de Albañilería” lo clasifica como cemento de albañilería tipo S.

- Cementos aluminosos: por un procedimiento similar al empleado para el Pórtland, aunque a temperaturas mucho más altas y cuyos componentes principales son la alúmina y la cal, se fabrica un cemento que se denomina aluminoso. Desarrolla un alto calor de hidratación, adquiere altas resistencias a temprana edad y resiste muy bien al ataque de los sulfatos, es muy útil para preparar concretos refractarios.

- Entre otros cementos se tiene los supersulfatados y de retracción controlada. Porrero, J. y otros (2004).

3.3. Calidad

La mayoría de los ensayos que se necesitan para controlar la calidad del cemento requieren el uso de aparatos muy sensibles y muy complejos. Las pruebas deben ser efectuadas en condiciones específicas de humedad y temperatura, dada la gran influencia que tienen estos parámetros sobre los resultados. Esto divide las prácticas de control del cemento en dos grupos: a) Los ensayos que suele hacer el usuario y b) los que necesariamente tiene que hacer el fabricante.

Los dos índices principales que emplea el usuario para conocer directamente la calidad del cemento son el fraguado y la resistencia mecánica. El fabricante, además de estos, debe vigilar: la composición química, la estabilidad de volumen (expansión), el grado de finura, la consistencia, la pérdida al fuego, entre otros. Estos ensayos se rigen mediante un conjunto de normas como lo son:

- Norma COVENIN 493:1992, “Cemento Pórtland. Determinación del tiempo de fraguado por la aguja de Vicat”.
- Norma COVENIN 484:1993, “Cemento Pórtland. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros con cubetas cúbicas”.
- Norma COVENIN 491:1994, “Cemento Pórtland. Determinación de la expansión en autoclave”.
- Norma COVENIN 487:1993, “Cemento Pórtland. Determinación de la finura por medio del aparato Blaine de permeabilidad”.
- Norma COVENIN 494:1994, “Cemento Pórtland. Determinación de la consistencia normal”.
- Norma COVENIN 109:1990, “Cementos hidráulicos. Métodos de ensayo para análisis químicos”.

Además del conjunto de normas de ensayos antes mencionados y que se utilizarán en el presente trabajo especial de grado, la calidad de los cementos se evalúan mediante la norma COVENIN correspondiente al tipo de cemento. Porrero, J y otros (2004).

3.4. Proceso productivo del cemento

Existen dos modalidades de operación para la fabricación del cemento, el proceso seco y el húmedo. En el proceso seco, las materias primas son trituradas y secadas para formar el crudo o harina, que tiene la forma de un polvo fluido, y en el proceso húmedo las materias primas (a menudo con un alto contenido de humedad) se muelen con agua para formar una pasta bombeable, esta se alimenta directamente al horno o previamente se pasa por secador de pasta. La elección del proceso tiene gran importancia y viene determinada por el estado de las materias primas (secas o húmedas), ya que los procesos húmedos consumen más energía y por tanto tienen un mayor costo de producción, las plantas que emplean este proceso lo suelen hacer porque solo tienen acceso a materias primas húmedas. Gomá (1979).

La planta Táchira emplea como proceso de fabricación la vía húmeda y en la Planta Ocumare se emplea el proceso por vía seca.

3.4.1 Materias primas

Para el proceso de fabricación se mezcla un componente rico en cal (componente calcáreo) y otro pobre en cal pero rico en sílice, aluminio y óxido de hierro (componente Arcilloso). Los componentes más usados para suplir estos elementos son la caliza y la arcilla. Se emplean otros productos como correctores, que son compuestos que entran en pequeñas proporciones para aumentar tan solo la cantidad del óxido deficitario en la composición, estos pueden ser: Bauxita (Al_2O_3), mineral de hierro o arcilla ferrosa (Fe_2O_3) ó arena (SiO_2). En la empresa se emplea la arcilla ferrosa como corrector, y utiliza el yeso como regulador del fraguado. Lafarge (1991).

La planta Ocumare, utiliza la caliza explotada y transportada desde tres canteras: San Bernardo, Mume, Melero ubicadas en los Valles del Tuy en zonas cercanas a la empresa. La arcilla necesaria para la fabricación del cemento es extraída de la cantera de la Cabrera ubicada en la misma empresa. F.N.C (2001)

3.4.2 Explotación y trituración de la arcilla y la caliza

Para la explotación de arcilla, el material se remueve y se transporta con una retroexcavadora que luego se carga en camiones. El recorrido que deben hacer los camiones entre la zona de explotación y la tolva receptora ubicada en los patios de almacenamiento de la empresa es de aproximadamente un kilómetro. Los yacimientos de arcilla varían ampliamente en su composición química, a veces se pueden distinguir visualmente materiales arenosos (altos en sílice) y materiales plásticos grisáceos (altos en alúmina), pero el resto de las arcillas son muy parecidas en su aspecto visual y sólo se logran distinguir a través de un análisis químico. El conocer la composición de cada terraza, permite realizar la dosificación adecuada a fin de obtener la composición química promedio deseada en la arcilla. Este es el primer paso para la prehomogeneización de la arcilla que se utilizará en la elaboración de harina cruda. La arcilla extraída de cada terraza se descarga en una tolva, pasa a una trituradora de dientes y luego a una de rodillos para reducir el tamaño de los terrones o conglomerados, de allí se lleva luego a un almacén (ver figura N°1) donde se reducen las variaciones de composición química.



Figura N° 1: Vista frontal del patio de Pre – Homogeneización de arcilla.

Las Calizas de las canteras de San Bernardo, Mume y Melero, son explotadas a cielo abierto, usando explosivos. Durante su explotación se hacen bancos o terrazas, que facilitan el avance de la explotación, el transporte y la futura reforestación. La caliza volada, es tomada por payloader y transportada en camiones hasta la zona de trituración ubicada en la misma cantera, luego de ser triturada y con un tamaño máximo de 25 mm, es enviada hasta la planta en camiones con una carga estimada

entre 34 y 36 toneladas. F.N.C (2001).

Una vez en planta se almacenan en los silos de caliza como se observa en la figura N° 10.

3.4.3 Molienda de crudo

Una vez concluida la prehomogeneización y almacenaje de las materias primas, se procede a su molienda. Estas operaciones se efectúan en forma continua mediante molinos de bolas (ver figura N° 2), con la finalidad de obtener un producto muy fino.

Al entrar al molino de crudo, los materiales se secan al ponerse en contacto con una corriente de gases calientes generados por la combustión del gas en un hogar o estufa. Una vez dentro de las cámaras de molienda ambas materias primas son molidas y mezcladas íntimamente, esto es debido al constante choque que generan los cuerpos moledores durante el giro del molino.

Existen dos molinos de crudo en la planta, estos poseen un sistema de molienda de circuito cerrado, es decir que el material grueso a la salida del molino, se devuelve para reducir aún más su tamaño. Cada sistema cuenta además con otros equipos que contribuyen al proceso de molienda, tales como: Un separador para clasificar materiales por tamaño de partículas en gruesa y finas, un ventilador de tiro para generar una corriente de aire y material a través del molino, un hogar para generar gases calientes, un filtro electrostático para el desempolvado y recuperación de los materiales más finos que son arrastrados por las corrientes de aire, un saca muestras y un sistema de transporte para llevar el producto de un equipo a otro y finalmente al silo donde será almacenado, como se ve en el flujograma del proceso (figura N° 10). El producto resultante de la molienda es un polvo muy fino de color crema, llamada harina cruda. F.N.C (2001).



Figura N° 2: Vista del molino de crudo.

3.4.4 Homogeneización.

Por ser la molienda un proceso industrial de grandes dimensiones, los equipos dosificadores presentan variaciones normales en la cantidad alimentada. De igual manera las materias primas a pesar de la prehomogeneización, presentan también pequeñas variaciones en la composición química. Esto tiene como consecuencia que la “harina cruda” producida en cada hora no tenga siempre la misma composición química y ella sólo se obtendrá con el promedio de varias horas de molienda. Por lo tanto será necesario almacenar en un silo todas esas producciones horarias y mezclarlas en continuo para su homogeneización. El silo MS, con una capacidad cercana a las 19000 toneladas de Harina Cruda, permite realizar la fluidización y homogeneización de la harina, por medio de inyección de aire en el fondo de este. La



harina luego de homogeneizada es transportada hasta los silos de almacenaje, FLS, por medio de un sistema de transporte neumático. Existe un silo para cada horno con una capacidad aproximada de 1700 ton c/u. F.N.C (2001).

Figura 3: Vista del silo MS y a la derecha los silos FLS.

3.4.5 Cocción

Durante el proceso de cocción, el material no sólo cambia en composición química sino también en aspecto físico, ya que va de un polvo crema muy fino a unos gránulos duros y oscuros. El cambio de aspecto físico se debe a la fusión parcial que sufre la harina en la zona de cocción del horno. El producto de la cocción de la harina cruda es llamado Clinker.

La línea de cocción de harina cruda de planta Ocumare se encuentra constituida básicamente por tres partes integradas, pero bien diferenciadas: Torre de ciclones o precalcinador, horno horizontal rotatorio y enfriaderas de satélite.

La torre de ciclones o precalcinador, esta formada por diez ciclones que constituyen cuatro etapas, dispuestas de la siguiente manera: Cuatro en la primera etapa; y dos en cada etapa siguiente conectados entre sí por medio de tuberías. La primera etapa se compone de dos ciclones gemelos para lograr una mejor separación y cada ciclón con su tubería forma un tramo del intercambiador, numerados del I al IV desde arriba hacia abajo (Ver Figura N° 4). Es en esta etapa donde se desarrolla la fase de descarbonatación parcial de la harina cruda, que alcanza un nivel promedio de 80%.

La transferencia de calor se realiza en los tubos ascendentes y en los ciclones, individualmente considerados. El intercambio térmico se verifica en estado de suspensión y dada la gran superficie que presenta el crudo en el intercambiador se produce una transferencia de calor muy activa.



Figura N° 4 Vista de las torres de ciclones de Horno 1 (izquierda), y Horno 2.

El horno horizontal rotatorio es una estructura cilíndrica, inclinada, de 73,15 m de longitud y 4,72 m de diámetro, revestida con ladrillo refractario para proteger la chapa y evitar las pérdidas caloríficas, que gira lentamente sobre anillos de rodaduras (llantas) y soportes (polines), a una velocidad aproximada de tres revoluciones por minuto. (Ver figura N° 5) En planta se cuentan con dos hornos rotatorios ver flujograma de proceso.



Figura N° 5: Vista de Horno 2 y sus enfriaderas de satélite

Su función es finalizar la descarbonatación de la harina procedente de la torre de ciclones y cocerla a 1450 °C para obtener Clinker. La harina introducida en él, desciende lentamente hacia la parte inferior, donde los gases calientes de la combustión elevan la temperatura hasta la fusión incipiente del material procesado (1.400 - 1.500°C). El material pasa por zonas sucesivamente más calientes hacia la llama, mientras se produce la calcinación y el intenso calor desencadena otras reacciones químicas, obteniéndose nuevos minerales sintéticos (silicatos y aluminatos) por la combinación de los óxidos de sílice, aluminio y hierro de la arcilla con el óxido de calcio de la caliza. Lafarge (1991).

Una vez que el clinker abandona el horno, pasa a través de un sistema constituido por diez enfriadores de satélite de 16 m de longitud y 1,95 m de diámetro, los cuales giran con el cilindro y poseen levantadores en su interior que favorecen el intercambio térmico entre el clinker que sale y el aire del ambiente que entra, para llevarlo de 1200 °C hasta 150 °C aproximadamente. El calor recuperado de este enfriamiento es retornado al mismo horno y al precalcinador para ahorrar energía. En

la figura N° 6, se muestra el principio del proceso que se desarrolla en el precalentador de ciclones, el flujo de materiales y el flujo de gases.

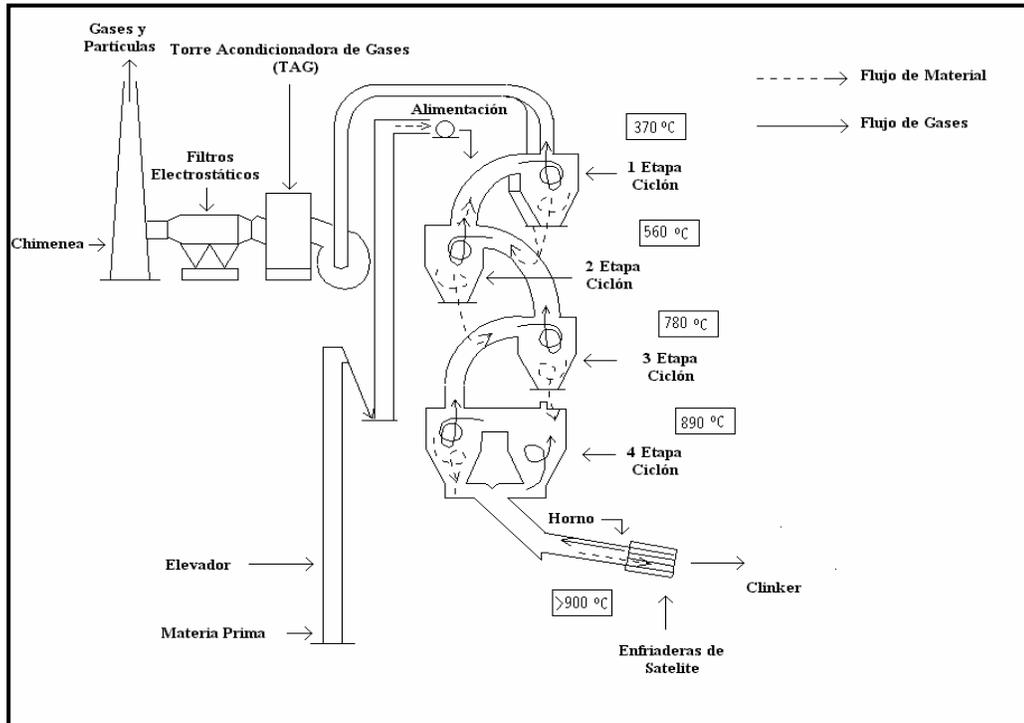


Figura N° 6: Esquema general del proceso de cocción. F.N.C (2001)

A continuación se muestra las diversas fases que constituyen el sistema de cocción.

Tabla N° 1: Fases que constituyen la etapa de la cocción. Lafarge Coppee (1991)

Fases	Temp. Formación (°C)
Deshidratación	80 – 200
Descarbonatación	700– 950
Clinkerización	1200-1450
Enfriamiento	1450-200

El clinker una vez que abandona el proceso de cocción, si se encuentra dentro de los requerimientos de calidad es almacenado en el silo de clinker de horno N° 1, o

en el almacén para el horno N° 2, si no se encuentra dentro de especificación se almacena en el silo de descarte. (Ver figura N° 10).

3.4.6 Molienda de cemento

El clinker es transportado luego hacia los molinos de cemento. Estos molinos se alimentan con clinker, yeso y caliza, las proporciones dependen del tipo de cemento que se produzca. Esta mezcla finamente molida constituye el cemento propiamente dicho, cuyas finuras dependen del tipo de cemento a producir. En la Planta de Ocumare se encuentran instalados dos molinos tubulares de bolas para la molienda del cemento. Estos son cilindros giratorios, en donde la reducción del material se realiza mediante el movimiento de cuerpos moledores, la rotación del cilindro del molino eleva los elementos de molienda a una altura óptima, lográndose una fragmentación por impacto o fricción. F.N.C (2001).

El cilindro internamente puede ser de una o varias cámaras, las cuales contienen cuerpos moledores de diferentes tamaños, las cámaras se dividen por medio de tabiques y se encuentran revestidas con blindaje o placas que permiten levantar los cuerpos moledores que al caer fragmentan el material alimentado y protegen la virola o cilindro contra el impacto de las bolas y el desgaste por fricción.

Las ranuras de los tabiques permiten el paso del material de una cámara a otra o de la segunda cámara al circuito, que dependerá de la granulometría del material como de la ventilación del molino, y humedad del material. La ventilación del molino se realiza por medio de un ventilador de tiro y el aire pasa a través de las rejillas que poseen los tabiques. En la figura N° 7 se detalla los componentes del molino

Los cuerpos moledores son bolas de acero, cuyos diámetros varían entre los 15 mm y los 90mm según el tamaño de la materia de alimentación, para la molienda de gruesos se utilizan bolas entre 50 mm y los 90mm y para los finos entre 50 mm y 15 mm. F.N.C (1996).

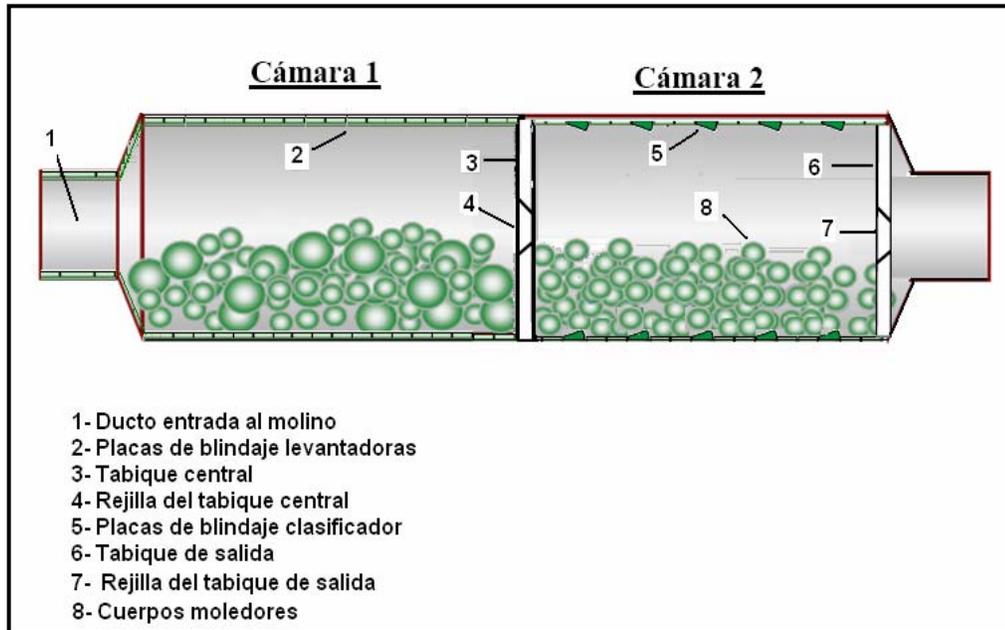


Figura N° 7: Componentes que conforman a un molino. F:N:C (1996).

Los equipos adicionales que contribuyen a la molienda son similares a los de los molinos de crudo, a excepción del hogar en vista que no se necesita de secado sino de enfriamiento, y se realiza por medio de inyección de agua interna en la entrada y en la salida del molino, para mantener la temperatura en un punto donde no provoque la deshidratación del yeso, posee un ventilador de tiro para generar una corriente de aire y material a través del molino, y ayuda al enfriamiento del material, un filtro electrostático para el desempolvado y recuperación de los materiales más finos que son arrastrados por las corrientes de aire, un sistema de transporte para llevar el producto de un equipo a otro y finalmente al silo donde será almacenado.

El transporte del cemento hacia los silos se realiza a través de un sistema mecánico (cinta transportadora – elevador).

Existen dos tipos de molienda los cuales son de circuito abierto y cerrado. El molino cemento N°1 es de circuito abierto, por lo que el material sale del molino con la finura requerida. Este sistema no posee separador su producción es menor y el

consumo de energía por tonelada de material, es mayor, el producto final es la suma del material que sale del molino más el captado por el filtro, en la figura N° 8 se muestra un esquema del circuito abierto. F.N.C (1995).

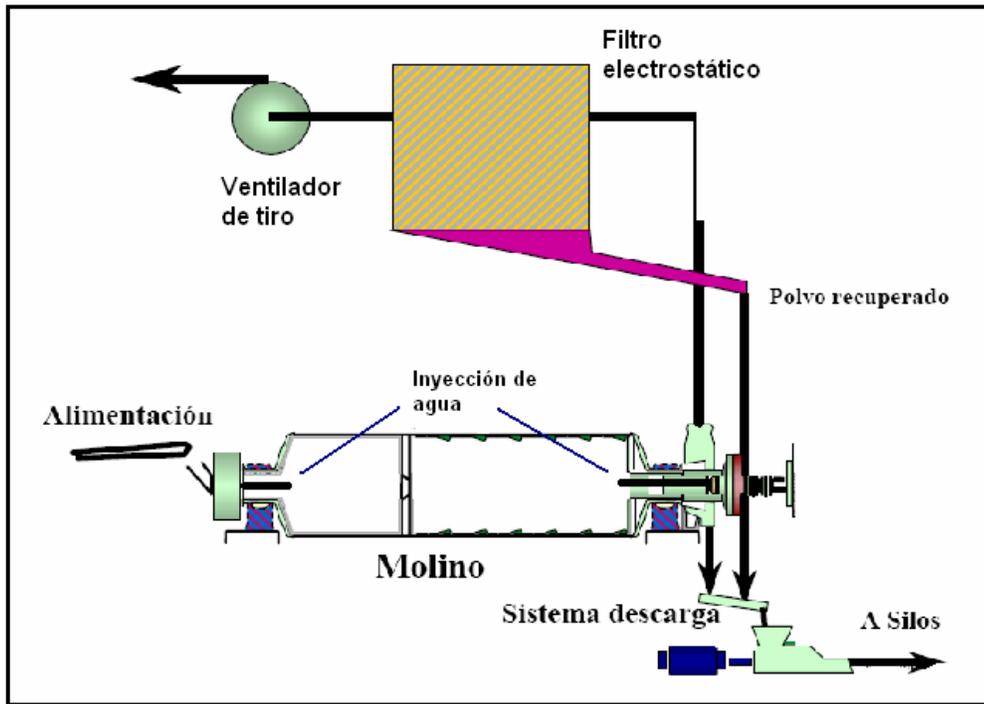


Figura N° 8: Esquema del sistema de molienda de circuito abierto. F.N.C (1995).

El sistema del molino de cemento N° 2 es de circuito cerrado (ver figura N° 9), posee dos separadores para tener un mayor control y mayor eficiencia en la clasificación del producto terminado, este es la suma del fino del separador, más el captado por el filtro; se diferencia del circuito abierto, por el retorno del material grueso del separador al molino. F.N.C (1995).

A continuación se muestra un esquema general del sistema de circuito cerrado.

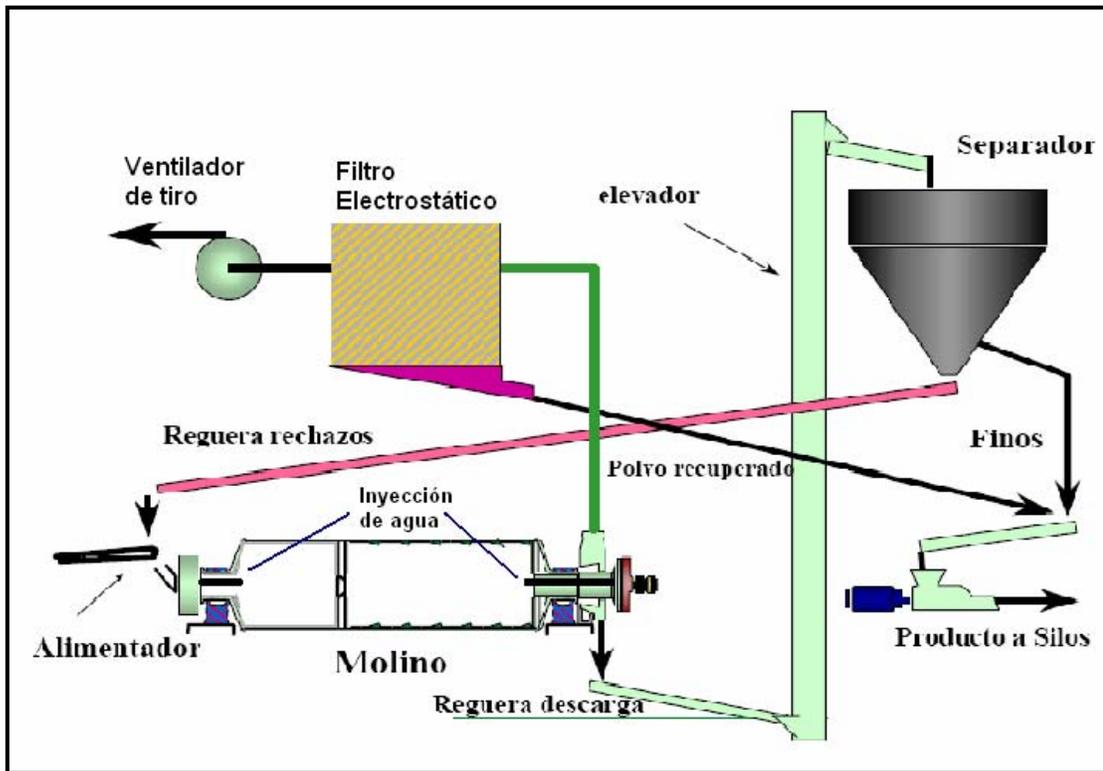


Figura N° 9: Esquema de sistema de molienda de circuito cerrado F.N.C (1995).

En la molienda del cemento se sigue un riguroso control en la calidad. Cada 2 horas se toma muestras de los sacamuestras para determinar el nivel de cal libre, las finuras, la superficie Blaine, el fraguado, las pérdidas al fuego y los niveles de SO_3 . El cemento producido se envía a tres silos de almacenaje cuya capacidad total es de 17000 toneladas. (Ver figura N° 10).

El cemento almacenado en los tres silos se despacha tanto a granel, como en sacos, el cemento despachado en saco primero es paletizado como se detalla en el siguiente flujograma del proceso:

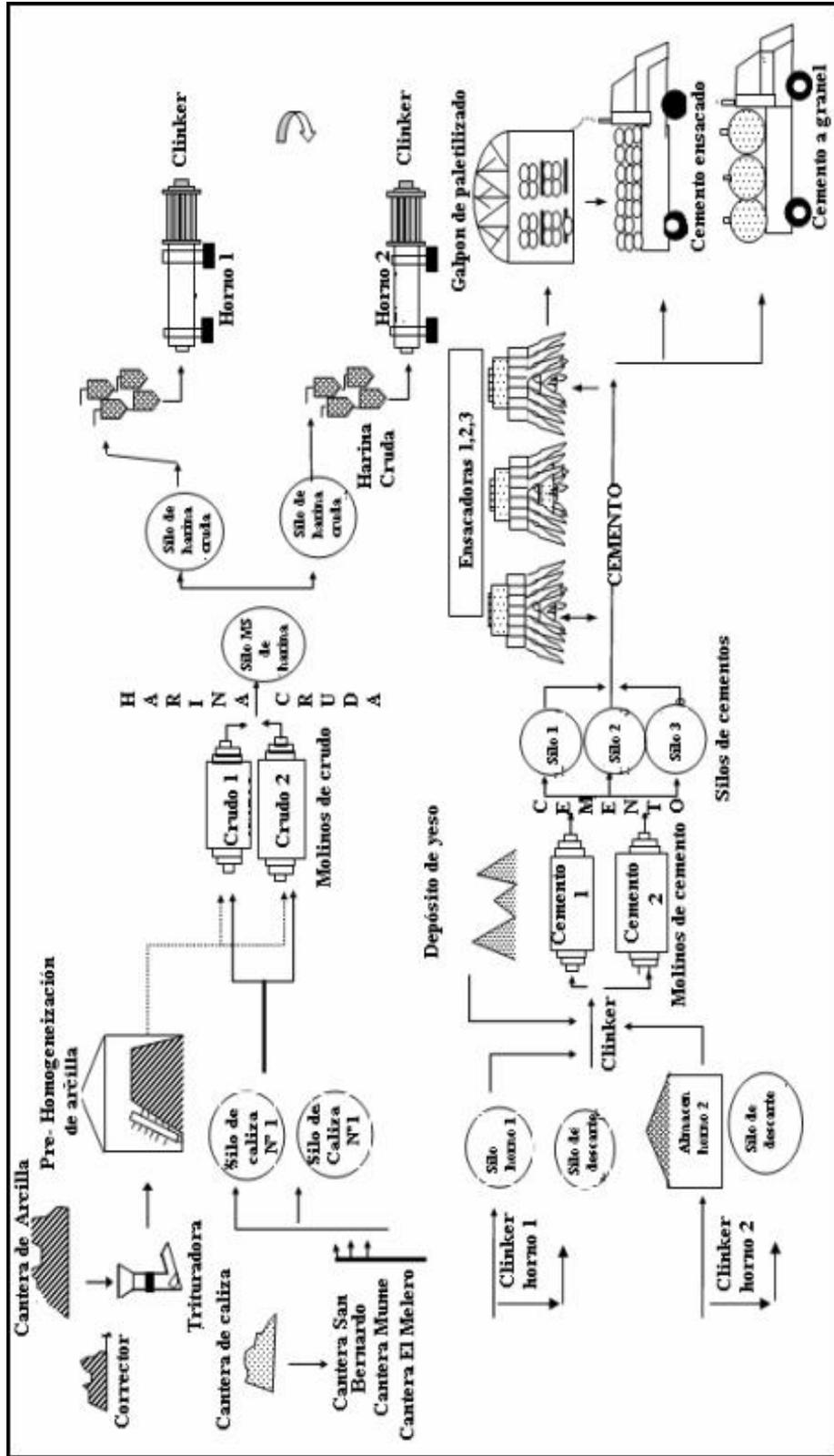


Figura N° 10: Flujograma del proceso de fabricación del cemento. F.N.C (2001).

3.5. Composición química.

Las materias primas sufren diversas transformaciones químicas durante el proceso. Estos cambios permiten producir Clinker para cemento Pórtland a partir de caliza y arcilla. A continuación se listan los materiales básicos involucrados en la producción de cemento, así como sus principales constituyentes:

Tabla N°2: Principales constituyentes químicos de la materia prima F.N.C (2001).

Material	Principales constituyentes químicos	Fórmula química de los constituyentes
Caliza	Carbonato de calcio	($CaCO_3$)
	Humedad	(H_2O)
	Carbonato de magnesio	($MgCO_3$)
Arcilla	Oxido de Sílice	(SiO_2)
	Óxido de Hierro	(Fe_2O_3)
	Óxido de Aluminio	(Al_2O_3)
	Humedad	(H_2O)
	Álcalis: Óxido de potasio	(K_2O)
	Álcalis: Óxido de sodio	(Na_2O)
Arcilla ferrosa	Oxido de Hierro	(Fe_2O_3)
Yeso	Sulfato de calcio dihidratado	($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)

La nomenclatura usual de estos compuestos a nivel internacional sobre el cemento Pórtland, consiste en sustituir las fórmulas de los óxidos fundamentales CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , por las letras mayúsculas C, S, A y F respectivamente indicando su relación molar con un coeficiente numérico como subíndice, igualmente ocurre para el agua y el trióxido de azufre que se denotan como H y \bar{S} . Fritz (1973).

En la siguiente tabla se muestra los principales constituyentes químicos de los productos intermedios.

Tabla N°3: Principales constituyentes químicos de los productos intermedios

Material	Principales constituyentes químicos	Fórmula química de los constituyentes
Harina cruda	Carbonato de calcio	(CaCO ₃)
	Óxido de Sílice	(SiO ₂)
	Óxido de Hierro	(Fe ₂ O ₃)
	Óxido de Aluminio	(Al ₂ O ₃)
Harina descarbonatada	Óxido de calcio	CaO
	Óxido de Sílice	(SiO ₂)
	Óxido de Hierro	(Fe ₂ O ₃)
	Óxido de Aluminio	(Al ₂ O ₃)

A continuación se muestra los principales minerales constituyentes del clinker

Tabla N° 4: Principales minerales constituyentes del clinker

Mineral	Fórmula Química	Fórmula Cementera	Temp. Formación (°C)
Aluminato Tricálcico (Celita)	(CaO) ₃ Al ₂ O ₃	C ₃ A	1260 – 1338
AluminoferritoTetracálcico (Felita)	(CaO) ₄ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	1260 – 1338
Silicato Bicálcico (Belita)	(CaO) ₂ SiO ₂	C ₂ S	1338 – 1420
Silicato Tricálcico (Alita)	(CaO) ₂ SiO ₂	C ₃ S	A partir de 1420

A continuación se muestra las propiedades de los principales constituyentes del Clinker

Tabla N° 5: Propiedades principales de los constituyentes del clinker. Porrero J. y otros (2004).

Componentes	Propiedades
C ₃ S	<ul style="list-style-type: none"> • Hidratación rápida. • Altas resistencias iniciales • Alto calor de hidratación.
C ₂ S	<ul style="list-style-type: none"> • Hidratación lenta • Desarrollo lento de resistencias • Moderado calor de hidratación
C ₃ A	<ul style="list-style-type: none"> • Hidratación rápida. • Muy alto calor de hidratación • Poca contribución en las resistencias finales, proporciona resistencias tempranas.
C ₄ AF	<ul style="list-style-type: none"> • Hidratación lenta. • Calor de hidratación moderado • Poca contribución a las resistencias del cemento.

En la figura N° 11 se describe la resistencia a la compresión de las 4 fases del clinker y muestra hasta la edad de 360 días la alta resistencia inicial del C₃S puro, el lento pero regular desarrollo de la resistencia del C₂S y las mínimas contribuciones de las fases C₃A y C₄AF sobre las resistencias. Fritz (1973)

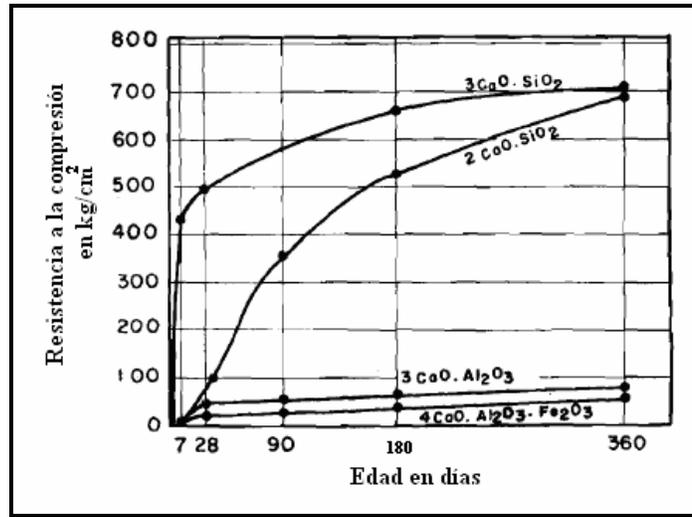


Figura N ° 11: Desarrollo de la resistencia a la compresión de los minerales que constituyen el clinker. CZernin (1963).

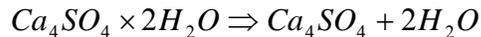
3.6. Estabilidad térmica de los sulfatos durante la molienda.

En un molino de cemento, el yeso se descompone perdiendo sus moléculas de agua a 120°C, dependiendo de la atmósfera en donde se encuentre:

- a) En atmósfera húmeda (presencia de vapor de agua), el yeso se va a deshidratar parcialmente para formar el hemidrato, perdiendo 1,5 moléculas de agua.



- b) En atmósfera seca, la deshidratación es directa y conduce a anhidrita



Este último compuesto es muy ávido de agua y puede, en atmósfera normal, transformarse espontáneamente en hemidrato. Durante la molienda, el yeso puede disminuir y habitualmente debe disminuir, como consecuencia de las temperaturas que se dan y que llevan a su deshidratación. Variaciones de temperaturas de molienda (Temperatura del clinker), van tener repercusiones notables en las cualidades y cantidades respectivas de las fases de sulfato cálcico (yeso- hemidrato) a la salida del molino.

Las reactividades (nivel de solubilidad) de las diferentes formas de sulfatos son muy diferentes y pueden tener un impacto grande en las reacciones de hidratación, en su reología, fraguado y resistencias. El hemidrato es más activo, seguido del yeso y por último la anhidrita a temperaturas superiores de 40°C, Como se observa en la siguiente figura.

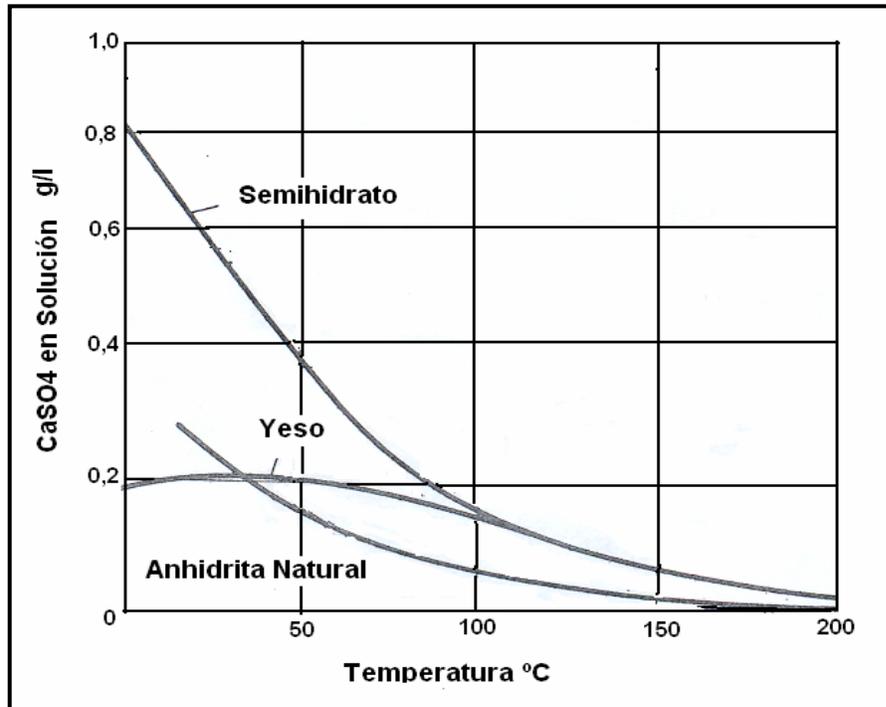


Figura N° 12: Solubilidad en agua de los distintos tipos de sulfato de calcio. Fritz (1973).

3.7. Hidratación.

Cuando se mezcla el polvo de cemento con agua, ésta disuelve las superficies de los minerales presentes y se combina con ellos en forma de hidratos que precipitan en la solución. Estos hidratos se forman a partir de minerales anhidros iniciales. Toda hidratación se va a regir por las cantidades y velocidades de disolución de los componentes del cemento, y por la precipitación de los hidratos formados en el agua.

La hidratación es necesaria para controlar el fraguado del cemento, adicionar el sulfato cálcico que, formando alrededor del C₃A una estringita bloqueante, anule el

fraguado rápido, permitiendo una buena hidratación de los silicatos y la obtención de buenas resistencias. Lafarge (2001).

3.7.1 Reacciones químicas

En contacto con el agua, las fases anhidras del clinker reaccionan según un proceso químico exotérmico para formar las fases hidratadas. La hidratación del cemento se realiza según las siguientes ecuaciones:

(a) Los silicatos Cálcidos

La alita se hidrata formando un silicato de calcio hidratado mal cristalizado, aparentando a un gel $C_{1,5}SH_{1,5}$. Los coeficientes 1,5 no son perfectamente definidos y pueden variar de un clinker a otro, por ello se habla, más comúnmente de CSH sin precisar los índices.

La formación de los CSH, más pobres en cal que el silicato cálcico de partida, libera iones Ca^{++} que precipitan en forma de Portlandita CH. Como se muestra a continuación:



La belita se hidrata de la misma forma que la alita, más lentamente y formando una cantidad de Portlandita inferior:



(b) Los aluminatos cálcicos

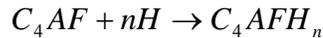
- En ausencia de sulfato cálcico

El C_3A se hidrata combinándose con los iones calcio presentes en el medio (calcio procedente de la cal libre, del C_3S , del C_2S), para formar un aluminato cálcico hidratado:



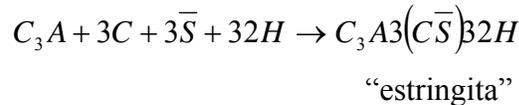
Donde n puede variar de 11 a 15, esta reacción es muy rápida y fuertemente exotérmica.

El C₄AF se hidrata de una forma análoga al C₃A pero más lentamente.

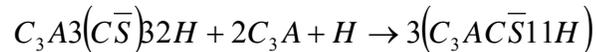


- En presencia de sulfato cálcico

El C₃A reacciona rápidamente con la cal y los sulfatos presentes en el agua para formar la estringita (trisulfoaluminato de calcio hidratado)



Mientras los iones sulfatos se consumen, la estringita es susceptible de reaccionar con el C₃A sobrante de manera que puede formarse el monosulfoaluminato de calcio hidratado.



La hidratación del C₄AF (o más exactamente de la solución de C₂A- C₂F) es análoga al del C₃A, pero se efectúa más lentamente. Los hidratos formados son de la misma naturaleza, el hierro se inserta en las redes cristalinas en sustitución del aluminio.

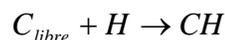


(c) La cal libre:

En contacto con el agua, la cal libre se hidrata. Es una reacción lenta. Que se efectúa con aumento de volumen de los sólidos, y donde la velocidad varía en función del grado de cocción del clinker.

En cocción normal, la cal es reactiva, la hidratación de la cal libre se efectúa rápidamente en fase plástica, no se observa desorden relacionado con expansión.

En un clinker sobre cocido, la cal es poco activa, la hidratación es lenta en fase endurecida y hay riesgo de expansión destructor que crece con el contenido en cal libre presente.



La formación de hidratos de la pasta de cemento asegura la cohesión del sistema y conduce a la adquisición de resistencias mecánicas. Cada uno de los hidratos formados no tiene el mismo impacto en las resistencias.

Los CHS aseguran lo esencial de la cohesión y son mayoritariamente responsables de las resistencias mecánicas de la pasta de cemento endurecido. Lafarge (2001).

3.7.2 Papel que desempeñan los sulfatos

El sulfato de calcio adicionado al clinker juega el papel de regulador del fraguado y endurecimiento. En efecto, su presencia es necesaria para permitir una neutralización a muy corto plazo (algunas docenas de segundos), de los aluminatos presentes. Sin el sulfato cálcico, el clinker presentaría un endurecimiento instantáneo que lo volvería inutilizable. Y no produciría más que resistencias mecánicas muy pequeñas.

El C_3S con un grado de finura análogo al del cemento tarda en fraguar, sin ninguna sustancia retardante, unas 3 horas y media, y el C_2S unas 4 horas y media. En cambio, el clinker Pórtland con una finura análoga lo hace en pocos segundos.

Esta diferencia se debe a la presencia en él de los C_3A y de C_4AF , que poseen una velocidad de hidratación mucho mayor, el C_3A lo realiza en 11 minutos y el C_4AF lo realiza en 21 minutos. Mediante la adición de yeso se consigue retrasar este tiempo, a por lo menos unos 45 minutos, tiempo necesario para situar al hormigón en obra y darle la forma requerida antes de su definitivo endurecimiento. Lafarge (2001).

La influencia del sulfato de calcio se puede explicar por reacciones de hidratación como se muestra a continuación:

(a) Hidratación sin la adición de sulfatos

En el amasado del clinker con agua, se observa inmediatamente un endurecimiento de la pasta acompañada de un importante aporte de calor.

La adquisición y el desarrollo de las resistencias se ven perturbadas y evolucionan lentamente.

De hecho en contacto con el agua:

- Una pequeña cantidad de cal proveniente de los C_3S y de la cal libre pasa a solución.
- El C_3A del cemento Pórtland se hidrata inmediatamente, lo que se traduce en:
 - La formación de C_4AH_n en la suspensión cementante o en la superficie de los aluminatos.
 - El sedimento de C_4AH_n en las fases de los Silicatos, bloquea la hidratación del C_3S , el fraguado se perturba y las resistencias se alteran.

Estas reacciones y sus consecuencias, pueden esquematizarse en la siguiente

figura:

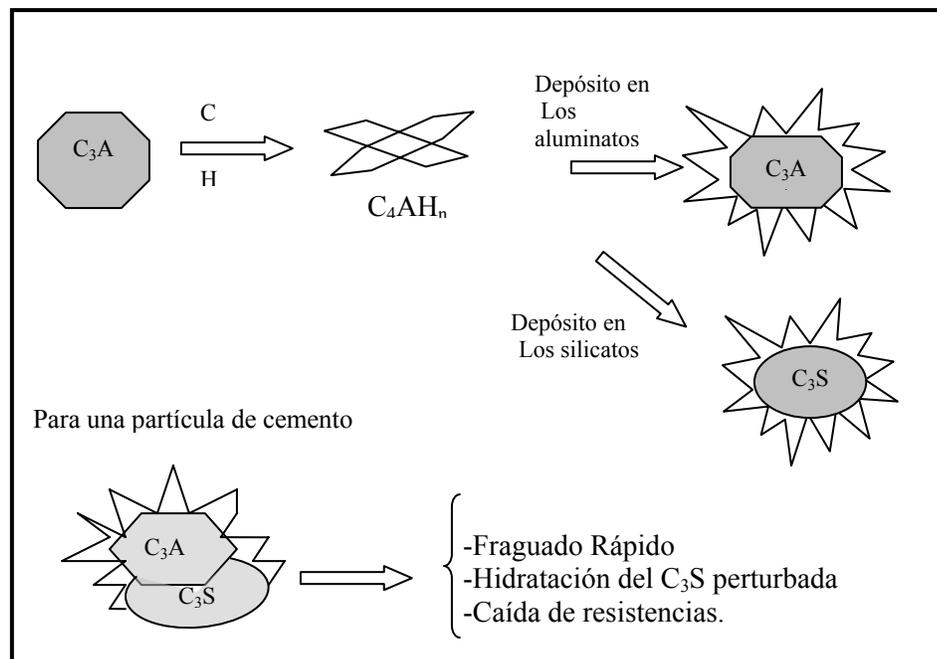


Figura N° 13: Esquema de la hidratación sin la adición de los sulfatos. Lafarge (2001).

(b) Hidratación en presencia de sulfatos de calcio.

Para evitar estos inconvenientes, es necesario neutralizar la hidratación de los aluminatos, por medio de la reacción de estos con los sulfatos y la cal, que van a formar una barrera continua de estringita en forma de concha e impermeable en la superficie del C_3A . (estringita bolqueante). Lafarge (2001).

Esto se puede esquematizar como se indica en la figura adjunta.

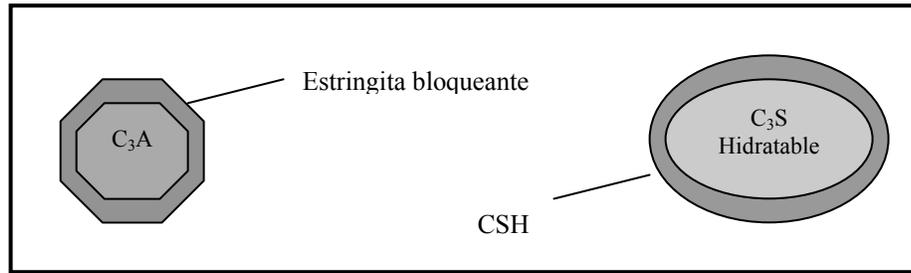


Figura N° 14: Esquema de la hidratación con adición de sulfato de calcio. Lafarge (2001).

Para que el mecanismo descrito anteriormente se desarrolle correctamente:

- El sulfato de calcio tiene que ser activo, es decir, que los iones sulfatos y los iones calcio, pasen muy rápidamente a solución y se encuentren junto al C_3A .
- El C_3A se encuentre igualmente activo.

Si esto no ocurre, seguido de:

- De la utilización de sulfatos pocos activos (se solubilizan muy lentamente: anhidrita, yeso demasiado grueso o falta de hemidrato).
- La presencia de un C_3A poco reactivo (Desactivado por absorción de adiciones orgánicas).
- Falta de iones Ca^{++} (falta de cal libre, o demasiado potasio en solución que baja la solubilidad del calcio).

La estringita se forma lentamente al contacto o en las proximidades del C_3A (en solución) en forma de agujas entremezcladas, en manera continua: esta es la estringita no bloqueante. La formación de este tipo de estringita conduce a un espesamiento de la pasta, aumentado por la formación eventual de aluminatos de calcio hidratados. Lafarge (2001).

Cabe destacar que:

- La cantidad de estringita bloqueante necesaria es función de la superficie del C_3A en contacto con el agua, es decir, en función de la cantidad del C_3A y de la finura del clinker.

- Cuanto más finas sean las partículas, mayor será la superficie del clinker (del C_3A) en contacto con el agua.
- Un clinker rico en C_3A y muy fino demanda pues, en los primeros instantes de la hidratación, más sulfatos que un clinker menos fino y pobre en C_3A .

3.8. Sulfatado óptimo o concentración óptima

Cuando se aumenta progresivamente el contenido de yeso en el cemento, se va observando un aumento regular de las resistencias. Se pueden proponer tres razones para explicar este tipo de resultado:

- (a) Aumento progresivo de la formación de estringita en forma de concha, desaparición del endurecimiento por aluminato, mejora de la puesta en obra del mortero y de la hidratación de los silicatos, aumento de las resistencias.
- (b) Aumento progresivo del contenido de estringita cristalina formada a medio y largo plazo (sulfoaluminato hidratado), que participa mejor en las resistencias que los aluminatos hidratados.
- (c) Por último el sulfato cálcico sería un acelerador de la hidratación del C_3S , de ahí el aumento de las resistencias.

Pero si se continúa aumentando el porcentaje de yeso introducido en el cemento, se tienen tres efectos:

- (a) Se reducen los contenidos de materia activa del cemento (% silicatos y aluminatos)
- (b) Se generan riesgos de expansión que perturban las resistencias (demasiada estringita en agujas, en particular en el caso de % C_3A elevado).
- (c) Se modifica la calidad de los CSH formados que no están tan bien unidos entre ellos, dando resistencias menores.

Esto explicaría que al aumentar progresivamente el contenido de sulfato de calcio en un cemento, se obtiene un aumento de las resistencias, después pasa por un máximo y un descenso de las resistencias.

La determinación experimental de este máximo se llama “determinación del sulfatado óptimo” que permite:

- (a) Obtener una buena trabajabilidad y una hidratación normal de los silicatos.
- (b) Obtener las mejores resistencias mecánicas posibles al plazo deseado.

Este óptimo, definido por: % de sulfato en el cemento es igual a la suma del % de sulfato de calcio adicionado y el % de sulfato en el clinker, y depende de:

- (a) Del clinker, el % de C_3A y C_4AF , % de álcalis en forma de sulfatos.

De la finura del cemento.

- (b) De la reactividad de los sulfatos adicionados.

- (c) Del plazo de ensayo de las resistencias (aumenta generalmente con la edad).

Lafarge (2001).

3.9. Finura

La finura se define como la medida o tamaño de las partículas que componen el cemento, se expresa en $cm^2/gr.$ o $m^2/Kg.$ lo cual se denomina superficie específica.

La superficie específica de las diferentes materias son muy variables; la del cemento esta comprendida entre 2500 y 4500 $cm^2/g.$ Precisemos, sin embargo, que la superficie así definida no es la superficie real ya que los métodos que permiten obtenerla no tienen en cuenta mas que de un modo imperfecto las fisuras que existen en la superficie de los granos. La superficie medida proporciona así una referencia útil, elemento importante en el control de fabricación.

El método de medida de la superficie específica mas corrientemente usado es el permeabilímetro Blaine (ver figura N° 15) consiste en determinar la velocidad de paso de una corriente de aire a través de un bloque de polvo. Los granos de cemento cuyo tamaño va de 2 a 200 μ , aproximadamente, son suficientemente gruesos para que los huecos que ellos dejan entre sí sean superiores al recorrido libre de las moléculas de aire. La empresa utiliza otro método para medir la finura que es por medio de tamices, cuyo tamaño de abertura del tamiz 325 es de 45μ y el tamiz 200 es de 75μ , se toma en consideración es el porcentaje de material retenido en dichos tamices. Porrero y otros (2004).



Figura N° 15: Fotografía del permeabilímetro Blaine

3.10. Consistencia normal

La consistencia normal expresa la relación entre la cantidad de agua en volumen (ml) y la masa de cemento necesaria para preparar una pasta normalizada. Se considera una pasta normalizada cuando la sonda del aparato Vicat (ver Figura N° 16) logra penetrarla (10 ± 1) mm en 30 seg. Esta cantidad de agua añadida es considerada como la óptima para la hidratación. La consistencia se calcula mediante la siguiente expresión. Lafarge (2001).

$$CN = \frac{V * 100}{M}$$

Donde:

C.N. = Consistencia Normal, (%).

V = Volumen de agua añadida a la mezcla, (ml).

M = Masa de cemento, (g).

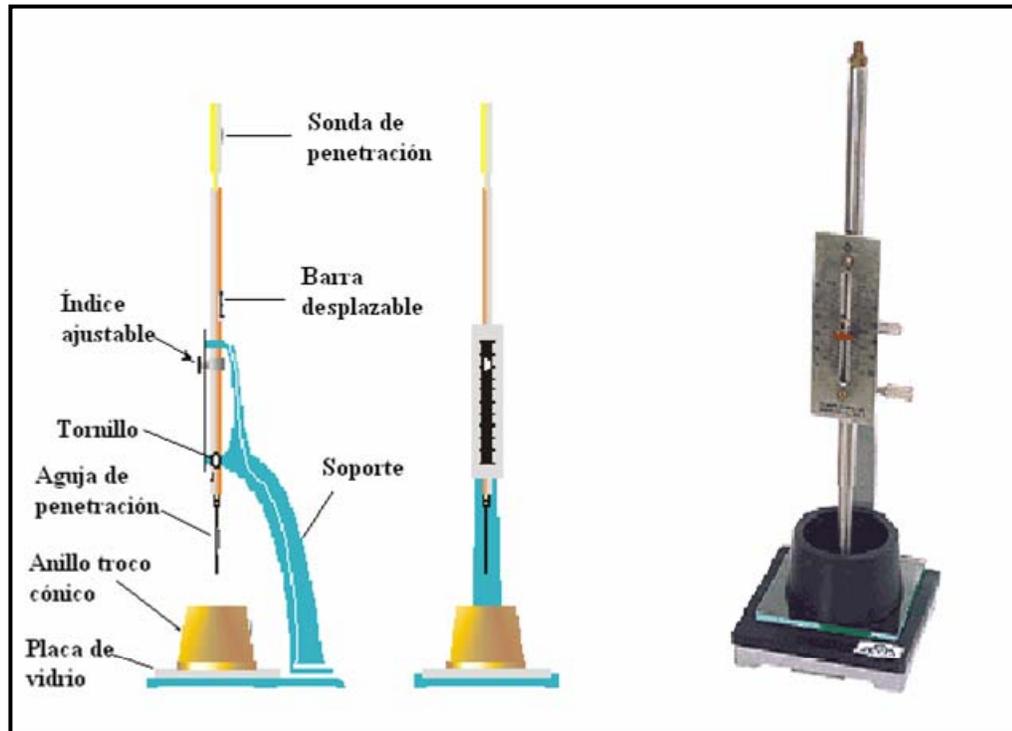


Figura N° 16: Partes que conforman al aparato Vicat a la izquierda y a la derecha fotografía del equipo.

3.11. Fraguado

Es el paso de un estado líquido o pastoso a un estado sólido. Para el Pórtland, esta transformación puede explicarse como sigue:

Durante la hidratación, las formaciones de Portlandita, de estringita no bloqueante y sobre todo de CSH, desarrollan en la pasta una red de cristalitas, más y más enredadas, entonces los puentes hidrato- anhidros contribuyen a incrementar la viscosidad.

La pasta adquiere entonces una cierta cohesión que va aumentando durante la formación de los hidratos, endurece y se vuelve más y más resistente.

El fraguado puede ser definido por un estado de consistencia ligado al carácter de irreversibilidad de los enlaces entre las partículas. F.N.C (1993).

Los tiempos inicial y final de fraguado son medidos usando el aparato Vicat (ver figura N° 16) por medio de la aguja de penetración.

3.11.1 Parámetros que influyen en el fraguado

Son de naturaleza física (amasado, finura, demanda de agua, temperatura, meteorización) o química (C_3S , C_3A , cal libre, álcalis, sulfatos, aditivos).

• Parámetros físicos

(a) Amasado: Un amasado muy energético tiende a acelerar las reacciones de hidratación, reduciendo el tiempo de fraguado. Si se compara una amasada normal con uno normalizado (donde los tiempos de mezclados no varían), esta aceleración se encuentra a nivel de resistencias iniciales, después se detiene a plazos largos.

Varias hipótesis pueden explicar este efecto:

- Desaglomeración/ defloculación de las partículas de cemento implica mayor superficie de reacción.
- Fragmentación y diseminación de los primeros hidratos formados, implica la formación de otros hidratos y así sucesivamente.
- Fragmentación de las partículas de cemento, implica nuevas superficies formadas muy reactivas.

(b) Finura del cemento: Influye favorablemente sobre el tiempo de fraguado, lo que es completamente lógico en la medida que cuando la finura del cemento aumenta, la cantidad de finas partículas rápidamente hidratables aumenta y mayor será la superficie del cemento en contacto con el agua

(c) Consistencia: Se define como la cantidad de agua necesaria para la obtención de la pasta de consistencia normal y que conduce al tiempo de fraguado del cemento. A medida que aumenta la cantidad de agua el tiempo de fraguado aumenta, y si disminuye, el tiempo de fraguado disminuye. No obstante, la evolución del tiempo de fraguado en función de la cantidad de agua no es una constante y depende de la naturaleza del cemento.

(d) Temperatura: La temperatura es uno de los parámetros fundamentales que gobiernan las cinéticas químicas. La hidratación del cemento no escapa a esta regla.

Cuando más altas es la temperatura, se acelera más la reacción de hidratación. Por el contrario, si las temperaturas son bajas, será poco auto acelerante, y su fraguado estará muy retardado.

En los ensayos de laboratorio, la temperatura está fijada por las normas, de manera que si se espera algún impacto, se debe pensar realizar los fraguados a diferentes temperaturas para estimar la sensibilidad de un producto a este parámetro.

(e) Meteorización: El contacto con el agua o una atmósfera húmeda es susceptible de alterar la reactividad de los aluminatos, formar estringita, o prehidratar los silicatos.

Algunas muestras, fuertemente meteorizadas, han mostrado una aceleración del fraguado. Esto se debe probablemente a la presencia de algunos hidratos formados durante esta “meteorización”. En efecto, la existencia de hidratos en el cemento permitirá una aceleración de las reacciones, favoreciendo la precipitación de nuevos hidratos a partir de los iones en solución. Lafarge (2001).

Parámetros Químicos

(a) Fases del clinker: Los silicatos y los aluminatos no tienen un impacto muy marcado en el fraguado del cemento. Dicho de otra forma, pequeñas variaciones en estos elementos, no tienen generalmente modificaciones importantes sobre el fraguado, sin embargo, pueden observarse fraguados más cortos cuando se utilizan cementos ricos en C_3A y C_3S ya que su hidratación puede acelerarse por la cal libre del clinker.

(b) Sulfatos adicionados en la molienda: Los sulfatos pueden modificar sensiblemente el fraguado si la cantidad incorporada es muy alta o muy poca y su naturaleza (reactivos lentos), los llevan a situarse en los límites de aparición de fraguado rápido por aluminato o falso fraguado por yeso.

(c) Cal libre en el clinker: se ha observado que el aumento de la cal libre en el clinker reduce en promedio el fraguado en 55 minutos. Se tiene que la cal apagada ($Ca(OH)_2$)

es dos a tres veces más acelerante que la cal viva (CaO), por lo que la cal libre en forma de cal apagada en el clinker tiene un efecto acelerante.

(d) Elementos minoritarios: Algunos elementos del cemento o algunos aditivos pueden ser retardantes o acelerantes del fraguado en hasta una hora para muy pequeños porcentajes.

Un compuesto acelerante reacciona en las superficies de algunas fases del clinker, para formar con alguno de los elementos de esta fase un complejo más soluble en agua, el elemento original se libera en solución. El papel del aditivo es en este caso, el de activar el paso a solución de las fases sólidas. Entre los acelerantes se pueden citar: los cloruros (de calcio en particular), las sales de litio y los silicatos de sodio.

Por el contrario, los agentes retardantes no favorecen el paso a solución de los iones necesarios en la formación de los hidratos. Estos elementos pueden ser aportados por: materias primas, combustibles naturales o secundarios, por algunos aditivos destinados a modificar el fraguado.

Entre los elementos retardadores se pueden citar:

- Minoritarios con efecto retardador: El flúor puede ser un poderoso retardador del fraguado: 0,1% de flúor en el clinker puede aumentar 40 minutos el fraguado, con menos de 0,5 % de P_2O_5 en el clinker, puede ser retardador, por encima de este valor siempre es retardador.
- Adicionados al cemento: En forma soluble el zinc y el fósforo son retardadores eficaces, otros tipos de retardadores están los boratos, azúcares, y los productos orgánicos.

Sustancias destinadas a otras funciones pueden tener un efecto retardante o acelerante como lo son: agentes de molienda, reductores de agua.

3.11.2 Tipos de fraguado

(a) fraguado rápido o fraguado por aluminato.

Se caracteriza por un endurecimiento inmediato, e irreversible incluso por amasado adicional, acompañado de un calentamiento importante. La trabajabilidad se ve irreversiblemente alterada, y las resistencias mecánicas fuertemente afectadas.

El endurecimiento se debe a la formación de aluminatos cálcicos hidratados: C_4AH_n en razón de la insuficiencia de sulfato cálcico en solución. Estos aluminatos o silico aluminatos hidratados, que se forman alrededor de las fases de silicatos, principalmente C_3S , retardan su hidratación.

Es el caso típico que se encuentra cuando el sulfatado ha sido insuficiente (déficit de sulfato en el molino), o bien cuando la reactividad del sulfato utilizado es menor con relación a la de los aluminatos (empleo de anhidrita junto a un C_3A muy reactiva).

Las soluciones que se pueden aportar a este tipo de comportamiento son:

- Un aumento de nivel de sulfato en el cemento, si se juzga que su velocidad de paso a solución es suficiente.
- Un aumento de la reactividad de los sulfatos de calcio aportados: yeso en lugar de anhidrita, o hemidrato en sustitución de yeso (con una temperatura de molienda más elevada, por ejemplo). Lafarge (2001).

(b) Falso fraguado por yeso

Se caracteriza por un endurecimiento rápido con un ligero calentamiento durante los primeros minutos de hidratación. La pérdida de trabajabilidad que resulta puede algunas veces neutralizarse continuando con el amasado, teniendo entonces una reología correcta. Este tipo de falso fraguado no lleva, en principio, a una caída de las resistencias.

El falso fraguado es debido a un exceso de iones sulfatos y calcio en solución, que no encuentran contrapartida en aluminatos, precipitando en forma de yeso cristalizado.

Hay que indicar que en este caso, el bloqueo del C_3A se realiza en forma eficaz (si su reactividad es suficiente) y la hidratación de los silicatos no se altera.

El falso fraguado por yeso se produce si la cantidad de sulfato, del tipo hemidrato, en el cemento es excesiva. Es el caso en que la molienda se realiza a muy alta temperatura, lo que lleva a una deshidratación importante del yeso.

Las soluciones consisten esencialmente en bajar el contenido de sulfatos muy reactivos (hemidrato) aumentando los sulfatos menos reactivos como el yeso. Se evitará la deshidratación durante la molienda o ensilado, o se utilizará anhidrita.

El falso fraguado por yeso es un fenómeno que se puede pasar desapercibido en la preparación del hormigón, en la medida en que las agujas de yeso precipitan rápidamente y son destruidas poco a poco. Este no siempre es el caso, ya que el yeso puede precipitar durante cerca de una hora. Lafarge (2001).

3.12. Resistencias

Existen diferentes factores que influyen en las resistencias de morteros y hormigones, relacionados con la calidad del clinker y con la molienda de cemento.

(a) Composición del clinker.

- Silicato tricálcico (C_3S): Un porcentaje alto de alita tiene una influencia favorable y notable en las resistencias del cemento a cualquier plazo.
- Silicato dicálcico (C_2S): Contribuye a las resistencias mecánicas a partir de los 7 días.
- Aluminato tricálcico y el ferroaluminato tetracálcico (C_3A y C_4AF): contribuye muy poco con las resistencias mecánicas.
- Alcalis: No tienen influencia en las resistencias iniciales, pero deterioran las resistencias a 28 días.
- Trióxido de azufre (SO_3): Favorece al aumento de resistencias iniciales (1 y 2 días), sin embargo un fuerte exceso de SO_3 degrada la molturabilidad del clinker sin mejora de las resistencias.
- Óxido de magnesio (MgO): Disminuye las resistencias a corto y largo plazo.

- Pentaóxido de difósforo (P_2O_5): Cuando el contenido es superior a 0,5 %, la cinética de adquisición de resistencias se retardan.
- Zinc (Zn): si el contenido es superior a 0,5%, la cinética de adquisición de resistencias se retarda.
- Cloro (Cl): Favorece a las resistencias iniciales, pero contribuye a la oxidación de las armaduras de hormigón

(b) Molienda del cemento.

- Finura: Cuanto más fino se muele el cemento, más rápida es la hidratación y mejor serán las resistencias a corto plazo, a veinte y ocho (28) días también mejoran pero en forma más débil.
- Sulfatado óptimo: Cada cemento tiene un contenido óptimo de SO_3 lo que le permite obtener las resistencias más altas a una edad determinada.
- Adiciones: generalmente cuanto más clinker tiene el cemento, más altas serán las resistencias. Sin embargo, existen adiciones que favorecen las resistencias como son: las puzolanas, las escorias de altos hornos, entre otras.
- Aditivos de molienda: Existen aditivos de molienda que no solamente mejoran las condiciones de molienda, si no que además intervienen en la cinética de hidratación acelerando la adquisición de las resistencias, por ejemplo: los clorhidratos, acetatos o formiatos de aminas aumentan resistencias iniciales y el azúcar en dosis bajas permite aumentar las resistencias a veinte y ocho (28) días sin reducir las de un (1) día.

El equipo empleado para medir la resistencia se denomina prensa hidráulica (ver figura N° 17), y permite conocer la cantidad de fuerza compresiva que es capaz de soportar un cubo de cemento antes de fraccionarse, en donde el área del cubo es conocida ($25,8064 \text{ cm}^2$).



Figura N° 17: Fotografía de la prensa hidráulica para la resistencia a la compresión.

3.13. Expansión

Es la medida de estabilidad dimensional del cemento, luego de sometida a condiciones de añejamiento (condiciones críticas de presión y temperatura). Se expresa como porcentaje de aumento o disminución de la medida longitudinal. Si ocurre una disminución de la dimensión se denomina retracción.

Los cementos se consideran expansivos cuando existe un elevado contenido de cal libre (CaO), así como de óxido de magnesio (MgO) que al contacto con el agua presentan un aumento de volumen, que se ve reflejada en un período de tiempo largo, también el sulfato de calcio en forma de anhidrita y hemidrato pueden aumentar el volumen, ya que presentan una estructura compacta, que absorbe rápidamente el agua, ocasionando un incremento en su volumen hasta de 30% o 50%. Para llevar a cabo este ensayo se necesita confeccionar barras de cemento con la preparación de una pasta (cemento + agua), y luego de tomar sus dimensiones se coloca en un autoclave, en donde se somete la muestra a presiones de 300 psi y temperaturas de 216°C. (Ver figura N° 18).



Figura N° 18: Fotografía del Autoclave

3.14. Otros equipos.

3.14.1 Molino de prueba

Este es un molino estandarizado y creado por el grupo Lafarge, para realizar pruebas y simulaciones de los molinos reales de crudos y cemento, opera a una velocidad de 45 revoluciones por minuto, tiene una capacidad de 20 kg de muestras máximo, contiene un total en cuerpos moledores de 900 unidades con medidas entre los 60mm, 35mm y 25mm.



Figura N°19: Molino de prueba

3.14.2 Molino Herzong HSM 250H

Es un molino de disco el cual opera por vibración haciendo que los discos choquen entre sí, disminuyendo de esta manera el tamaño de los granos del material.

Posee un motor de propulsión, el cual tiene una frecuencia de 50Hz, potencia de 1,1 Kw. y su velocidad es de 1430 rpm.

Reducción de tamaño de partículas hasta por debajo de 100 micras, se utiliza para la preparación de muestras para análisis por fluorescencia de rayos X, y con capacidad de moler aleaciones ferrosas, cemento, clinker, escoria, cerámicas y vidrios.



Figura N° 20: Molino Herzong HSM 250H

3.14.3 Prensa Herzong http 40

Esta maquina esta diseñada para producir prensados de partes para propósitos analíticos, este equipo es necesario para formar pastillas prensadas.

La herramienta de prensado puede ser utilizada para diámetros entre 10 y 60 mm. El diámetro estándar es de 40mm, cada diámetro requiere herramientas separadas.

El ancho del material de las pastillas es de aproximadamente 6mm de espesor, el máximo esfuerzo permisible esta indicado para cada herramienta.



Figura N° 21: Prensa Herzong http 40

3.14.4 Espectrómetro de Rayos X (Axios Cement)

Este equipo esta diseñado para solventar las necesidades de la industria cementera, confiable en un ambiente polvoriento, se basa en fluorescencia de rayos X.

El espectrómetro haciendo uso de un haz de rayos X, permite conocer la composición química de las sustancias, como se pueden nombrar:

- Mezcla de Crudo (harinas).
- Cemento.
- Mercancías entrantes (materias Primas).

El Axios Cement, es un sistema estable y confiable, viene con el software especial del cemento que ofrece una gama de las disposiciones del uso para la industria del cemento, incluyendo ejemplos y métodos trabajados.



Figura N° 22: Espectrómetro de rayos X

3.15. Yeso

Es un mineral común el cual se encuentra en la naturaleza por la precipitación del sulfato de calcio en agua de mar, como también esta generalmente asociado a la acción del ácido sulfúrico proveniente de zonas volcánicas sobre la caliza, por la siguiente reacción:



Es considerada como una piedra, es incolora o blanca en su estado más puro, sin embargo, generalmente presenta impurezas que le transmiten distintas coloraciones entre las que mencionan a la arcilla, óxido de hierro, sílice, caliza, carbonatos de calcio o magnesio, cloruros u otros sulfatos etc. Gomá (1979).

Químicamente, el yeso tiene el nombre de sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Durante el proceso de cristalización, las dos moléculas de agua se unen químicamente a la red cristalina. Una de las tantas propiedades únicas del yeso es su capacidad de liberar el agua cuando recibe calor y volver a combinarse con agua para formarse nuevamente en yeso, proceso denominado calcinación, de este se obtiene el sulfato de calcio hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), denominado también

estuco, debido a su propiedad se produce en gran variedad de yesos de fraguado rápido y se emplea principalmente en la industria de la cerámica y la construcción.

En los yacimientos, el sulfato de calcio se encuentra en dos formas: sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y en anhidrita (CaSO_4), estos se encuentran juntos en íntima asociación. La anhidrita, presenta una estructura compacta, que absorbe rápidamente el agua, ocasionando un incremento en su volumen hasta de 30% o 50%. Este yeso sin calcinar es empleado principalmente como retardador del cemento Pórtland.

3.15.1 Origen del yeso

(a) Natural:

- Sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).
- Anhidrita (CaSO_4).

(b) Industrial: Semi- Hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$).

(c) Sub.-productos de la industria:

- Sulfoyeso (Subproducto de la desulfuración de los gases de combustión).
- Fosfoyeso (Subproducto de la industria del ácido fosfórico).
- Fluoanhidrita (Subproducto de la industria del ácido fluorhídrico).

A continuación se describe el proceso de obtención del ácido fosfórico, en donde se obtiene el fosfoyeso como subproducto, para así conocer de donde provienen las impurezas que influyen en el fraguado del cemento.

3.15.2 Síntesis de ácido fosfórico para obtención de fertilizantes fosfatados

El fósforo existe abundantemente en la naturaleza, pero en forma difícilmente asimilable por las plantas, salvo casos excepcionales de determinados suelos y cultivos, por lo cual la industria de los fertilizantes fosfóricos consiste en transformar los fosfatos naturales en productos que contengan el fósforo en forma más soluble, es decir, más asimilable. Con este fin, los fosfatos naturales se atacan con diversos ácidos y la calidad y cantidad de éstos depende el producto final obtenido.

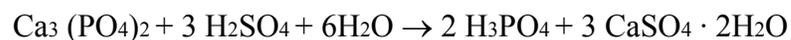
La extracción de los fosfatos naturales se realiza mediante el tratamiento de rocas de fosfato de calcio con ácido sulfúrico, filtrando posteriormente el líquido resultante para extraer el sulfato de calcio, obteniendo el ácido fosfórico, que es la fuente de los compuestos de gran importancia industrial llamados fosfatos, estos son productos formados por la sustitución de parte o de todo el hidrógeno del ácido fosfórico, según el número de átomos de hidrógeno sustituido, el compuesto obtenido se define como fosfato primario, secundario o terciario, así el NaH_2PO_4 , con un átomo de hidrógeno sustituido, se denomina fosfato primario de sodio y el Na_3HPO_4 , son tres átomos de hidrógeno sustituidos, fosfato terciario de sodio. TPV (2003)

(a) Materias primas, reacción y cristalización.

La materia prima para producir ácido fosfórico es la roca fosfática, esta roca tiene la propiedad de poseer en su estructura diversos componentes como son óxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de sodio (Na_2O), óxido de potasio (K_2O), entre otros, y estos pueden variar según el yacimiento, más tienen la propiedad común de poseer una combinación de fosfato-flúor-calcio en su estructura. Para la obtención de ácido fosfórico se ataca la roca con *ácido sulfúrico*, en presencia de agua, y en exceso de ácido sulfúrico.

La reacción total con ácido sulfúrico se puede dividir en 3 etapas simplificadas:

- El fosfato tricálcico se convierte en ácido fosfórico y sulfato cálcico:

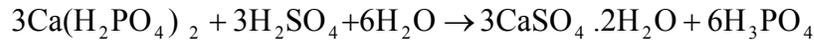


Esta es la reacción principal que se lleva a cabo en el proceso, y sucede en dos etapas; en la primera, se forma un producto intermedio llamado **“Fosfato Monocálcico”** originado por la prehumectación de la roca fosfática con el mismo ácido fosfórico producido. De aquí surge la necesidad de una etapa de premezclado entre la roca fosfática y el ácido de reciclado (ácido medio) antes de producir la reacción con el ácido sulfúrico.

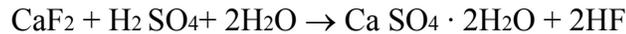


En la segunda etapa, este intermedio reacciona con el ácido sulfúrico en presencia de agua para generar el llamado **“Lodo de Reacción”**

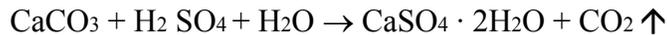
Esta segunda reacción es:



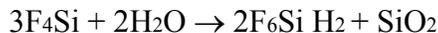
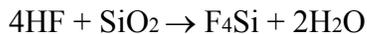
- El fluoruro cálcico constituyente de la roca reacciona, dando sulfato cálcico y ácido fluorhídrico:



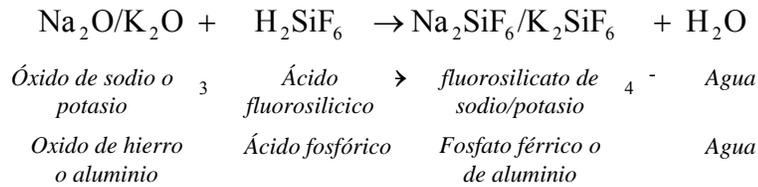
- El carbonato cálcico constituyente de la roca se convierte en sulfato cálcico y anhídrido carbónico:



El ácido fluorhídrico producido reacciona con la sílice presente en la roca fosfórica dando tetrafluoruro de silicio, el cual se hidroliza a ácido fluosilícico.



En el proceso de reacción pueden estar presentes reacciones secundarias, dependiendo de la composición de la roca, entre las cuales tenemos:



(b) Reacción y cristalización.

El ácido fosfórico se produce por reacción de ácido sulfúrico con roca fosfórica. En esta reacción, se requiere de un periodo de “**Maduración**” de entre 5 a 8 horas para generar cristales de yeso totalmente desarrollados y de fácil filtración, el calcio de la roca se combina con el ión sulfato del ácido sulfúrico y el resultante sulfato cálcico se separa por precipitación. Los cristales separados han de ser cuidadosamente lavados para alcanzar, al menos, el 99% de ácido recuperado. El principal objetivo durante la operación de reacción y cristalización es obtener un alto rendimiento de extracción del P₂O₅ de la roca y maximizar la recuperación de P₂O₅ durante la filtración. TPV (2003).

(c) Crecimiento del cristal.

El tipo de cristal de yeso que se desea que se forme durante el ataque de la roca es un cristal de tipo rómbico, en donde la longitud no sea superior a 2-3 veces su anchura. Este tipo de cristal filtra a una velocidad razonable y se lava muy fácilmente. TPV (2003)

(d) Filtración.

El propósito de la filtración es separar el ácido fosfórico de los cristales de sulfato cálcico. Una vez formada la pasta en el filtro, su superficie actúa a su vez como un filtro, depositándose más sólidos y aumentando el espesor de la misma, mientras el líquido pasa a su través.

Para una filtración eficaz, el tipo óptimo de cristales es el rómbico. Es deseable un cristal grande, ya que facilita la filtración y el lavado. El tipo de cristal formado está regido por el tipo de roca, por las impurezas que contiene y las condiciones bajo las que se realiza el ataque. TPV (2003).

(e) Concentración.

El ácido fosfórico, tiene normalmente una concentración entre el 27 y el 30 % de P_2O_5 y en muchos casos debe ser concentrado hasta alcanzar el 52 % de concentración, bien por exigencias del mercado o bien para fabricar superfosfato triple. La operación de concentración se lleva a cabo por evaporación bajo vacío, utilizando como fuente de energía el vapor suministrado por una planta de fabricación de ácido sulfúrico o agua caliente procedente de cualquiera de los puntos de recuperación de energía de la planta. Esta operación puede realizarse en una o varias etapas.

(f) Impurezas

Debido a la gran cantidad de tipos de roca fosfórica que se encuentran en el mercado se obtienen ácidos fosfóricos que, al solubilizar estas impurezas, presentan un comportamiento totalmente diferente entre sí en los distintos procesos de elaboración de fertilizantes. Por otra parte, durante el periodo de almacenamiento se forman unos lodos que han de ser separados por un proceso de clarificación, con la consiguiente pérdida de P_2O_5 .

Estas impurezas pueden provenir de la roca, como pueden ser introducidas en el proceso, originadas por los reactivos utilizados como el ácido sulfúrico y el agua. TPV (2003).

(g) Derivados del ácido fosfórico.

El ácido fosfórico vía húmeda es una de las principales materias primas en la industria de fertilizantes, ya que además de poder ser utilizado en fertirrigación directamente sobre la tierra tras una clarificación previa, puede fijar otro elemento fertilizante como el nitrógeno en forma amoniacal o ureica con un proceso relativamente sencillo, entre otros productos se pueden nombrar: superfosfatos, fosfato bicálcico, fosfato di cálcico. TPV (2003).

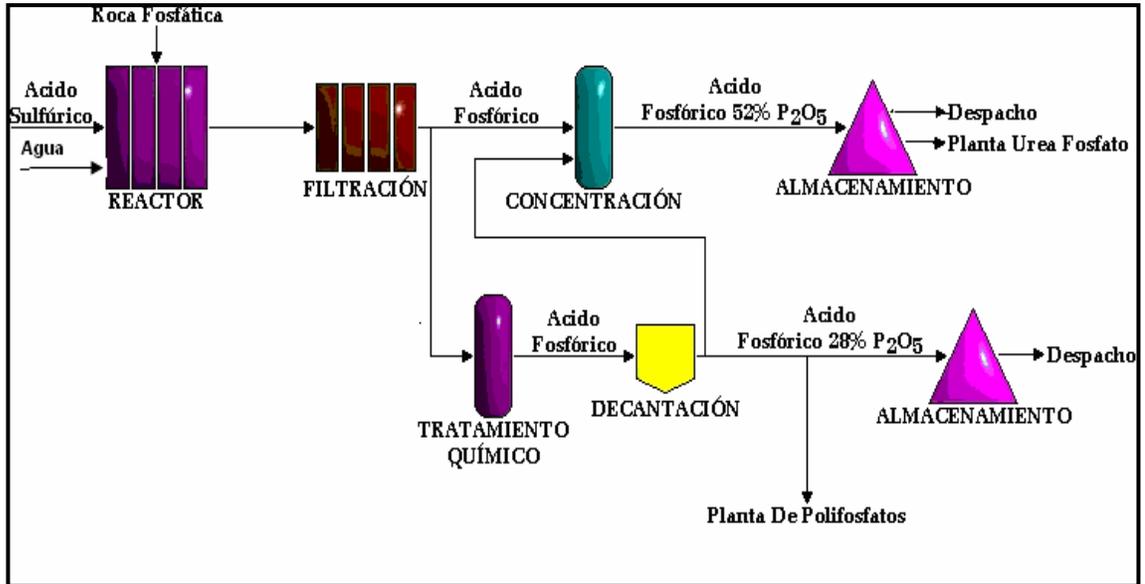


Figura N° 23: Diagrama de bloques del proceso de Fabricación del ácido fosfórico. TPV (2003).

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA GENERAL

En el desarrollo del presente trabajo se realizó un conjunto de ensayos experimentales en los laboratorios químicos y físicos del departamento de control de calidad de la empresa, para poder conocer las propiedades del yeso sintético y del yeso natural, y su influencia en la fabricación del cemento. La investigación se ejecutó por medio del siguiente esquema general de la metodología:

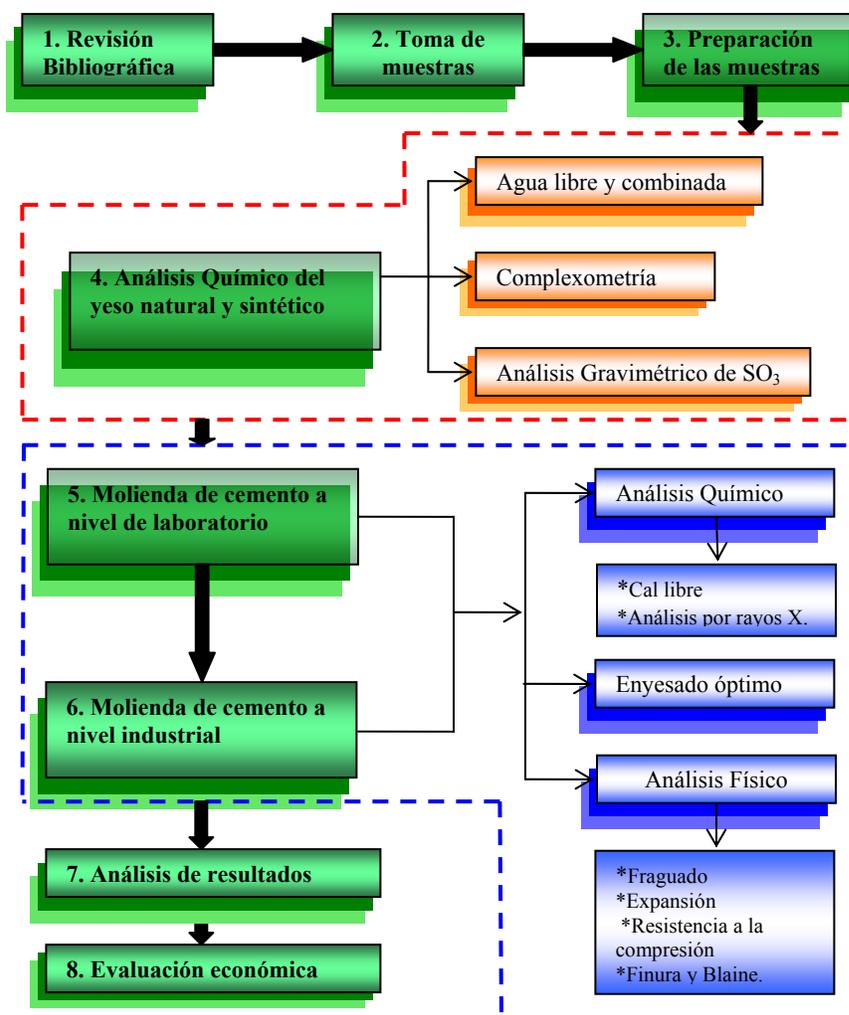


Figura N°24: Esquema general de la metodología

4.1. Revisión Bibliográfica

Para llevar cabo el presente trabajo especial de grado, es importante la recopilación de información por medio de:

- (a) Documentación acerca del proceso de fabricación del cemento, para conocer las diferentes etapas del mismo, y establecer el papel que desempeña el yeso en el cemento.
- (b) Revisión de los diagramas de flujo de la empresa, fundamentalmente en donde se lleva a cabo la molienda del cemento.
- (c) Estudio de las normas que regulan los diferentes tipos de cemento.
- (d) Revisión de los instructivos de trabajo de cada prueba de laboratorio, así como seguimiento del desempeño operacional mediante la observación directa de cómo se realizan los diferentes ensayos de laboratorio, teniendo a consideración el desempeño y manipulación de los equipos de trabajo tales como: equipo de rayos X, molinos de prueba en el laboratorio, la prensa hidráulica para los ensayos de compresión, entre otros.
- (e) Recopilación bibliográfica acerca de la hidratación del cemento, como el fraguado, características, reacciones químicas y factores que influyen en el fraguado e hidratación del cemento.

4.2. Toma de muestra

Para llevar a cabo los ensayos de laboratorio, se tomó de los patios de almacenamiento los materiales que se utilizaron para dichos ensayos, estos fueron el clinker, la caliza, y el yeso (yeso natural y yeso sintético).

Debido a la segregación que puede presentar los mismos, se tomó una muestra representativa de cada uno, para ello, se agarró una porción de material de la parte superior, media e inferior de las pilas o rumas ubicadas en los patios de almacenamiento.

La cantidad total que se tomó de cada material fue el necesario para realizar los ensayos. Todas las muestras se almacenaron en bolsas plásticas selladas e identificadas.

4.3. Preparación de las muestras

Debido a que los materiales recopilados presentan un gran tamaño, estas deben pasar por una previa preparación como es:

- (a) La muestra de clinker, caliza y yeso natural se trituraron hasta llevarla a un tamaño menor de 6mm. Para ello se empleó una trituradora la cual consta de un par de mandíbula de hierro.
- (b) De las muestras trituradas se tomó aproximadamente unos 6 Kg. y se le realizó el cuarteo mecánico (ver apéndice B1), hasta obtener la cantidad de muestra requerida para los análisis (250g).
- (c) La caliza, el clinker y el yeso natural y sintético deben ser molidas para disminuir su tamaño a micropartículas en un molino (molino HERZONG) antes de realizar los análisis. Los análisis de la caliza y el clinker fueron parte del presente trabajo y los análisis del yeso fueron realizados por el analista químico.
- (d) Al yeso sintético no requirió de trituración debido a que el tamaño que posee es pequeño. Todas las muestras fueron debidamente almacenadas en bolsa plásticas selladas e identificadas.

4. 4. Análisis químico de las muestras de yeso natural y sintético.

A las muestras de yeso tanto de yeso natural y sintético se le realizaron diversos análisis químicos para conocer su composición, en primer lugar se le realizó un ensayo para conocer la cantidad de agua libre (ver apéndice B2) y combinada que presentaba el yeso. (Ver apéndice B3).

El análisis complexométrico, es una técnica analítica que consiste en añadir EDTA (ácido etilen diamino tetra acético) para formar un complejo con el compuesto de interés, enmascarando a los demás llevando la solución a un pH establecido, este análisis nos permitió conocer los óxidos presentes en el yeso, como lo (MgO), el óxido de calcio (CaO), óxido de sílice (SiO₂), óxido de hierro (Fe₂O₃) y óxido de aluminio (Al₂O₃) (ver apéndice B4).

El análisis gravimétrico de SO₃ nos permitió conocer el porcentaje de trióxido

de azufre presente en el yeso, mediante la precipitación de este con sulfato de bario (BaSO_4) (ver apéndice B5) y un análisis cualitativo con hidróxido de sodio $\text{Na}(\text{OH})_2$ a la muestra de yeso sintético para conocer si presenta materia orgánica (ver apéndice B6).

4.5. Molienda de cemento a nivel de laboratorio

Se realizó la molienda de cemento en un molino de prueba, ubicado en el laboratorio, para ello se empleó clinker, caliza y yeso. El yeso que se empleó fue yeso natural y sintético secados a $120\text{ }^\circ\text{C}$ y $50\text{ }^\circ\text{C}$, con el fin de eliminar la humedad que contengan las partículas y simular las temperaturas en la que se somete el yeso a los molinos de cemento, estas fueron almacenadas en envases de plástico tapadas e identificadas.

Se prepararon siete (7) muestras de cemento tipo CPCA I (cemento Eco Plus), se escogió este tipo de cemento para realizar las pruebas de laboratorio debido a que su norma no es tan estricta como los demás tipos de cementos por lo que se puede realizar la prueba industrial sin producir un cemento fuera de norma y así no generar pérdidas a la compañía. Las muestras de cemento presentaron un porcentaje de 15% de caliza de adición proveniente de la cantera el Melero, 5% de yeso y 80 % de clinker, proporciones típicas promedios correspondientes a este tipo de cemento. Por lo tanto para realizar 4kg. de cemento se empleó 600g de caliza, 3200g de clinker y un total de yeso de 200g. Estas cantidades fueron asociadas a la capacidad del molino de prueba y a las cantidades necesarias para realizar los ensayos.

Este yeso total que presentó el cemento, estuvo conformado por un porcentaje de yeso natural y otro de yeso sintético que fueron variando para cada muestra de cemento. Dichos porcentajes se variaron desde 100 % natural y 0% sintético hasta 100% sintético y 0% natural. A su vez, de la cantidad estipulada de yeso natural se tomó un 67% de yeso secado a 50°C y un 33% de yeso secado a 120°C , proporciones de yeso típicas a esas temperaturas generadas en un molino real, y estipuladas por el grupo Lafarge. Estos porcentajes se usaron igual para el yeso sintético y así simular las condiciones de deshidratación en el molino real. A continuación se muestran los

porcentajes de yeso natural y sintético que presentó el yeso que conformó las diferentes muestras de cemento.

Tabla N° 6: Composición del yeso natural y sintético en el 5% de yeso que conforma las muestras de cemento.

Muestra	Porcentaje de yeso natural (%)	Porcentaje de yeso sintético (%)
1	100	0
2	90	10
3	80	20
4	70	30
5	50	50
6	25	75
7	0	100

Para realizar la molienda y obtener el cemento, se colocaron las cantidades establecidas de clinker, caliza, yeso natural y yeso sintético en el molino de prueba, La molienda se realizó hasta obtener un Blaine (ver apéndice B13) de (360 ± 10) m²/Kg. esto fue aproximadamente en una hora. Las muestras de cemento se deben almacenar en bolsas plásticas debidamente identificadas y selladas. Este procedimiento se repitió para cada una de las muestras de cemento anteriormente especificadas.

4.5.1. Análisis Químicos

Los ensayos químicos consistieron en determinar la cal libre en el cemento, este análisis se realizó por medio de conductimetría (ver apéndice B10). El análisis de rayos X se basa en fluorescencia de rayos X; para realizar el análisis en el equipo se prepararon las muestras de cemento agregando un fundente cuyo compuesto es el tetraborato de litio y así se confeccionaron las denominadas pastillas fundidas (ver apéndice B9), estos mismos análisis fueron aplicados al clinker.

Para preparar las pastillas fundidas se realizó un ensayo denominado pérdida al fuego (ver apéndice B7), y por medio de este se determinó la cantidad de fundente

necesaria para confeccionar la pastilla.

El análisis químico realizado a la caliza consistió en determinar el porcentaje de humedad (ver apéndice B11), pérdida al fuego y por medio de pastillas prensadas (ver apéndice B8) y haciendo uso del equipo de rayos X su composición química.

4.5.2. Análisis Físicos

Los análisis físicos realizados a las muestras de cemento, consistieron en realizar ensayos de fraguado, expansión y resistencia.

Para la realización del fraguado en primer lugar se determina la cantidad de agua a añadir a la pasta de cemento (cemento + agua) que dependerá de su superficie específica por medio de un ensayo denominado consistencia normal (ver apéndice B14) y luego con la ayuda del aparato Vicat se determina el tiempo inicial y final del fraguado que dependiendo de la penetración de la aguja se fijan estos tiempos (ver apéndice B15).

La expansión (ver apéndice B16), este ensayo consistió en preparar una barra con la pasta sobrante del análisis anterior. Se tomó la longitud inicial de la barra y se sometió a un ensayo en autoclave para simular condiciones críticas o de añejamiento a la que puede someterse la pasta de cemento, y se midió luego su longitud final.

Para medir la resistencia a la compresión (ver apéndice B17) que posee las muestras de cemento, se preparó un mortero, con cemento, arena y agua, y se colocó en una probeta (moldes), los cubos una vez preparados se rompieron a un (1) día, y las demás se dejaron sumergidas en unas piscinas con agua durante el período que corresponda romperlas, estas fueron a tres (3) días, siete (7) días, y veinte y ocho (28) días.

Cabe destacar que estos ensayos se le realizaron a cada muestra de cemento, y que los procedimientos de estos ensayos están normalizados bajo las normas COVENIN.

4.5.3. Enyesado óptimo o concentración óptima

El enyesado óptimo a nivel de laboratorio consistió en realizar 5 muestras de cemento en el molino de prueba ubicado en el laboratorio, en donde la cantidad másica de clinker y caliza, se mantuvieron constantes y la cantidad de yeso en el cemento fue aumentando progresivamente, aumentando los porcentajes desde 3% hasta 7% de yeso en el cemento. La composición del yeso estuvo conformada por yeso natural y yeso sintético, el porcentaje de cada uno depende de los resultados de ensayos físicos y químicos explicados anteriormente, a su vez el yeso natural presentaba un 67% de yeso secado a 50°C y un 33% de yeso secado a 120°C al igual se procedió con el yeso sintético. Cada muestra fue almacenada en bolsas plásticas y selladas. La cantidad de muestra realizada fue la necesaria para realizar el ensayo de resistencia a la compresión explicado en el apartado anterior. Por medio de este se observó el porcentaje de yeso que generó mayores resistencias a nivel de laboratorio y así tener una idea para realizar la prueba industrial.

4.6. Molienda de cemento a nivel industrial

Se realizó la molienda en molinos industriales, para verificar los resultados obtenidos a nivel de laboratorio y el efecto en las propiedades del cemento Eco Plus. Se realizó a su vez el enyesado óptimo.

Dependiendo de los resultados del laboratorio y de la disponibilidad de yeso que presente la empresa productora del yeso sintético (TRIPOLIVEN) se fijó los porcentajes de los yesos a utilizar, la mezcla de los yesos se realizó en el patio de almacenamiento de yeso por medio de un payloaders, tomando a consideración la cantidad de masa que recoge la pala del payloaders que son 5,5 toneladas de yeso, se obtuvo una cantidad de yeso total de 27,5 toneladas que estuvieron conformadas por 4 paladas de yeso natural (22 ton) y 1 palada de yeso sintético (5,5 ton). Se vació la tolva que posee yeso natural, y se añadió la nueva materia prima en estudio llevándola desde el patio hacia la tolva haciendo uso del payloaders.

La prueba industrial se llevó a cabo en el molino de cemento 2 que se caracteriza por tener un sistema cerrado de molienda. La duración de la prueba fue de

6 horas, en donde se tomó muestras a cada hora a medida que se alimentaba el molino con un porcentaje de yeso en el cemento diferente para realizar el enyesado óptimo.

Se monitorearon las variables del proceso con la finalidad de evidenciar cualquier cambio en las condiciones de operación. Para poder observar el efecto en el producto ejercido por el yeso sintético, la operación del molino se debe permanecer lo más estable posible.

4.6.1. Enyesado óptimo

El enyesado óptimo consistió en buscar la cantidad (porcentaje) de la materia prima en estudio añadida al cemento que de mayores resistencias, para ello se varió los porcentajes de yeso añadidos al cemento, y se procedió a tomar muestras en el molino de cemento cada hora. La cantidad de muestra que se tomó fue mayor de 5Kg que fue una cantidad suficiente para realizar los análisis físicos y químicos ya explicados en el apartado anterior. Los parámetros para producir cemento CPCA I (Eco Plus) se rigieron por la carta de control (consignas internas de calidad de producto) a excepción del trióxido de azufre (SO_3), ya que este varía en el transcurso de la prueba. Las cantidades de yeso que se añadieron se establecieron dependiendo del porcentaje de SO_3 existente en el mismo (el porcentaje de SO_3 obtenido en rayos X es una medida de la cantidad de sulfato combinado en el yeso), esta se conoció por medio de la realización de la pastilla prensada y no fundida debido a lo rápido del ensayo, y se analizaron en el equipo de rayos X, sin embargo, luego se realizaron las pastillas fundidas que poseen mayor precisión.

4.7. Análisis de resultados

Los resultados experimentales, producto del desarrollo de las pruebas, fueron reportados en gráficos y tablas que permitieron realizar la debida interpretación de la influencia del yeso en las propiedades del cemento, y su comportamiento observado en los ensayos durante el desarrollo del proyecto. Estos resultados se compararon con los que exige la norma COVENIN 3134:1994 “Cemento Pórtland con adiciones. Especificaciones” y con las consignas internas de calidad de la empresa para este producto.

4.8. Evaluación económica

Por medio del monitoreo de la prueba industrial, se observó la influencia del yeso sintético en la energía de molienda y demás equipos pertenecientes al sistema de molienda del cemento 2. Así como en el almacenaje y variables de proceso del molino durante la prueba industrial, para determinar si se genera algún cambio en el proceso. Se tomo a consideración el costo unitario de cada yeso que es el que genera más peso económicamente. Costo de mantenimiento de los equipos en ambas alternativas, y para obtener la cantidad de yeso consumido anualmente se tomó a consideración la producción anual de cemento Eco Plus.

No se realizó el estudio económico por medio de un método de análisis económico, debido a que el empleo del yeso sintético no requirió de ninguna inversión adicional en el proceso de la empresa, si no que significó una reducción de costos en materias primas, por lo que se realizó la comparación de las alternativas que generen menos costos.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos. Como se ha explicado a lo largo del desarrollo de este Trabajo Especial de Grado, el objetivo principal consistió en estudiar al yeso sintético y determinar si es factible su uso en la fabricación del cemento Pórtland, por medio de una serie de ensayos de laboratorio; igualmente, a nivel de laboratorio se realizaron análisis al cemento que posee yeso sintético, y luego se evaluó a nivel industrial, tal como se explicó en el capítulo anterior.

5.1. Análisis químico de las muestras de yeso natural y sintético

- A continuación se muestra en la tabla N° 7, los resultados de los análisis químicos que se le realizan al yeso natural y sintético.

Tabla N° 7: Análisis químicos del yeso natural y sintético.

<i>Análisis Químico</i>	<i>Yeso Sintético</i>	<i>Yeso Español</i>	<i>Especificación técnica interna</i>
CaSO₄·2H₂O	83,90	94,94	40 % min
CaSO₄	3,98	1,44	45 % max
SiO₂	1,82	1,20	10 % max
Fe₂O₃	0,15	0,11	-
Al₂O₃	0,28	0,22	-
CaCO₃	9,00	1,83	-
MgCO₃	0,10	0,25	-
Sumatoria	99,24	99,99	-
SO₃	41,36	45,00	38 % min
Agua Libre	0,76	0,02	-
Agua Combinada	17,56	19,87	-
CaO	34,01	32,54	-
MgO	0,05	0,12	-
SO₃ COMBINADO(Yeso)	39,02	44,15	-
SO₃ EXCESO (anhidrita)	2,34	0,85	-
CaO COMBINADO (Anhidrita)	1,64	0,59	-
CaO COMBINADO (Yeso)	27,33	30,92	-
CaO EXCESO (Carbonato de calcio)	5,04	1,02	-

Como ya se ha mencionado con anterioridad existen tres formas en que se encuentra el sulfato de calcio, como son el dihidratado, la anhidrita y el semihidratado, las que se agregan al cemento y se encuentran en forma natural son el dihidrato y la anhidrita, o ambas conjuntamente. El semihidratado, se obtiene por elevación de temperatura, y por consiguiente deshidratación del sulfato de calcio dihidratado. Cabe destacar que el nivel de solubilidad en agua de las diferentes formas de sulfatos es muy diferente e influyen de diferente manera en las reacciones de hidratación de los cementos. El hemihidrato es más reactivo que el dihidrato y este más reactivo que la anhidrita. Por ello se tienen unas especificaciones internas dentro de la empresa de los diversos componentes del yeso, como se muestra en la tabla N° 7, se observa que ambos yesos cumplen con las especificaciones de la empresa. Se puede decir que el yeso español se ha caracterizado por ser un mineral que no presenta mucha variación en su composición química y que posee una cantidad elevada de sulfato de calcio dihidratado de un 94,94%, por lo que tiene un alto grado de pureza. Comparando el yeso sintético con el yeso español, tenemos que el yeso sintético presenta mayor impurezas que el yeso español, el carbonato de calcio (CaCO_3) del yeso sintético es de un 9% y el español de 1,83%, posee mayor cantidad de óxido de sílice (SiO_2), de óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3) pero son muy pocas las diferencias entre ellos. En cuanto a la cantidad de anhidrita tiene mayor cantidad el yeso sintético que el español.

Las impurezas del yeso sintético se deben principalmente a que éste es un subproducto del proceso de fabricación del ácido fosfórico empleado para producir fertilizantes. Él es recopilado con todas las impurezas que posee la roca fosfática en la etapa de filtración, sin embargo para poder ser empleado en la fabricación del cemento, pasa por un proceso de purificación, con la finalidad de reducir las impurezas, y así disminuir el efecto pronunciado de fósforos ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, CaHPO_4) y fluoruros solubles en agua (NaF y Na_2SiF_6) que forman capas protectoras como sustancias inactivas en la superficie de los granos de cemento durante el contacto del cemento con agua suprimiendo la hidratación del cemento temporalmente, produciéndose retardos en los fraguados, sin embargo estos análisis no se realizan en

la empresa, solo se conocen los realizados por la empresa productora del fosfoyeso, lo cual presentan un 0,002% de fósforos solubles (P_2O_5), y de fluoruros solubles de 0,02 %, otras impurezas que pueden presentar el yeso y afectar su empleo en la fabricación del cemento son los materiales orgánicos que son retardantes del tiempo de fraguado, se realizó una prueba cualitativa para conocer su existencia en el yeso sintético, obteniendo que no presenta materia orgánica. Se pudo observar a nivel de laboratorio que el yeso sintético se deshidrata más rápido que el yeso natural.

5.2. Molienda de cemento a nivel de laboratorio

5.2.1 Resultados de los análisis químicos

- A continuación se muestra la composición química obtenida del análisis del Clinker empleado en las corridas de cemento.

Tabla N° 8: Análisis químico del clinker

ANÁLISIS QUÍMICOS			
Elementos	Porcentajes (%)	Composición típica (%)	Especificación interna (%)
SiO₂	21,76	(21-22)	
Al₂O₃	5,04	(5-6)	
Fe₂O₃	3,31	(3-4)	
CaO	65,86	(65-68)	
MgO	1,94	(1-2)	
K₂O	0,56	(0,2-1,5)	
NaO₂	0,29	(0,1-0,5)	
SO₃	0,50	(0,1-1)	
TiO₂	0,24	(0,1-0,3)	
P₂O₅	0,21	(0,1-0,3)	
Pérdida al fuego	0,30	(0,2-0,3)	
SUMATORIA	100,02		
CaO Libre	0,90	(1,7-2,5)	(0,7-2,5)
ÁLCALIS	0,66	(0,4-0,7)	
C₃S	59,09	(52-63)	(57-63)
C₂S	17,82	(15-23)	
C₃A	7,77	(6-13)	
C₄AF	10,06	(9-11)	

En la tabla se puede observar el análisis químico realizado al clinker, empleado en la fabricación del cemento, a nivel de laboratorio. La constitución del clinker puede variar y depende de los componentes que forman parte de la materia prima, sin embargo, en la tabla se muestra una composición típica de los compuestos que lo conforman, se puede observar que se encuentran dentro de los rangos típicos, a excepción de la cal libre (óxido de calcio sin combinar), pero se encuentra dentro de la especificación interna, este componente es uno de los causantes de expansión durante la hidratación del cemento e influye de forma minoritaria en los tiempos de fraguado, ya que un aumento del contenido de cal libre en el clinker disminuye los tiempos de inicio y final del fraguado del cemento. Otros componentes que forman parte del clinker y rigen su calidad son: el contenido de óxido de magnesio o periclase (MgO), que a pesar que se encuentra dentro de las especificaciones internas, este cuando excede de 5%, es causante de un aumento en el volumen del cemento, debido a que se hidrata lentamente produciendo expansión o rotura al cabo de unos años.

El fósforo (P_2O_5), cuando posee un porcentaje mayor a 0,5% aumenta los tiempos de fraguado; en la tabla se muestra que presenta un porcentaje menor a lo especificado.

Se puede observar que el contenido de alita (C_3S) se encuentra dentro de las especificaciones internas de la empresa, esta fase es de suma importancia debido a que es la que ofrece al cemento, altas resistencias iniciales y finales en mayor proporción que las demás fases. Por todo lo antes mencionado el clinker cumple con las especificaciones y se considera apto para realizar las pruebas.

- En la siguiente tabla se muestra la composición química obtenida de la caliza de la cantera el Melero, empleada en las corridas de cemento.

Tabla N° 9: Análisis químico de la caliza de la cantera el Melero

Análisis químico		
Elementos	Composición (%)	Composición Típica (%)
SiO₂	13,02	(10,04-22,75)
Al₂O₃	2,09	(1,15-5,34)
Fe₂O₃	0,71	(0,47-1,87)
CaO	44,02	(33,17-44,30)
MgO	0,66	(0,61-1,87)
K₂O	0,34	(0,23-0,84)
Pérdida al fuego	37,84	(26-38)
SUMATORIA	96,68	
CaCO₃	78,49	(62-80)
Humedad	0,51	(0,15-2,64)

De la tabla se puede observar que la composición de la caliza de la cantera el Melero no varía de su composición típica. Del análisis químico el parámetro de mayor interés es la pérdida al fuego, ya que este nos permite controlar la cantidad de caliza que se le adiciona al cemento, debido a que un exceso de la misma podría provocar una disminución de las resistencias. Como se observa en la tabla, esta caliza presenta una pérdida al fuego de 38 % aproximadamente, por lo tanto según la carta de control de la empresa el cemento deberá poseer una pérdida al fuego entre 5,60% y 6,00%, los demás parámetros químicos no poseen influencia en las propiedades del cemento, debido a que la caliza es un material de adición inactivo, es decir, no tiene la propiedad de reaccionar con la cal apagada (Ca(OH)₂) producida durante las reacciones de hidratación del cemento, para dar hidrosilicatos que proporcionen un aumento adicional en las resistencias. Cabe destacar que a pesar que la empresa tiene tres canteras de caliza se emplea como material de adición la que presente menor porcentaje de carbonato de calcio, que en este caso es la perteneciente a la cantera el Melero.

- En la siguiente tabla se muestra los resultados de los análisis químicos realizados a los cementos obtenidos de las diferentes corridas realizadas en laboratorio, y sus especificaciones internas como la que exige la norma.

Tabla N° 10: Análisis químico de las muestras de cemento obtenidas de la variación de la composición de yeso sintético en el yeso añadido al cemento.

<i>Elementos</i>	<i>%yeso sintético</i>								<i>Especificación interna</i>	<i>Norma COVENIN 3134</i>
	<i>0%</i>	<i>10%</i>	<i>20%</i>	<i>30%</i>	<i>50%</i>	<i>75%</i>	<i>100%</i>			
(%) SiO ₂	19,96	19,97	20,19	20,31	20,21	20,18	20,24			
(%) Al ₂ O ₃	4,75	4,81	4,91	4,94	4,84	4,83	4,76			
(%) Fe ₂ O ₃	2,88	2,86	2,90	2,89	2,91	2,87	2,90			
(%) CaO	59,69	60,02	59,97	59,69	59,69	59,89	59,86			
(%) MgO	1,74	1,73	1,77	1,76	1,76	1,79	1,76			
(%) K ₂ O	0,53	0,51	0,51	0,52	0,52	0,52	0,53			
(%) NaO ₂	0,56	0,36	0,29	0,28	0,36	0,35	0,52			
(%) SO ₃	2,75	2,68	2,66	2,63	2,58	2,50	2,43	(2,5-2,7)	≤4,0	
(%) TiO ₂	0,22	0,21	0,22	0,22	0,22	0,21	0,22			
(%) P ₂ O ₅	0,19	0,20	0,21	0,22	0,24	0,27	0,30			
(%) Pérdida al fuego	6,15	6,12	6,09	6,13	5,94	5,86	5,87	(5,6-6,0)	≤9,0	
SUMA	99,42	99,45	99,71	99,59	98,26	98,27	99,38			
(%) CaO Libre	0,54	0,41	0,39	0,31	0,32	0,28	0,36	(0-2,3)		
(%) ÁLCALIS	0,91	0,69	0,62	0,62	0,70	0,69	0,86			

En la tabla se muestran los requisitos químicos establecidos por la Norma COVENIN 3134 (ver apéndice A), así como las especificaciones internas que la empresa exige para el cemento Pórtland tipo CPCA I (La Vega Eco Plus), como se puede observar tanto el porcentaje de trióxido de azufre como la pérdida al fuego se encuentran dentro de los requisitos exigidos por la norma, sin embargo, en las especificaciones internas el porcentaje de trióxido de azufre en el testigo (0% yeso sintético) y en el cemento que posee yeso sintético puro se encuentran fuera del rango establecido, pero no es muy marcada la diferencia. Con respecto a la pérdida las muestras que poseen 0 % de yeso sintético hasta 30% de yeso sintético presentan una pequeña variación con respecto al rango establecido por la empresa. La cal libre se encuentra dentro del rango establecido internamente. Se puede observar que el

porcentaje de fósforo aumenta a medida que añadimos yeso sintético al cemento, ya que el yeso sintético como se discutió anteriormente posee mayor impurezas que el yeso natural.

5.2.2 Resultados de los análisis físicos

- A continuación se muestra el efecto de aumento del porcentaje del yeso sintético en el tiempo de fraguado inicial del cemento CPCA I (Eco Plus).

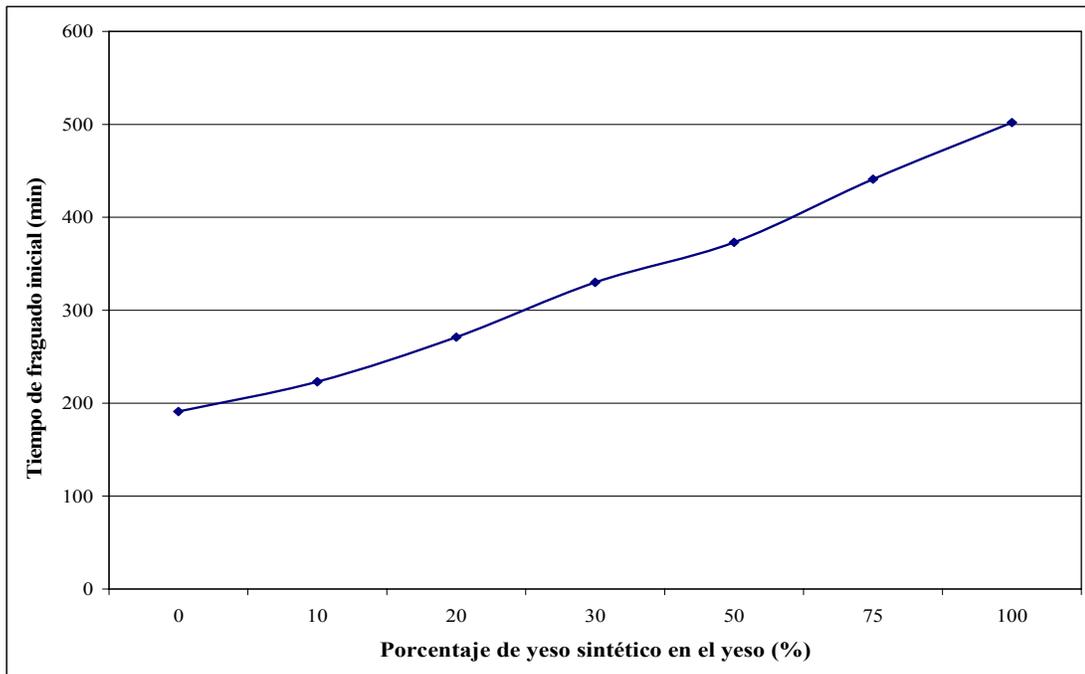


Figura N° 25: Variación del tiempo de fraguado inicial Vicat en función del porcentaje de yeso sintético en el yeso que conforma el cemento.

En la gráfica se puede observar el comportamiento que tiene el tiempo de fraguado inicial del cemento con respecto a los porcentajes de yeso sintético en el total de yeso que conforma el cemento, se muestra que a medida que se aumenta el porcentaje de yeso sintético aumenta el tiempo de fraguado inicial del cemento.

- En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento del tiempo de fraguado final con respecto a la variación del porcentaje de yeso sintético en el cemento.

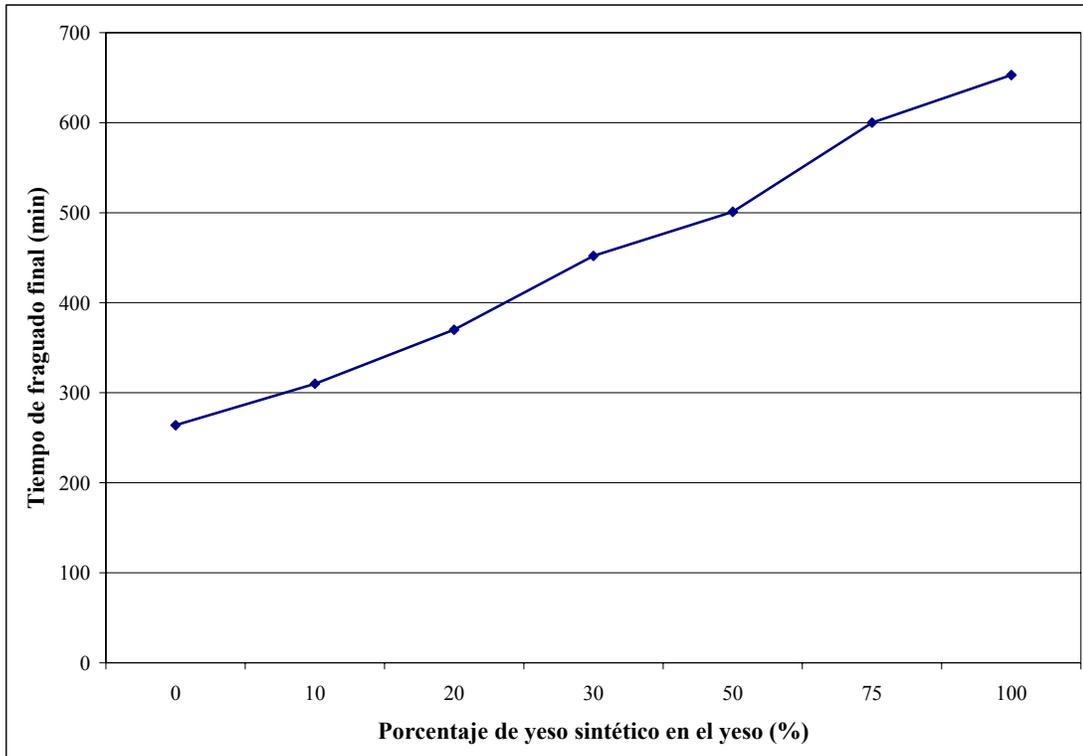


Figura N° 26: Variación del tiempo de fraguado final Vicat en función del porcentaje de yeso sintético en el yeso que conforma el cemento

En el gráfico se muestra el comportamiento que posee el tiempo de fraguado final con respecto a la variación del porcentaje de yeso sintético en el total de yeso que conforma el cemento, se observa que a medida que se aumenta el porcentaje másico de yeso sintético en el total de yeso el tiempo final de fraguado del cemento aumenta.

- En la siguiente tabla se muestra la influencia del yeso sintético en la consistencia y demanda de agua en el cemento, a una superficie específica Blaine promedio de 360 m²/Kg.

Tabla N° 11: Influencia del porcentaje del yeso sintético en la consistencia y demanda de agua del cemento

<i>% yeso sintético</i>	<i>Demanda de agua (ml)</i>	<i>Consistencia Normal (%)</i>
0	148	22,8
10	148	22,8
20	148	22,8
30	149	22,9
50	149	22,9
75	149	22,9
100	149	22,9

En la tabla se observa que al mantener la superficie específica en un promedio de 360 m²/Kg, la cantidad de agua que demanda el cemento no varía considerablemente al aumentar las proporciones de yeso sintético en el cemento, esto debido a que el Blaine es una medida de la superficie específica del cemento y no varía considerablemente en las muestras, por lo tanto se tiene que la superficie de contacto entre los granos de cemento con el agua es aproximadamente la misma, teniendo así una misma cantidad de agua demandada para la hidratación.

- En la siguiente tabla se muestra los tiempos de fraguado inicial y final, la finura y la expansión al ir variando el porcentaje de yeso sintético en el yeso que conforma el cemento, con una superficie específica Blaine de promedio de 360 m²/Kg.

Tabla N° 12: Variación de los parámetros físicos del cemento con respecto a los porcentaje de yeso sintético en el yeso que conforma el cemento.

<i>Ensayos</i>		<i>%yeso sintético</i>							<i>Especificación Interna</i>	<i>Norma COVENIN 3134</i>
		<i>0%</i>	<i>10%</i>	<i>20%</i>	<i>30%</i>	<i>50%</i>	<i>75%</i>	<i>100%</i>		
<i>Finura</i>	% Retenido Tamiz 45 µm	23,42	24,23	23,31	26,35	23,61	25,03	25,51	< 16,5	-
	% Retenido Tamiz 75 µm	9,95	9,63	9,80	9,87	9,85	10,44	11,04	< 4,5	-
Fraguado Vicat Inicial (min)		191	223	271	330	373	441	502	-	> 45
Fraguado Vicat Final (min)		264	310	370	452	501	600	653	-	< 480
Expansión (%)		0,26	0,35	0,08	0,05	0,20	0,02	0,02	-	< 0,8

Se observa que el tiempo de fraguado inicial se encuentra dentro de lo exigido por la norma, sin embargo, el tiempo de fraguado final cumple con la norma hasta un 30% de sustitución del yeso sintético en el total de yeso que conforma el cemento, el resto presentan tiempos muy largos de fraguado. Se observa en la muestra con 10% de yeso sintético que presenta un aumento de 17% en el tiempo de fraguado inicial con respecto al tiempo de fraguado inicial que posee el testigo, y en la muestra de 20% de yeso sintético presenta un aumento de 42%, luego 73%,95%,131%, y 163% de aumento con respecto al testigo, a medida que se aumenta el yeso sintético; el porcentaje de expansión se mantiene dentro de lo establecido por la norma, por lo que no se observó problemas de aumento considerable de volumen por el ensayo en autoclave.

La medida de finura obtenida por porcentaje de retenido en los tamices, muestran que no se encuentran dentro del valor establecido por la empresa, por lo que se puede decir, que las partículas que conforman al cemento se encuentran un poco gruesas, sobre todo el clinker que es más difícil de moler que la caliza y el yeso.

- En la siguiente tabla se muestra las resistencias a la compresión de las muestras realizadas con yeso sintético.

Tabla N° 13: Variación de la Resistencia a la Compresión a diferentes edades al aumentar la cantidad de yeso sintético en la cantidad de yeso añadida al cemento.

% yeso sintético Resistencias	0 %	10%	20%	30%	50%	75%	100%	Especificación Interna	Norma COVENIN 3134
R1 Día (Mpa)	8,5	7,9	6,5	7,1	7,1	5,4	4,7	(7,1-9,9)	-
R3 Días (Mpa)	17,8	17,7	21,0	21,0	20,8	14,9	17,3	(15,4-18,6)	>9,8
R7 Días(Mpa)	23,8	24,2	22,6	24,5	25,8	26,8	23,8	(22,3-25,8)	>16,7
R28Días(Mpa)	33,4	32,0	31,2	33,1	34,1	29,8	31,2	(29-33)	> 27,4

Se puede observar que las resistencias a un (1) día se encuentran por debajo del objetivo de la empresa y más bajo que el testigo, sin embargo, fue aumentado a medida que transcurría el tiempo. Al llegar a veinte y ocho (28) días se observó que las resistencias se encuentran dentro de lo establecido por la norma y las especificaciones internas. El crecimiento lento de resistencia es consecuencia de la lenta hidratación, que se evidencia en los largos tiempos iniciales de fraguado. Para ilustrar la idea anterior obsérvese que a 75% y 100% de adición de yeso sintético se presentaron los mayores tiempos de fraguado y son esas muestras las que poseen las resistencias iniciales más bajas, por lo que se puede inferir que en ese momento se presentó una lenta hidratación de los silicatos, y poca formación de sus hidratos, que son los que intervienen en las resistencias. Cabe destacar que las resistencias cumplen con las exigencias de la norma COVENIN 3134 para cemento Pórtland con adiciones.

5.2.3. Estudio de la influencia del aumento de la finura en las propiedades físicas del cemento.

Se realizaron las muestras de cemento con mayor finura debido al elevado porcentaje de retenido en los tamices que presentaban las muestras anteriores, lo que se pudo inferir que este retenido estaba conformado en mayor proporción por el clinker, porque este es más difícil de moler. Al realizar las muestras de cemento se fija como medida del tamaño de las partículas al Blaine y no la finura por tamices, la medición de la finura a través de tamices es una especificación interna de la empresa y no está regulada por la norma. Debido a que al realizar la molienda del cemento las fracciones más finas del producto se enriquecen en los componentes de molienda más fácil de moler, por ser más blandos, como la caliza y el yeso, y los gruesos se enriquecen en los más difíciles de moler, tal como es el caso del clinker (ver apéndice C) , se presenta una lectura del Blaine que indicaría una finura de molienda elevada, sin embargo, el clinker se encuentra grueso en el cemento, por lo que es menos reactivo. Tal como es el caso de las moliendas anteriores.

Para obtener una mayor superficie de las partículas del clinker en las muestras de cemento se realizó la molienda del clinker solo, hasta obtener un porcentaje de retenido en los tamices dentro de la especificación interna de la empresa y luego se procedió a moler en conjunto con el yeso y la caliza hasta obtener un porcentaje de retenido lo más cercano a la especificación interna, asegurando así una molienda más eficiente y representar mejor la molienda a nivel industrial, ya que a nivel de laboratorio se tiene como producto las partículas finas y gruesas juntas, sin embargo a nivel industrial se posee un sistema de separación obteniendo solo las partículas finas como producto y las gruesas son devueltas al molino

- En la siguiente tabla se muestra la influencia del aumento de la superficie en el resto de los parámetros físicos estudiados, las nuevas muestras presentan una superficie específica promedio de $410\text{m}^2/\text{Kg}$.

Tabla N° 14: Influencia del aumento de la superficie específica Blaine en las propiedades físicas del cemento.

<i>Ensayos</i> \ <i>% Yeso sintético</i>	0%	20%	0%	20%	<i>Especificación interna</i>	<i>Norma COVENIN 3134</i>
<i>Análisis físicos</i>						
Superficie específica Blaine (m²/Kg)	360		410		-	> 300
% Retenido Tamiz 45 μm	23,42	23,31	19,86	16,80	< 16,5	-
% Retenido Tamiz 75 μm	9,95	9,80	7,93	6,44	< 4,5	-
Demanda de agua (ml)	148	148	160	159	-	-
Consistencia Normal (%)	22,8	22,8	24,60	24,50	-	-
Fraguado Vicat Inicial (min)	191	271	132	128	-	>45
Fraguado Vicat Final (min)	264	370	230	225	-	<480
Expansión (%)	0,26	0,08	0,01	0,02	-	<0,8

Se puede observar que al aumentar la superficie específica del cemento, se obtiene un menor porcentaje de retenido en los tamices, e influye sobre los tiempos de fraguado, que presentaron una disminución notable con respecto a los tiempos reportados con una superficie específica de 360 m²/kg. Debido a que las sustancias presentan una mayor velocidad de reacción cuando su superficie de contacto es mayor, tenemos así una hidratación más rápida cuando su finura es mayor, es decir menor cantidad de retenidos en los tamices, resultando un clinker más reactivo, por consiguiente un aumento en la demanda de agua y así de la consistencia normal. Se tiene que las expansiones se encuentran dentro de los valores de la norma.

Cabe destacar que se realizó la molienda solo con el 20% de yeso sintético ya que esta composición es el límite máximo a emplear por la empresa, debido a la poca producción de fosfoyeso que posee la empresa TRIPOLIVEN respecto a la demanda de Lafarge, para así observar la influencia del aumento de la superficie en los demás parámetros estudiados.

- En la siguiente tabla se muestran los resultados de la resistencia a la compresión de las pruebas analizadas con una superficie Blaine de 410m²/Kg.

Tabla N°15: Influencia del aumento de la superficie específica en la resistencia a la compresión a diferentes edades

% Yeso sintético (superficie Blaine)	0% (360 m ² /kg)	20% (360 m ² /kg)	0% (410 m ² /kg)	20% (410 m ² /kg)	Especificación Interna	Norma COVENIN 3134
Resistencias						
R1 Día (Mpa)	8,5	6,5	14,2	14,1	(7,1-9,9)	-
R3 Días (Mpa)	17,8	21,0	25,3	25,2	(15,4-18,6)	>9,8
R7 Días(Mpa)	23,8	22,6	30,9	29,5	(22,3-25,8)	>16,7
R28Días(Mpa)	33,4	31,2	38,3	38,2	(29-33)	>27,4

Se observa un incremento en las resistencias a todas la edades al incrementar la superficie específica de 360 m²/kg a 410 m²/kg, con la de mayor superficie específica, se obtuvieron altas resistencias con respecto a las especificación interna, y con respecto al testigo presentan gran similitud, las altas resistencias se deben por la gran superficie específica que poseen los granos de cemento, se tiene mayor superficie de contacto con el agua y la hidratación se acelera, por lo tanto en un tiempo dado, se tiene mayor formación de hidrosilicatos que son los que aumentan las resistencias iniciales y finales.

5.2.4 Enyesado óptimo o concentración óptima

- En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento de las resistencias a diferentes edades a medida que se aumenta el porcentaje de yeso en el cemento, donde este yeso posee un 20% de yeso sintético y también se muestra el contenido de trióxido de azufre correspondiente a ese porcentaje de yeso.

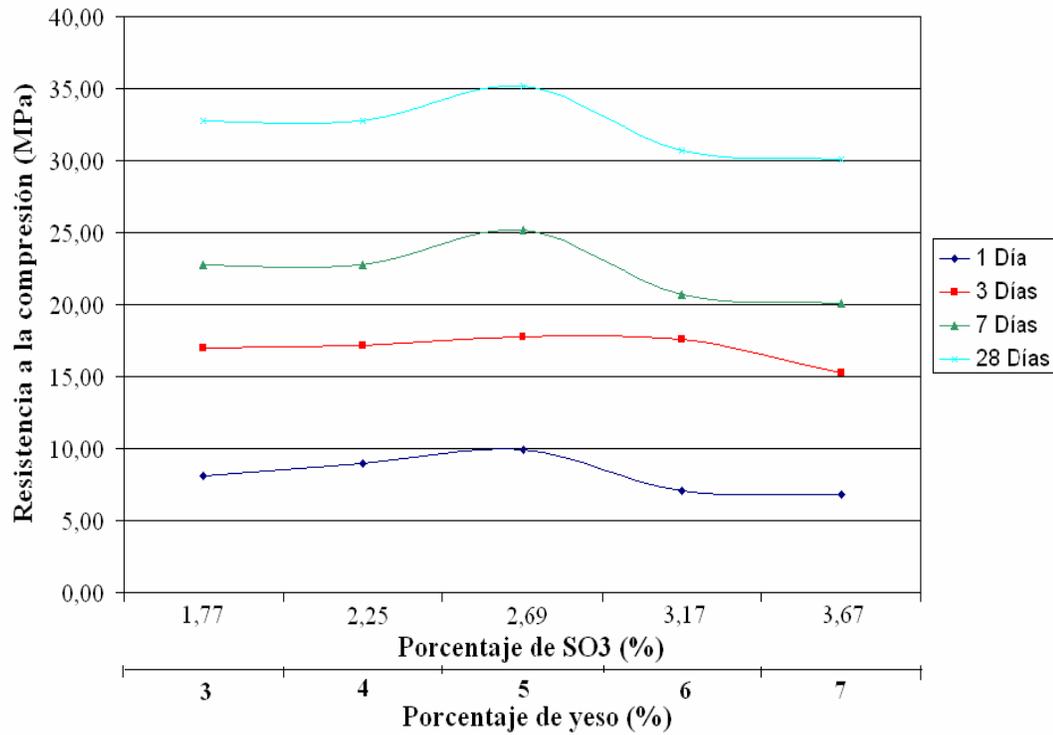


Figura N° 27: Resistencias a la compresión a diferentes edades en función del porcentaje de yeso añadido al cemento y su correspondiente porcentaje de trióxido de azufre.

En la gráfica se observa la tendencia característica del enyesado óptimo, en donde se muestra un aumento progresivo de la resistencia a la compresión a medida que se aumenta el porcentaje de yeso hasta llegar a un máximo y luego una caída de las resistencias, este comportamiento se observa a todas las edades. El máximo se presenta en un 5 % de yeso añadido al cemento, lo que equivale a un 2,69% de SO₃, por lo tanto ésta se considera la concentración óptima.

5.3. Molienda de cemento a nivel industrial

En los análisis de laboratorio hasta el 30% de sustitución del yeso sintético en el cemento da resultados dentro de las exigencias de la norma, sin embargo la empresa proveedora **TRIPOLIVEN** presenta una disponibilidad de un 20 % de sustitución del yeso en el cemento, por lo que la prueba industrial se realizó con el 20% de sustitución del yeso.

En la siguiente tabla se muestra los resultados de los análisis químicos de la prueba industrial, el yeso que posee las muestras provienen de un mezclado de 20% de yeso sintético y el resto yeso natural, solo se fue incrementando los porcentaje de yeso y en consecuencia los porcentajes de trióxido de azufre en el cemento, aumentando la cantidad de yeso en la muestra en búsqueda del enyesado óptimo.

5.3.1. Análisis químicos y físicos

- A continuación se presenta los resultados de los análisis físicos y químicos, elaborados a las muestras de la prueba industrial.

Tabla N°16: Análisis físicos y químicos de las muestras realizadas a nivel industrial

% Yeso		5	4,72	4,94	5,51	6,00	6,51	Especificación Interna	Norma COVENIN 3134
		(Testigo)							
Ensayos									
Análisis Químicos									
% SO₃ (fundido)		2,45	2,31	2,42	2,70	2,98	3,19	(2,2-2,7)	≤ 4
% SO₃ (prensado)		2,52	2,50	2,63	2,73	3,20	3,54		
% Pérdida al fuego		6,66	4,24	4,08	3,86	3,76	3,58	(3,80-4,20)	≤ 9
(%) CaO Libre		1,27	3,08	3,49	1,87	1,94	2,39	(0-2,3)	-
Análisis Físicos									
Finura	% Retenido Tamiz 45 µm	13,6	18,5	18,2	15,6	16,9	17,2	< 16,5	-
	% Retenido Tamiz 75 µm	3,3	5,1	5,4	4,2	4,2	4,6	< 4,5	-
Superficie Blaine (m²/Kg)		388	370	357	365	370	374	(355-395)	> 300
Fraguado Vicat Inicial (min)		145	143	141	169	174	180	-	> 45
Fraguado Vicat Final (min)		233	251	271	220	217	261	-	< 480
Expansión (%)		0,03	-	-	0,04	0,05	0,08	-	< 0,8

En los análisis químicos, se puede observar que los valores de trióxido de azufre no se encuentran bajo las especificaciones internas, debido principalmente a la realización del enyesado óptimo que consistió en un aumento progresivo del porcentaje de yeso en el cemento, aumentando los porcentajes de trióxido de azufre. En la tabla se reportan el porcentaje de trióxido de azufre (SO₃) tanto prensados como fundidos, ya que la pastilla prensada requiere de menos tiempo para su confección y nos da un indicio a nivel industrial de la cantidad de SO₃ añadida, la pastilla fundida nos confiere un resultado de mayor exactitud, ya que se homogeniza mejor la muestra. La pérdida al fuego de todas las muestras, se encuentran dentro de la especificación a excepción del testigo, ya que para el testigo se empleó una caliza que posee un porcentaje de pérdida mayor (>38%) con respecto a las demás muestras de cemento se empleo una caliza con un valor de pérdida de 26% por lo tanto la pérdida al fuego en cemento debe ser entre 3,80% y 4,20%. Las muestras que poseen un porcentaje de yeso de 4,72% y 4,94% poseen un alto contenido de cal libre, según la especificación interna de la empresa. Según la norma las muestras se encuentran dentro de rango establecido para pérdida al fuego y contenido de trióxido de azufre.

En los análisis físicos, todas las muestras poseen una superficie específica Blaine dentro de lo establecido por la norma. Los porcentajes de retenidos en los tamices son altos a excepción de la que posee un porcentaje de yeso de 5,51%. Los tiempos de fraguados iniciales de las muestras que poseen un porcentaje de yeso de 5,51%, 6,00%, y 6,51% son largos con respecto al blanco, esto es debido por el alto porcentaje de trióxido de azufre que poseen, sin embargo los tiempos de fraguados cumplen con la norma. La elongación de las muestras a ser sometidas a un autoclave cumplen con la norma Covenin 3134, no obstante, para las muestras con contenido de yeso de 4,72% y 4,94% no se logró tomar la elongación porque se expandieron y presentaron una consistencia porosa, por poseer un alto porcentaje de cal libre. Lo que ocurre es que el óxido de calcio sin combinar (cal libre) al combinarse con el agua presenta un aumento de volumen, como la hidratación es lenta el fenómeno se observa luego de algún tiempo cuando el cemento ha sido usado en obra.

Se observaron falsos fraguados en las muestras con 5,51%, 6,00% y 6,51% de yeso, esto se debe a que la temperatura de salida de esas muestras del molino oscilaron entre 120 y 124 °C, temperatura a la cual el yeso se deshidrata a hemhidrato. Lo anterior se explica porque existe un exceso de iones calcio en solución que no encuentra suficiente aluminato para reaccionar, precipitando en forma de yeso. El falso fraguado se rompe al reamasar, cuando la pasta de cemento retoma su consistencia. La obtención de falsos fraguados sustenta lo que se dijo anteriormente, que el yeso sintético posee la propiedad de deshidratarse más rápido, por lo que es más sensible a las temperaturas.

- En la siguiente tabla se muestra los resultados de las resistencias a la compresión a un (1) día, tres (3) días, a siete (7) días y veinte y ocho (28) días. De las muestras tomadas durante la prueba industrial.

Tabla N° 17: Resistencias a la compresión de las muestras realizadas a nivel industrial.

% Yeso Resistencias	5 (Testigo)	4,72	4,94	5,51	6	6,51	Especificación Interna	Norma COVENIN 3134
R1 Día (MPa)	9,4	10,7	8,3	10,8	11,1	10,0	(7,1-9,9)	-
R3 Días(MPa)	17,7	21,7	18,4	16,2	24,9	24,6	(15,4-18,6)	> 9,8
R7 Días(MPa)	24,0	25,2	24,7	22,6	27,7	27,5	(22,3-25,8)	>16,7
R28Días(MPa)	33,2	31,9	29,6	29,8	36,6	35,8	(29-33)	>27,4

Se puede observar que las resistencias a todas las edades se encuentran sobre las especificaciones mínimas que posee la empresa y la Norma Covenin 3134, sin embargo, algunas muestras sobrepasan los valores máximos establecidos internamente, pero la ganancia de resistencia no es un factor que influya negativamente en la calidad. Todas las muestras cumplen con los requisitos de resistencias exigidos por la norma para cemento con adiciones.

5.3.2 Enyesado óptimo o concentración óptima

• En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento de las resistencias a diferentes edades a medida que se aumenta el porcentaje de yeso en el cemento, donde este yeso posee un 20% de yeso sintético. También se muestra el contenido de trióxido de azufre correspondiente a ese porcentaje de yeso.

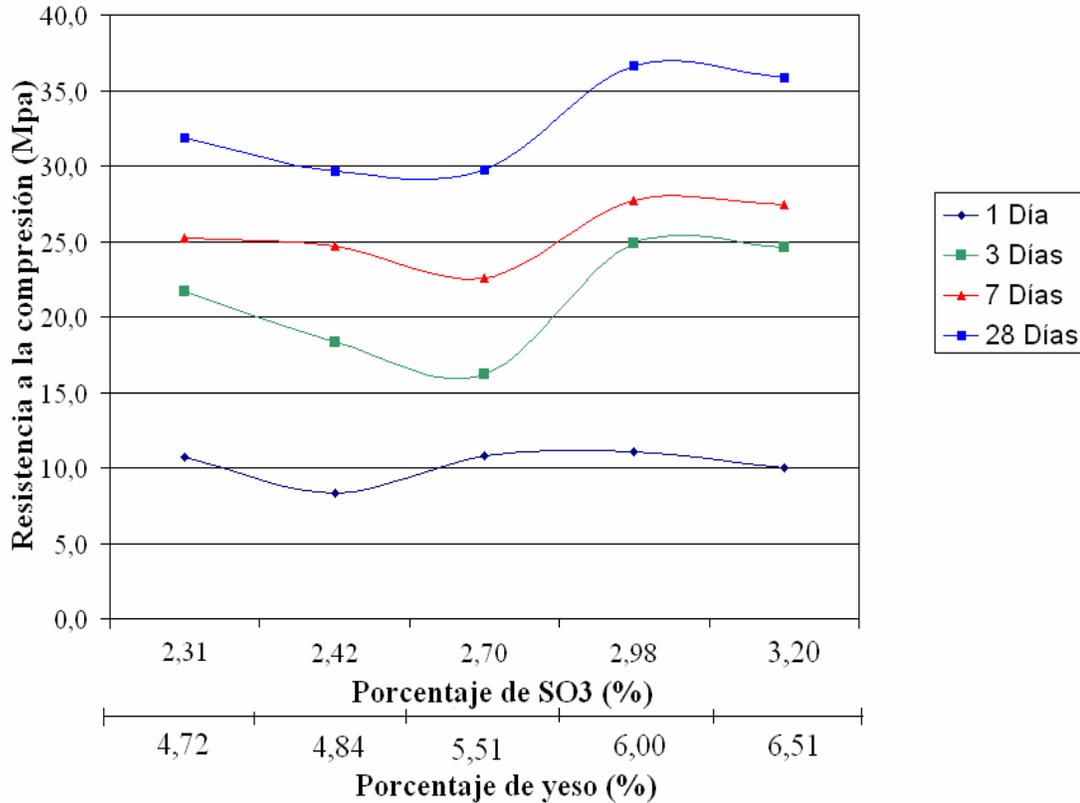


Figura N° 28: Resistencias a la compresión a diferentes edades en función del porcentaje de yeso añadido al cemento y su correspondiente porcentaje de trióxido de azufre.

En la gráfica se observan dos picos uno más pronunciado que otro, en donde con un 4,72% de yeso añadido (equivalente a un 2,31% de SO₃) se obtiene una resistencia de 31,9 MPa, el otro pico corresponde a un porcentaje de yeso de 6% (representa un porcentaje de SO₃ de 2,98 %) posee una resistencia de 36,6 Mpa. La concentración óptima sería aquella que genere mayor resistencia, lo cual corresponde a 6% de yeso, sin embargo, este porcentaje afecta la calidad del cemento presentando

un tiempo de fraguado muy largo como se muestra en la tabla N°16, en donde se observa que el tiempo inicial de fraguado es de 174 minutos y el final de 217 minutos, muy largo con respecto al blanco. El porcentaje de yeso de 4,72% genera resistencias acorde a la especificación interna, y no afecta el tiempo de fraguado, ya que posee un tiempo de fraguado inicial de 143 minutos y final de 251 minutos muy parecido al blanco (ver tabla N°16). Se tiene que ésta es la concentración óptima y no el 6% de yeso. Cabe destacar que la concentración óptima a nivel de laboratorio fue de 5% de yeso en el cemento, otro parámetro importante que fija la concentración de yeso óptima es el económico, con el 6% se presenta un costo anual de 7 \$/ (Ton cemento Eco Plus) y con 4,72% el costo anual es de 6 \$/ (Ton de cemento Eco Plus), por lo tanto emplear un 6% de yeso genera mayor gasto a largo plazo que emplear 4,72 % yeso.

5.3.3 Efecto en proceso

Existen diferentes parámetros que permiten monitorear el comportamiento del molino (ver apéndice D) durante su operación como lo son:

- La *temperatura* de entrada y salida del material (cemento) al molino, este nos permite controlar la deshidratación del yeso durante la molienda.
- El *ruido del foláfono* nos da una referencia del grado de llenado del molino, ya que cuando está vacío genera mucho ruido por el choque de los cuerpos molidores y va disminuyendo el ruido a medida que se llena el molino.
- La *presión* de entrada y salida de los gases del molino, nos permite controlar la ventilación del molino por medio del ventilador de tiro.
- La *potencia del motor* y la *potencia de los elevadores* que dependen de la alimentación al molino.
- El porcentaje de apertura de la válvula que depende de la temperatura.
- La producción que presenta el molino depende de los cuerpos molidores y de la dureza del material.

De manera que estos parámetros no dependen de la naturaleza del yeso. En la prueba industrial se observó lo siguiente en los parámetros de monitoreo del molino: durante la operación del molino se presentaron altas temperaturas de salida del material del molino que oscilaron entre (120-124) °C, esto está influenciado por las altas temperaturas que presentan el clinker a la entrada del molino que pueden ser de 150°C o más altas y al calor generado en la operación del molino (fricción por impacto de los cuerpos moledores, ver apéndice G) esto no es un efecto del empleo del yeso sintético, sin embargo, como el yeso sintético es más fácil de moler que el yeso natural, en todo el sistema de molino de cemento 2 se observó una reducción de consumo energético en la molienda y trituración. En los demás parámetros no se observaron cambios con respecto a la operación con yeso natural. Cabe destacar otro parámetro importante en el proceso que es el almacenamiento del yeso, el yeso sintético se va a colocar en el patio de almacenamiento del yeso natural, y este no necesita de ampliación. Debido fundamentalmente a que la sustitución es del 20% o 30% de yeso natural por yeso sintético y que el patio de almacenamiento posee una capacidad másica de 90.000 Ton y para una producción de 1.200.000 Ton/año de cemento se utilizan unas 60.000 Ton. Por lo que se tiene un sobrediseño del patio admitiendo una carga más elevada de yeso. Las cantidades a emplear para la producción de cemento Eco Plus de 20% de adición de yeso sintético, es de 6.780 Ton y para el 30% es de 10.170 Ton, sin embargo, para el almacenaje debe tomarse en cuenta que el yeso natural posee mayor peso unitario que el yeso sintético, lo que implica que para la misma masa se necesitará más cantidad de yeso sintético en comparación con la yeso natural y por lo tanto se necesitará mayor espacio para cantidades mayores. (Ver apéndice E).

En resumen el yeso no tiene un fuerte impacto sobre el proceso más si lo tiene sobre el producto.

6. Análisis económico

En el siguiente cuadro se muestra el análisis económico, realizando una comparación del empleo de yeso natural puro añadido al cemento con respecto al yeso añadido al cemento que contiene un 20% de yeso sintético y el 80% natural.

Tabla N° 18: Análisis económico del empleo de yeso natural y del empleo de yeso sintético en la fabricación del cemento Pórtland.

<i>Variables</i>	<i>Yeso Natural</i>	<i>20% Yeso Sintético</i>
Costo unitario de la materia prima (\$/Tn)	84,47	63,91
Costo total de la materia prima (\$/año)	2.863.624,24	2.724.188,69
Costo de operación (Costos del consumo eléctrico por equipo) (\$/año)		
<i>Alimentador vibratorio</i>	151,30	151,3
<i>Trituradora N° 2</i>	4182,75	3806,37
<i>Elevador N° 6</i>	1540,55	1540,35
<i>Cadena de arrastre N° 1</i>	1210,43	1210,43
<i>Cadena de arrastre N° 2</i>	1210,43	1210,43
<i>Dosificador pendan</i>	12,50	12,5
<i>Cinta alimentadora de yeso</i>	93,78	93,78
<i>Elevador alimentación a molino de cemento 2</i>	2470,89	2470,89
<i>Molino Cemento 2</i>	476271,06	475830,1
Total Costo de operación (\$/año)	487.143,72	486.326,37
Costos de mantenimiento (\$/año)	817.073,26	817.073,26
Total costos anuales (\$/año)	4167841,21	4027588,32
Ahorro (\$/año)	140.252,90	

En la tabla anterior se observa que existe una diferencia de costo unitario de la materia prima, esto se debe principalmente a que el yeso español es un producto importado por lo que su costo involucra el precio del producto, el flete terrestre, flete marítimo, y la tasa portuaria, en cambio el yeso sintético por ser un subproducto de una industria presenta un costo por tonelada de 36\$/Ton, y por su cercanía a la empresa (Morón, estado Carabobo) involucra solo al producto y al flete terrestre sin presentar gastos asociados a importación, teniendo un costo unitario de 64\$/Ton. En cuanto a los costos de operación se observó una disminución en el consumo de la trituradora y en la molienda. El costo en mantenimiento se consideró el mismo, ya

que se va realizar en el mismo período de tiempo que se emplea para yeso natural. Comparando ambos costos anuales, la que presenta menor costo es la opción de emplear un 20% de yeso sintético en el yeso total que conforma el cemento. Se presenta un ahorro de 140.252,90 \$ anuales por lo que se considera factible el uso de yeso sintético (fosfoyeso) en la fabricación del cemento Pórtland. Debido al costo de la materia prima, que es el que presenta mayor peso económicamente en el estudio, hay que tomar a consideración que este sería una variable crítica, en donde en un cambio de los precios, pueden repercutir en los costos anuales y puede cambiar la factibilidad del proyecto.

Cabe destacar que la cantidad de yeso a emplear, se obtuvo de la producción anual de cemento de la empresa que es 1.200.000 ton/año, lo cual se tomó un porcentaje típico de producción de cemento Eco plus de 56,5 %, obteniendo una cantidad de yeso anual de 33.900 ton/año. Lo cual el 20 % corresponde a yeso sintético esta cantidad es de 6.780 Ton/año y el 80% a yeso natural que equivale a 27.120 Ton /año. (Los diagramas de flujo se pueden encontrar en el apéndice F y el consumo eléctrico de cada equipo en el apéndice H).

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

En esta sección se presentan las conclusiones obtenidas al realizar este Trabajo Especial de Grado.

- El yeso sintético o fosfoyeso es más sensible a las altas temperaturas que el yeso natural, se deshidrata más rápidamente a temperaturas de (120-124) °C, obteniendo falsos fraguados.
- El yeso sintético difiere muy poco en composición química con respecto al yeso natural.
- El yeso sintético no presenta materia orgánica y una cantidad despreciable de fluoruros y fosfatos.
- En la medida que aumenta el porcentaje de yeso sintético en el yeso que conforma el cemento el tiempo de fraguado inicial y final aumenta.
- La cantidad de agua que demanda el cemento no varía considerablemente al aumentar las proporciones de yeso sintético en el cemento, este parámetro depende de la superficie específica que posee el cemento.
- La sustitución a nivel de laboratorio de hasta el 30% de yeso sintético en el yeso que conforma el cemento cumple con el tiempo de fraguado inicial y final establecido por la norma COVENIN 3134:” Cemento Pórtland con adiciones”.
- Las resistencias a 28 días cumplen con lo establecido con la norma Covenin 3134 y con las especificaciones internas de la empresa por lo que no se encuentra afectadas por el aumento del yeso sintético.

- Resistencias iniciales bajas a nivel de laboratorio al aumentar los porcentajes de yeso sintético en el yeso que conforma el cemento.
- A una mayor finura (aumento de la superficie Blaine y disminución de retenidos) los tiempos de fraguados se acortan y aumentan las resistencias.
- A nivel industrial el porcentaje de 20% de yeso sintético en 4,94% de yeso en el cemento presentó un comportamiento aceptable dentro de la norma en cuanto a tiempo de fraguado inicial y final y con respecto a las resistencias acorde a los resultados de laboratorio.
- La concentración óptima de yeso corresponde a 4,72% y equivale a un 2,31% de trióxido de azufre.
- El uso del yeso sintético no produce un impacto fuerte sobre el proceso de fabricación de cemento.
- La alternativa de emplear un 20% de yeso sintético en el cemento genera una reducción de costo de 140.253 \$/año con respecto al empleo del yeso natural en el proceso.

CAPITULO VII

RECOMENDACIONES

- Se recomienda que al realizar la molienda a nivel de laboratorio, del clinker, caliza y yeso, se muele el clinker primero hasta llegar a un porcentaje de retenido en los tamices dentro de especificación y luego molerlo en conjunto con la caliza y el yeso, ya que estos son más fáciles de moler que el clinker y de esta manera se hace el clinker más reactivo.
- Se recomienda repetir la prueba industrial, debido a que no todos los parámetros de control y calidad se llevaron durante el proceso, se presentó una elevada cal libre. Para observar la influencia del yeso sintético en el cemento todos los parámetros deben estar dentro del rango establecido en las consignas de calidad.
- Se recomienda que al realizar el sulfatado óptimo a nivel industrial, se debería realizar un mayor número de muestras para representar mejor la curva.
- Se recomienda tener un mayor control de las temperaturas en los molinos al momento de utilizar el yeso sintético como materia prima, para evitar la presencia de falsos fraguados en los cementos.

CAPÍTULO VIII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Altum, A y Sert, Y (2002). *Utilization of weathered phosphogypsum as set retarder in Portland cement*. Cement and Concrete Research. Disponible: www.sciencedirect.com. [Consulta: 2007, Julio 15]
2. Blank, L.T y Tarquin, A.J. (1999) *Ingeniería Económica*, 4ta ed. Bogotá. Mc Graw Hill. 740p.
3. CZernin, W. (1963). *La química del cemento*. Barcelona. Ediciones palestra. 173p.
4. Duda, W. (1977). *Manual tecnológico del cemento*. Barcelona. EDITORES TÉCNICOS ASOCIADOS. 332p.
5. Fábrica Nacional de Cementos (F.N.C). (1993). *Físico química del cemento*. Ocumare del Tuy: Información técnica.
6. Fábrica Nacional de Cementos (F.N.C). (1995). *Tecnología del cemento*. Ocumare del Tuy: Información técnica.
7. Fábrica Nacional de Cementos (F.N.C). (1996). *Tecnología de la molienda*. Ocumare del Tuy: Información técnica.
8. Fabrica Nacional de Cementos (F.N.C). (2001). *Conocimiento del proceso de producción del cemento*. Ocumare del Tuy: Información técnica.
9. Fritz, K. (1973). *Cemento. Fabricación - Propiedades - Aplicaciones*. Barcelona: EDITORES TÉCNICOS ASOCIADOS. 483p.
10. Gomá, F. (1979). *El cemento Pórtland y otros aglomerantes: Fundamentos para la interpretación de su comportamiento en obra*. Barcelona: EDITORES TÉCNICOS ASOCIADOS. 232p.
11. Lafarge Coppee. (1991). *Enseñanza Asistida por Ordenador (E.A.O)*. Ocumare del Tuy: Unidad de Formación.
12. Lafarge (2001). *Cuadernos técnicos, producto*. Ocumare del Tuy: Información técnica.

13. McCrindle, R. I. y otros (2003). *A comparison of the performance of various synthetic gypsums in plant*. Cement and Concrete Research. Disponible: www.sciencedirect.com. [Consulta: 2007, Julio 11]
14. Porrero, J. y otros. (2004). *Manual del concreto estructural*. Caracas: SIDETUR. 503p.
15. Potgieter, J.H y Howell, S.S. (2001). *A plant investigation into the use of treated phosphogypsum as a set-retarder in OPC and an OPC/FLY ash blend*. Minerals Engineering. Disponible: www.sciencedirect.com. [Consulta: 2007, Julio 10]
16. Singh, M. (2001). *Treating waste phosphogypsum for cement and plaster manufacture*. Cement and Concrete Research. Disponible: www.sciencedirect.com. [Consulta: 2007, Julio 10]
17. Taher, M.A. (2007). *Influence of thermally treated phosphogypsum on the properties of Portland slag cement*. Resources Conservation & Recycling. Disponible: www.sciencedirect.com. [Consulta: 2007, Julio 15]
18. Tripoliven (TPV). (2003). Taller: Ácido fosfórico. Módulo I, principios básicos del proceso. Morón: Información técnica.

CAPÍTULO IX

APÉNDICES

APÉNDICE A. NORMA COVENIN 3134: “CEMENTOS PÓRTLAND CON ADICIONES”

I.C.S	NORMA VENEZOLANA CEMENTO PÓRTLAND CON ADICIONES	PROYECTO COVENIN
-------	--	---------------------

1 OBJETO

- 1.1 Esta norma Venezolana establece los requisitos mínimos a ser cumplidos por los cementos Pórtland con adiciones, para ser usados en la producción de concretos y morteros para usos específicos.
- 1.2 Dadas las características particulares de estos cementos, con relación al grado de finura, la resistencia a la compresión y el calor de hidratación, es necesario determinar el producto específico para cada aplicación.

2 REFERENCIAS NORMATIVAS

Las siguientes normas contienen disposiciones que al ser citadas en este texto, constituyen requisitos de esta Norma Venezolana. Las ediciones indicadas en vigencia en el momento de esta publicación. Como toda norma está sujeta a revisión, se recomienda a aquellos que realicen acuerdos con base en ellas, que analicen la conveniencia de usar ediciones más recientes de las normas seguidamente.

2.1 Normas Venezolanas COVENIN

COVENIN 109:1990 Cementos hidráulicos. Métodos de ensayo para análisis químicos

COVENIN 483:1992 Cemento y sus constituyentes. Definiciones

COVENIN 484:1993 Cemento Pórtland. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros, en probetas de 50,8 mm de lado.

COVENIN 487: 1993 Cemento Pórtland. Método de ensayo para determinar la finura por medio del aparato Blaine de permeabilidad.

COVENIN 490:1994 Cementos hidráulicos. Métodos para muestreos y cantidades de pruebas. Registro de calidad.

COVENIN 491:1994 Cemento Pórtland. Determinación de la expansión en autoclave.

COVENIN 492: 1994 Cemento Pórtland. Determinación de la densidad real.

COVENIN 493: 1992 Cemento Pórtland. Determinación del tiempo de fraguado por la aguja Vicat.

COVENIN 494: 1994 Cemento Pórtland. Determinación de la consistencia normal.

COVENIN 495: 1992 Cemento Pórtland. Determinación del calor de hidratación.

COVENIN 935: 1976 Cementos. Especificaciones para cemento Pórtland escoria.

COVENIN 2503: 1990 Arena normalizada para ensayo de cemento. Requisitos.

COVENIN 3133-1: 2001 Procedimientos de muestreo para inspección por atributos. Parte 1: Esquemas de muestreo indexados por nivel de calidad de aceptación (NCA) para inspección lote por lote.

COVENIN 3135: 1994 Puzolanas. Determinación del índice de actividad puzolánica.

COVENIN ISO 9001: 2000 Sistemas de gestión de calidad. Requisitos.

3. DEFINICIONES

Para los propósitos de esta Norma Venezolana se aplican las siguientes definiciones:

3.1 CEMENTO PÓRTLAND CON ADICIONES

Es el producto obtenido por la pulverización conjunta de clinker Pórtland y otros materiales como caliza, cenizas volantes, puzolanas, con adición de agua y sulfato de calcio, para ser usados en la producción de concretos y morteros para usos específicos.

3.2 CEMENTO PÓRTLAND CON ADICIÓN DE CALIZA O MATERIALES CALCÁREOS

Es el producto obtenido por la pulverización conjunta de clinker Pórtland y caliza o materiales calcáreos, con la adición de agua y sulfato de calcio, para ser usados en la producción de concretos y morteros que requieran características tales como: estabilidad, durabilidad, plasticidad, adherencia y capacidad de retención de agua.

3.3 CEMENTO PÓRTLAND CON ADICIÓN DE PUZOLANA

Es el producto obtenido por la pulverización conjunta de clinker Pórtland y puzolana con la adición de agua y sulfato de calcio, para ser usados en la producción de

concretos y morteros que requieran características tales como: moderado o bajo calor de hidratación, baja contracción térmica, buena trabajabilidad, resistencia al ataque de los sulfatos y el agua de mar.

3.4 CEMENTO PÓRTLAND CON ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTES

Es el producto obtenido por la pulverización conjunta de clinker Pórtland y cenizas volantes, con la adición de agua y sulfato de calcio, para ser usados en la producción de concretos y morteros que requieran características tales como: moderado calor de hidratación, alta resistencia a los sulfatos y agua de mar y buena trabajabilidad.

3.5 CEMENTO PÓRTLAND CON ADICIÓN DE ESCORIA

La Norma Venezolana COVENIN 935 establece la definición de este tipo de cemento.

3.6 Cualquier definición adicional puede ser consultada en la Norma Venezolana 483.

4. CLASIFICACIÓN

La clasificación de los cementos con adiciones se efectúa de acuerdo al tipo de material de adición. Estos se resumen en la tabla 1. Clasificación de los cementos con adición.

4.1 CEMENTO PÓRTLAND CON ADICIÓN DE CALIZA CPCA1

Es aquel cuyo contenido de caliza u otro material calcáreo es menor o igual al 15% del peso total.

4.2 CEMENTO PÓRTLAND CON ADICIÓN DE CALIZA CPACA2

Es aquel cuyo contenido de caliza u otro material calcáreo es mayor a 15 % y menor o igual al 30% del peso total.

4.3 CEMENTO PÓRTLAND CON ADICIÓN DE PUZOLANA CPPZ1

Es aquel cuyo contenido de puzolana es mayor al 5% y menor o igual al 15% del peso total.

4.4 CEMENTO PÓRTLAND CON ADICIÓN DE PUZOLANA CPPZ3

Es aquel cuyo contenido de Puzolana es mayor al 30% y menor igual al 40 % de peso total.

4.6. CEMENTO PÓRTLAND CON ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTES CPCV

Es aquel cuyo contenido de cenizas volantes es mayor al 5% y menor o igual al 40% del peso total.

TABLA 1 Clasificación de los elementos con adiciones

% EN PESO				
Tipo de cemento	% clinker + % yeso	% Caliza	% Puzolana	% Cenizas Volantes
CPCA1	85	% ≤ 15	-	-
CPCA2	85-70	15 < % ≤ 30	-	-
CPPZ1	95-85	-	5 < % ≤ 15	-
CPPZ2	85-70	-	15 < % ≤ 30	-
CPPZ3	70-60	-	30 < % ≤ 40	-
CPCV	95-60	-	-	5 < % ≤ 40

5. REQUISITOS

5.1 QUÍMICOS

El cemento Pórtland con adiciones de cada uno de los tipos mencionados, debe cumplir con los requisitos químicos indicados en la tabla 2.

5.2 FÍSICOS

El cemento Pórtland con adiciones de cada uno de los tipos mencionados, debe cumplir con los requisitos físicos indicados en la Tabla 3.

5.3 PUZOLANAS

La puzolana de adición debe cumplir con los requisitos establecidos en la Norma Venezolana COVENIN 3135.

6. RELACIÓN CLIENTE PROVEEDOR

Es importante para la buena relación comercial entre fabricantes y usuarios, que los primeros faciliten información técnica del producto a los compradores, en el sentido de poder adaptar la transacción individual a los términos específicos de la norma COVENIN ISO 9001.

7. INSPECCIÓN Y RECEPCIÓN

Este capítulo está elaborado con el criterio de ofrecer una guía al consumidor para determinar la calidad de los lotes aislados a ser comercializados.

A menos que exista un acuerdo previo entre productor y comprador, la inspección y recepción del producto debe cumplir con lo establecido en el presente capítulo, por lo tanto los criterios aquí expuestos no se refieren al control interno de la planta, los cuales podrán ser utilizados sólo en casos de litigio.

7.1 LOTE

Es el conjunto de unidades de características similares o fabricados bajo condiciones de producción presumiblemente uniformes, que se someten a una inspección como un conjunto unitario.

7.2 MUESTRA

Es el grupo de unidades extraídas de un lote, con la finalidad de obtener la información necesaria para apreciar una o más características de ese lote, que servirán de base para definir la calidad especificada de ese lote.

7.3 MUESTREO

De las unidades que componen el lote, se tomarán al azar el número de unidades indicadas en la tabla 4, las cuales se someterán a los ensayos en las tablas 2 y 3.

8. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN O RECHAZO

8.1 Si el número de unidades defectuosas en la muestra (sacos) es igual o menor al número de aceptación indicado en la tabla 4, se aceptará el lote.

8.2 Si el número de unidades defectuosas en la muestra (sacos) es mayor al número de rechazo indicado en la tabla 4, se rechazará el lote.

8.3 El cemento que está almacenado durante unos 6 meses a granel o durante 3 meses almacenado en sacos en la fábrica, debe ser sometido a ensayos nuevamente antes del despacho si hay dudas de su calidad, será rechazado si no cumple con los requisitos contenidos en esta norma.

8.4 Los sacos que difieren en más de 5% del peso especificado, podrán ser rechazados.

9. MARCACIÓN, ROTULACIÓN Y EMBALAJE

9.1 Cuando el cemento se entrega en sacos, deben llevar indicada como mínimo la siguiente información:

9.1.1 La marca de fábrica y el nombre o razón social del fabricante

9.1.2 El peso neto de cemento.

9.1.3 El tipo de cemento

9.1.4 Fecha de envasado del cemento, o cualquier otro sistema que permita identificar el lote.

9.2 En caso de entregas a granel se especificarán estos mismos datos en las facturas de ventas o en otros documentos que acompañan el pedido.

BIBLIOGRAFÍA

ASTM C150-02 Standard Specification for Portland Cement. American Society for Testing and Materials.

CEMBUREAU Cement Standart of the World 1991.

Tabla 2 Requisitos químicos

Requisito	CPCA 1	CPCA 2	CPPZ 1	CPPZ 2	CPPZ 3	CPCV	Método de ensayo
Pérdida al fuego (PF) %	≤ 9,0	≤ 16,0	≤ 7,0	≤ 8,0	≤ 9,0	≤ 6,0	COVENIN 109
Trióxido de azufre SO ₃ %	≤ 4,0	≤ 4,0	≤ 4,0	≤ 4,0	≤ 4,0	≤ 4,0	COVENIN 109
Residuos insolubles (RI) %	≤ 4,0	≤ 6,0	-	-	-	-	COVENIN 109

Tabla 3 Requisitos físicos

Requisitos	CPCA1	CPCA2	CPPZ1	CPPZ2	CPPZ3	CPCV	Método de ensayo
Resistencia a la compresión Mpa (kg/cm ²) mínimo							
3 días	9,8 (100)	8,3(85)	8,3(85)	-	-	8,3(85)	COVENIN 484
7 días	16,7(170)	14,7(150)	14,7(150)	14,7(150)	9,8(100)	14,7(150)	
28 días	27,4(280)	24,5(250)	24,5(250)	24,5(250)	20,6(210)	24,5(250)	
FINURA (Superficie específica) mediante el ensayo de permeabilidad al aire (Blaine) m ² /Kg							
Mínimo	300	320	300	320	320	320	COVENIN 487
Estabilidad del volumen, mediante ensayo de expansión en autoclave							
(%) máximo	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	COVENIN 493
Tiempo de fraguado, mediante ensayo Vicat (min)							
Tiempo inicial mínimo	45	45	45	45	45	45	COVENIN 493
Tiempo final máximo	480	480	480	480	480	480	
Calor de hidratación (kj/kg) máximo							
7 días	-	-	-	290	250		COVENIN 495
28 días	-	-	-	-	-	290	

Tabla 4 Criterios de aceptación o rechazo. Muestreo de cemento ensacado

TAMAÑO DEL LOTE	TAMAÑO DE LA MUESTRA	(Ac) N° DE ACEPTACIÓN	(Re) N° DE RECHAZO
2 a 8	2	0	2
9 a 15	2	0	2
16 a 25	2	0	2
26 a 50	2	0	2
51 a 90	2	0	2
91 a 150	3	1	3
151 a 280	5	1	4
281 a 500	8	2	5
501 a 1200	13	3	6
1201 a 3200	20	5	8
3201 a 10000	32	7	10
10001 a 35000	50	10	13
35001 a 150000	80	10	13
150001 a 500000	125	10	13
500001 o más	200	10	13

Para la elaboración de esta tabla se utilizó la Norma COVENIN 3133-1 Tabla I, Nivel I y la Tabla II-C con NCA (Nivel de calidad aceptable)= 10%.

APÉNDICE B. INSTRUCTIVOS DE TRABAJO PARA REALIZAR LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

Apéndice B1. Cuarteo mecánico

- Seleccionar la naturaleza y la cantidad del material a cuartear.
- Triturar la muestra hasta un tamaño pasante de 1/2 pulgada.
- Colocar la muestra dentro de una de las tres bandejas del equipo cuarteador. Las otras dos bandejas se colocan debajo del cuarteador para recibir el material.
- La descarga desde la bandeja debe hacerse a todo lo largo de ésta y cubrir toda la dimensión a lo largo del cuarteador. El equipo separa el material en dos corrientes de flujo que se recibe en las otras dos bandejas.
- Para un segundo paso del cuarteo tomar como muestra una de las dos bandejas donde se recibió el material del primer cuarteo. Rechazar el material de la segunda muestra.
- Volver a colocar dos bandejas vacías debajo del cuarteador.
- Con la bandeja que seleccione como muestra repetir la descarga de la muestra a lo largo del cuarteador y los pasos siguientes, hasta obtener la cantidad de muestra cuarteada requerida para los posteriores análisis.

Apéndice B2. Determinación de Agua Libre del yeso

- Tomar 5 Kg. aproximadamente del material.
- Triturar las piedras grandes hasta reducir las a un tamaño aproximado de 1/2 pulgada.
- Realizar un cuarteo mecánico, hasta obtener 100 g aproximadamente.
- Pesar en gramos la bandeja en la que se realizará el secado (P0).
- Tarar la bandeja.
- Pesar 100,00 g. de material triturado (P1), sobre la bandeja previamente tarada.
- Introducir la bandeja en la estufa a 45 °C, durante 2 horas.
- Sacar de la estufa y dejar enfriar dentro del desecador a temperatura ambiente.

- Pesar la bandeja con la muestra (P2).
- Calcular la **Humedad del Yeso o Agua Libre** por la expresión:

$$\text{Humedad del Yeso (\%)} = \frac{(P0 + P1 - P2) * 100}{P1}$$

- El resto de la muestra seca se utilizará para realizar el agua combinada y los análisis químicos correspondientes, esta muestra seca se debe pasar por el molino HERZOG para reducir su tamaño a micropartículas antes de realizar el agua combinada.

Apéndice B3. Determinación del Agua Combinada del yeso

- Pesar 1,0000 g de la muestra (P1), secada en el punto anterior, en un crisol de porcelana seco (P0).
- Secar hasta peso constante á 230 °C, enfriar en el desecador. Pesar en el crisol (P2).
- Calcular el Agua Combinada por la expresión:

$$\text{Agua Combinada (\%)} = \frac{(Po + P1 - P2) * 100}{P1}$$

- Después de realizar los ensayos se deberán reportar los resultados realizando los cálculos especificados a continuación:

$$\% \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \% \text{Agua Combinada} \times 4,778.$$

$$\% \text{SO}_3 \text{ (Yeso)} = \% \text{Agua Combinada} \times 2,222.$$

$$\% \text{SO}_3 \text{ (Anhidrita)} = \% \text{SO}_3 \text{ (Complexometría o Rayos X)} - \% \text{SO}_3 \text{ (Yeso)}.$$

$$\% \text{CaSO}_4 = \% \text{SO}_3 \text{ (Anhidrita)} \times 1,700.$$

$$\% \text{CaO (Yeso)} = \% \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \times 0,3257.$$

$$\% \text{CaO (Anhidrita)} = \% \text{CaSO}_4 \times 0,4119.$$

$$\% \text{CaO (Carbonato de Calcio)} = \% \text{CaO (Complexometría o Rayos X)} - [\% \text{CaO (Yeso)} + \% \text{CaO (Anhidrita)}].$$

$$\% \text{CaCO}_3 = \% \text{CaO (Carbonato de calcio)} \times 1,785.$$

$$\% \text{MgCO}_3 = \% \text{MgO (Complexometría o Rayos X)} \times 2,091.$$

Apéndice B4 Análisis químico complexométrico

Materiales tales como calizas puras, clinker, yeso, cemento y escorias, son fácilmente atacados por ácidos, pudiendo insolubilizarse posteriormente la sílice por evaporación a sequedad quedando el resto de los componentes soluble en agua.

MODO OPERATORIO.

Pesar dos (2,0000) gramos de material e introducirlos en un vaso de 250 *ml*.

- Añadir unas gotas de agua destilada.
- Proveerse de un agitador de vidrio, y un vidrio de reloj.
- Añadir diez, (10) ml de ácido perclórico y remover hasta disolver los granos.
- Poner en baño de arena, retirarlo después de 20 minutos de tratamiento.
- Después que el vaso esté frío, añadir ciento cincuenta (150) *ml* de agua destilada caliente y diez (10) ml de ácido clorhídrico.
- Agitar y filtrar (filtro N° 41) en un balón aforado de 500 ml.
- Lavar el vaso con agua caliente (varias veces) para quitar la sílice y pasar ese lavado por el filtro de papel.
- En el filtrado se dosificarán los otros elementos.
- Calcinar el filtro de papel con el precipitado durante una hora a 1000 °C (ó a 1075 °C por media hora), en un crisol de platino. Retirar el crisol, enfriarlo dentro del desecador y pesarlo después.
- Sea P_o el peso del crisol vacío y P_f el peso del crisol con el precipitado.
- Luego el % SiO viene dado por:
$$\% \text{ SiO}_2 = (P_f - P_o) \times 100/2$$
- Dejar enfriar el filtrado
- Aforar con agua destilada hasta 500 ml y homogeneizar.

El filtrado obtenido de la separación de la sílice, llevado a 500 ml, contiene todos los cationes que van a ser analizados por complexometría, y en él puede determinarse también el SO_3 . Para la titulación complexométrica, se toman alícuotas de 50 ml, y se procede a enmascarar o bloquear los cationes que no son de interés, titulándose los que se desean. Un esquema del Procedimiento se muestra en la siguiente figura.

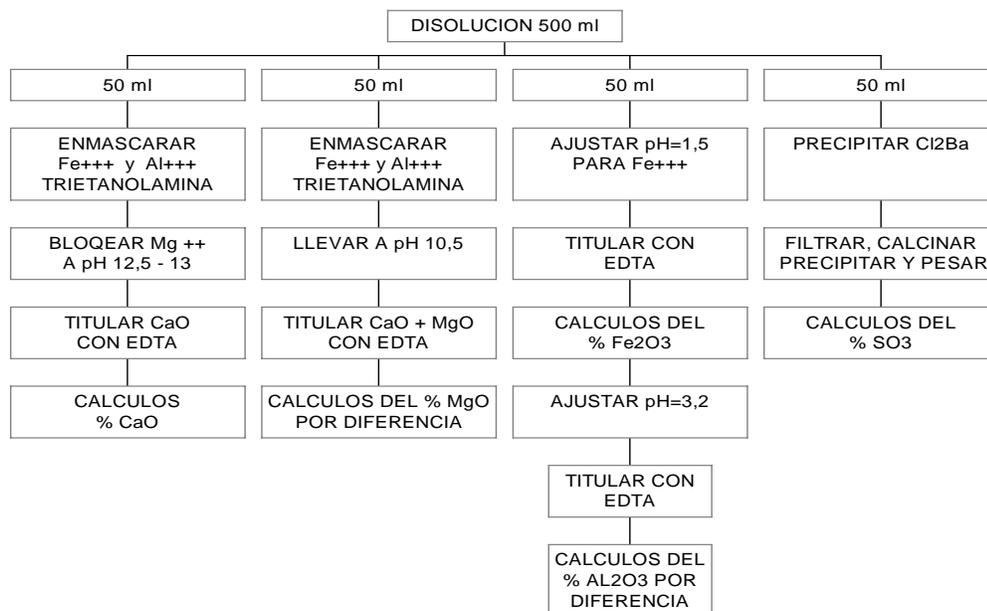


Figura N° 29: Esquema del procedimiento complexométrico

DOSIFICACION DE CaO

PRINCIPIO

La formación del complejo EDTA/ Ca^{++} empieza a $\text{pH} = 10$. A este pH , todos los iones se complejan; se eliminan los iones molestos excepto Mg^{++} enmascarándolos con trítanolamina.

La dosificación del calcio solo sucede a $\text{pH}=13$. A este PH , hay formación de hidróxido de magnesio $\text{Mg}(\text{OH})_2$ que precipita. Conviene añadir la calceína poco antes del viraje para evitar su oxidación prematura.

PREPARACION DE LOS REACTIVOS

1. ANARANJADA DE METILO

- Pesar 5 mg. de anaranjado de metilo.
- Trasladar a un vaso de 250 ml.
- Añadir 50 ml de agua fría.
- Usar un agitador magnético hasta la disolución, completa.
- Pasar a un cuenta gotas de 125 ml.

2. MEZCLA DE CALCEINA

- Pesar 100 mg de calceína.
- Trasladar a un mortero.
- Añadir 50 mg de timolftaleina y 10 gr. de NaCl.
- Pulverizar.
- Conservar dentro una botellita de polietileno

3. TRIETANOLAMINA 1/2

Sirve para enmascarar Fe_2O_3 y Al_2O_3

- 500 ml de Trietanolamina.
- Completar a 1 litro con agua fría
- Homogeneizar

4. NaOH 2N

- Pesar 160 gr de NAOH en perlas.
- Trasladar a un vaso de 1000 ml.
- Añadir 500 ml de agua.

- Trasladar a una botella de 2 litros.
- Completar con agua destilada.
- Enfriar sobre corriente de agua fría.
- Homogeneizar.

DOSIFICACION

- Pipetear 50 ml de solución (salida del filtrado del ataque de la muestra).
- Trasladar a un vaso de 500 ml conteniendo una barra magnética.
- Añadir 300 ml de agua.
- Poner sobre un agitador magnético.
- Añadir unas gotas de anaranjado de metilo. Aparición de una coloración rosa. Neutralizar con NH_4OH 50% hasta $\text{pH} = 4,4$ coloración amarilla.
- Añadir 15 ml de tritanolamina 1/2 para enmascarar Fe_2O_3 y Al_2O_3 . Se forma un nuevo complejo con trietanolamina el cual no interferirá en la dosificación.
- Añadir 40 ml de NaOH 2N. Verificar el pH. Para una fusión alcalina es necesario poner una cantidad más importante de NaOH . El pH debe quedar en 12,5 - 13,0.
- Verter EDTA. Sea n este volumen.
- Para un crudo clinkerizado, un clinker, un cemento se puede verter 50 ml de EDTA más o menos.
- Añadir trazas de mezcla de calceína.
- El viraje se alcanza cuando la calceína pasa del verde al azul.
- Esta coloración indica la desaparición de los iones Ca^{++}

NOTA: Para la arcilla, marga o arena se debe añadir la calceína al comienzo.

RESULTADOS

1 ml de EDTA = 2 mg de CaO = 1% de CaO.

La dosificación se hace sobre 200 mg de materia

N1 : número de ml de EDTA gastados.

T : Título de EDTA

$$\% \text{ CaO} = \text{N1} \times \text{T} \times \frac{2}{2}$$

1 ml de EDTA corresponde a 2 mg de CaO.

Como hemos tomado 2 gr de material y los hemos llevado a 500 ml, 50 ml de solución corresponden a 0,2 g. de material. Se debe dividir por 2 para llevar a 0,1 g. y deducir el porcentaje.

DOSIFICACION DE MgO

PRINCIPIO

La dosificación se efectúa a pH= 10 después que Fe₂O₃ y Al₂O₃ sean enmascarados. A este pH se dosifica la totalidad de los iones Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺ se deduce el contenido de MgO por diferencia con la titulación de CaO.

PREPARACION DE LOS REACTIVOS

1. INDICADOR DE MgO:

- Pesar 50 mg de púrpura de Ftaleína
- Pesar 10 mg de anaranjado de metilo.
- Pesar 15 mg de verde de naftol.
- 40 - 75 ml de trietanolamina y 40 ml H₂O destilada.
- Trasladar a un vaso de 250 ml.
- Disolver utilizando un agitador magnético.
- Trasladar a una cuenta gotas de polietileno.

DOSIFICACION

- Pipetear 50 ml de solución (salida del ataque de la sílice).
- Trasladar a un vaso de 500 ml.
- Añadir 300 ml de agua destilada fría.
- Poner sobre un agitador magnético.
- Añadir 15 ml de tritanolamina 1/2
- Añadir 10 ml de NH₄OH puro.
- A este nivel el pH es de 10,5.
- Verificar con el medidor, de pH.
- Verter el EDTA, que corresponde a la titulación de CaO.
- Añadir unas gotas del indicador de MgO (coloración violeta).
- Verter EDTA gota a gota hasta el cambio del indicador, es decir cuando se obtiene el viraje al amarillo pajizo. Sea N₂ este volumen.

RESULTADOS

1 ml de EDTA corresponde a 1,44 mg de MgO. La dosificación se hace sobre 200 mg de materia.

T = Título de la solución de EDTA.

N₂ = Volumen de EDTA vertido para CaO y MgO.

N₁ = Volumen de EDTA vertido para CaO.

$$\% \text{ MgO} = (N_2 - N_1) \times T \times 1,44/2$$

Hemos puesto 2 g de materia dentro de 500 ml, 50 ml de solución corresponden a 0,2 g de materia. Hay que dividir por 2 para llevar a 0,1 g y deducir el porcentaje.

DOSIFICACION DE Fe₂O₃

PRINCIPIO

Dosificación sobre forma férrica. Formación de un ión complejo Fe⁺⁺⁺ / EDTA a pH 1,5. Solo Fe⁺⁺⁺ se compleja con EDTA. Los otros quedan en solución y no molestan la titulación.

OBSERVACIONES

- No se debe exceder una temperatura de 50 °C
- Es importante respetar el pH de 1,5.
- Conservar el contenido del vaso después de la dosificación, el cual va a servir para la titulación de Al₂O₃
- Oxidar la solución del ataque con nitrato de NH₄⁺

PREPARACION DE LOS REACTIVOS

1. AZUL DE BROMOFENOL

- Sirve como seña para obtener el pH de complexación de Fe₂O₃ y Al₂O₃
- Pesar 50 mg de azul de bromofenol.
- Trasladar a un vaso de 250 ml.
- Añadir 50 ml de alcohol etílico.
- Poner sobre un agitador magnético hasta la disolución completa.
- Trasladar a un cuenta gotas.

2. ACIDO SALICILICO.

- Sirve como indicador del hierro
- Pesar 25 g. de ácido salicílico.
- Pesar 7,5 g. de NaOH en perlas.

- Trasladar a un vaso de 500 ml el cual contiene 300 ml de agua.
- Poner sobre una plancha eléctrica.
- Agitar con un agitador de vidrio hasta la disolución total
- Enfriar y conservar dentro de un cuenta gotas.

3. SOLUCION DE NH₄OH 25%

Sirve para obtener el pH de complexación de Fe₂O₃

- Medir 75 ml de H₂O.
- Medir 25 ml de NH₄OH.
- Trasladar a un cuenta gotas.

4. SOLUCION DE HCl N/10

Sirve para obtener el pH de complexación de Fe₂O₃ y para preparar la solución Patrón pH = 1,5.

- Trasladar 10 ml de HCl puro a un balón aforado de 1000 ml agregando previamente 400 ml de agua.
- Enfriar.
- Completar hasta la marca del aforo.
- Homogeneizar la solución.

5. SOLUCION PATRON pH 1,5.

- Pesar 7,505 g. de Glyococolle (Glicine).
- Pesar 5,85 g. de NaCl.
- Trasladar a un vaso de 500 ml que contiene 300 ml de agua destilada.
- Calentar un poco hasta la disolución.
- Trasladar a un balón aforado de 1000 ml.

- Enfriar.
- Completar.
- Homogeneizar.
- Mezclar 300 ml de esta solución y 700 ml de la solución de HCl *N/10*.
- Homogeneizar.
- Tenemos la solución pH 1,5.

DOSIFICACION

- Pipetear 50 ml de solución salida del ataque de la sílice.
- Añadir 2 gotas de azul de bromofenol (la solución se tornará de color amarillo suave).
- Añadir un termómetro.
- Añadir 50 ml de agua destilada fría.
- Calentar hasta 50 °C.
- Pasar el pH de la solución a 1,5 utilizando NH₄OH 50% o HCl 50 %.
- Añadir 15 ml de solución patrón a pH 1,5.
- Añadir 15 o 20 gotas de ácido salicílico.
- Verter EDTA hasta la desaparición del color violeta (coloración igual a la inicial).

NOTA: La titulación se realiza entre 30 y 40°C, no se debe exceder 50°C pues a más de esta temperatura no se puede separar Fe₂O₃ y Al₂O₃.

El viraje final, amarillo débil es sensible a la gota. Esta coloración es debida al bromofenol; es necesario al comienzo de la titulación no exceder 2 gotas de indicador azul de bromofenol; sea N4 ml el volumen de EDTA consumido en la titulación.

RESULTADOS

1 ml de EDTA corresponde a 2,848 mg de Fe_2O_3

Sea N4 el volumen de EDTA vertido, sea T el título de la solución de EDTA

$$\% \text{Fe}_2\text{O}_3 = N4 \times T \times 2,848/2.$$

$$\% \text{Fe}_2\text{O}_3 = N4 \times T \times 1,424.$$

Ver los cálculos de la dosificación anterior

DOSIFICACION DE Al_2O_3

PRINCIPIO

Formación de un complejo EDTA/Al a pH 3,2. A este pH la estabilidad del complejo es máxima, pero a este pH el Fe_2O_3 esta ya complejado. Por eso, se titula Al_2O_3 después de la dosificación de Fe_2O_3 dentro de la misma solución; por diferencia se puede deducir Al_2O_3 .

La titulación de Al_2O_3 da por complexometría una dosificación mas precisa, que no es alterada, por ningún otra elemento; es decir, titanio, fósforo, manganeso, como ocurre en la dosificación gravimétrica.

PREPARACION DE LOS REACTIVOS

1. ACETATO DE AMONIO

Solución a 250 g/L para obtener el pH de complexación de Al_2O_3

- Disolver 250 g. de acetato de NH_4^+ con agua destilada dentro de un vaso de 500 ml.
- Trasladar a un balón aforado de 1000 ml.
- Completar y homogeneizar.
- Trasladar a un cuenta gotas.

2. P.A.N.

PYRIDIL ____ 2, AZO ____ 1, NAFTOL ____ 2 Indicador de Al_2O_3

- Pesar 50 mg de P.A.N.
- Pesar 50 ml de alcohol etílico.
- Trasladar a un vaso de 250 ml.
- Colocar un agitador magnético hasta la disolución.
- Trasladar a un cuenta gotas de polietileno.

3. COMPLEXONATO DE COBRE

3.1 SOLUCION SÓLIDA DE MUREXIDA

Indicador para preparar la solución de complexonato de cobre

- Pesar 250 mg de murexida.
- Pesar 25 g. de NaCl.
- Trasladar a un mortero ágata.
- Triturar.
- Conservar dentro de una botella de polietileno.

3.2 SOLUCION DE SULFATO DE COBRE 0.1 N

- Pesar la cantidad indicada a continuación:

$CuSO_4$ Anhidro: 2,00 g.

$CuSO_4 \cdot 2 H_2O$: 2,45 g.

$CuSO_4 \cdot 5 H_2O$: 3,125 g.

- Nota: Considerar la pureza en la etiqueta y ajustar el cálculo.
- Trasladar a un vaso de 600 ml que contiene 150 ml de agua destilada.
- Disolver calentando suavemente.

- Trasladar a un balón aforado de 250 ml.
- Enfriar a temperatura ambiente.
- Completar a 250 ml con agua destilada.
- Homogeneizar.

3.3 DOSIFICACION DE LA SOLUCION DE CuSO_4 0,1 N.

- Pipetear 10 ml de solución CuSO_4 0,1N.
- Trasladar a un, vaso de 500 ml y añadir 200 ml de agua.
- Añadir 10 ml de NH_4OH .
- Añadir 0,1 g. de solución sólida de murexida, coloración rosa.
- Verter EDTA utilizando un agitador magnético hasta el viraje violeta.
- Sea N5 ml el EDTA vertido.
- Tomar 200 ml de CuSO_4 0,1N.
- Trasladar a un balón aforado de 500 ml EDTA que se debe añadir

$$\frac{N5 \times 200}{10} = N \text{ ml}$$

10

- Añadir N ml de EDTA exactamente para obtener una solución CuSO_4 exactamente complejada.
- Conservar la solución dentro de una botella de polietileno.

DOSIFICACION

- Tomar la solución de Fe_2O_3 .
- Llevar al pH 3.6 con acetato de amonio (viraje azul de bromofenol)
- Obtener un pH =3,2 con ácido acético. Por efecto tapón el pH se encuentra fijado.
- Se obtiene aquí el máximo de estabilidad del complejo EDTA/ Al_2O_3 .

- Añadir unas gotas de complejo de cobre. La presencia de cobre determina la coloración violeta debida al P.A.N., con Al_2O_3 . El complexonato de cobre está ya complejado y no molesta a la dosificación.
- Añadir 10 gotas de P.A.N.
- Se obtiene una coloración violeta con los iones Al_2O_3 libres.
- Llevar a la ebullición.
- Verter E.D.T.A.
- Llevar a la ebullición otra vez.
- Repetir hasta que en la ebullición no aparezca más la coloración violeta. Esta coloración aparece mientras hay Al_2O_3 , no complejada.
- Sea N6 el volumen total de EDTA (que corresponden a la dosificación de Fe_2O_3 + Al_2O_3).

RESULTADOS

1 ml de EDTA corresponde a 1,818 mg de Al_2O_3 .

N4 Volumen vertido para la titulación de Fe_2O_3 .

N6 Volumen total, si no se ha llevado a cero la bureta tras la valoración de Fe_2O_3 .

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = (\text{N6} - \text{N4}) \times \text{T} \times 1.818/2$$

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = (\text{N6} - \text{N4}) \times \text{T} \times 0.909.$$

Apéndice B5. Análisis gravimétrico de trióxido de azufre (SO_3) por medio de precipitación del sulfato de bario $\text{Ba}(\text{SO}_4)$

- Pesar 1,0000 g. de muestra (P1) en una balanza analítica con 4 decimales y transferir a un beaker de 250 ml.
- Humedecer la muestra con 25 ml aproximadamente de agua destilada fría, para dispersar el yeso, y mientras se agita con una varilla de vidrio, añadir 5 ml de ácido

Clorhídrico grado analítico, pureza 37 % HCl. Continuar la agitación hasta disolver todas las partículas de yeso. Lavar con agua destilada fría las paredes del beaker.

- Diluir la solución con 50 ml de agua caliente cercana a la ebullición y se continua calentado sobre la plancha por 15 minutos a una temperatura justo por debajo del punto de ebullición.
- Filtrar la solución a través de un papel de textura media N° 41 en un beaker de 400 ml.
- Lavar el beaker, el papel y el precipitado vigorosamente con agua caliente.
- Colocar el filtrado sobre la plancha hasta ebullición.
- Añadir 10 ml de BaCl₂ (si la muestra es cemento) o 15 ml de BaCl₂ (si la muestra es yeso) al filtrado caliente continuando la ebullición hasta que el precipitado este bien formado. Continuar agitando vigorosamente con la varilla de vidrio. Mantener el volumen de la solución entre 225 ml y 260 ml, se puede añadir agua caliente si es necesario.
- Filtrar la solución a través de un papel de textura fina N° 42, con la precaución de no llenar completamente el filtro. Enjuagar el beaker y el filtro con agua caliente aproximadamente cinco veces.
- Pesar un crisol de porcelana limpio y seco en gramos (P0), en una balanza analítica con 4 decimales.
- Colocar el filtro de papel dentro del crisol previamente pesado. Llevar a la plancha para secar y precalcinar. Transferir al horno a 1000 °C por 10 minutos.
- Sacar el crisol del horno y se deja enfriar en un desecador.
- Se pesa el crisol con el precipitado calcinado (P2).
- Calcula el % de Trióxido de Azufre con dos decimales, mediante la expresión:

$$\text{Trióxido de Azufre (\%)} = \frac{(P2 - P0) * 100 * 0,343}{P1}$$

Apéndice B6. Método de ensayo para la determinación cualitativa de impurezas orgánicas para agregados (Ensayo colorimétrico).

- Se necesitan dos frascos de vidrio claro, ovalados, graduados con tapones de goma y de 350 cm³ aproximadamente.
- Se prepara una solución con hidróxido de sodio al 3%, disolviendo 3 partes por peso de hidróxido de sodio en 97 partes de agua.
- Se llena el frasco de vidrio con la muestra a ensayar hasta un tercio de su altura.
- Se añade la solución de hidróxido de sodio hasta que el volumen de la muestra y el de la solución sea de 2/3 partes de la altura.
- Se tapa el frasco agitando vigorosamente, y luego se deja reposar durante 24 horas.
- Al final del período de las 24 horas, se prepara la solución patrón, disolviendo bicromato de potasio K₂Cr₂O₇, en ácido sulfúrico concentrado de peso específico 1,84 a razón de 0,250 g por 100 cm³ de ácido.
- Se compara, poniendo los dos frascos juntos y viendo a través de ellos, el color del líquido que sobrenada la muestra de ensayo con el de la solución de referencia de color patrón anotando si su color es más claro o más oscuro o igual a la solución patrón de referencia si presenta material orgánico la coloración es amarillento.

Apéndice B7. Determinación de la pérdida al fuego

- Tomar un crisol de porcelana o de platino limpio, calentarlo en la plancha por encima de 100 °C durante 15 minutos, para secarlo.
- Dejar enfriar el crisol dentro del desecador por 15 minutos aproximadamente.
- Pesar el crisol vacío (P0) en una balanza analítica (clase fina) con 4 decimales, medida en gramos.
- Tarar el crisol vacío, la balanza indicará 0.0000 g.
- Pesar 1,0000 g. de la muestra aproximadamente dentro del crisol (P1), expresando los 4 decimales.

- Llevar el crisol con la muestra al horno a una temperatura de 1050°C, durante 30 minutos.
- Retirar del horno el crisol más el calcinado, colocarlo en el desecador durante 15 minutos para enfriarlo.
- Pesarse el crisol más el calcinado (P2).
- Calcular el % de pérdida al fuego con dos cifras significativas mediante la expresión:

$$\text{Pérdida al Fuego (\%)} = \frac{(P0 + P1 - P2) * 100}{P1}$$

Apéndice B8. Preparación de las pastillas prensadas.

- Tarse en la balanza un beaker limpio y seco de 100 ml.
- Pesarse 1,00 g. de Cera "C" Micro-Molida, dentro del beaker.
- Tarse nuevamente el beaker con la cera.
- Pesarse 9,00 g. de la muestra de cemento y Pesarse 14,00 g. de la muestra de caliza pulverizada y seca.
- Mezclar con una espátula la cera y la muestra hasta que no hayan manchas blancas.
- Colocar el material dentro del cilindro de la prensa Herzong. Cerrar el brazo de prensado y apretar el tornillo. Presionar el botón de inicio para confeccionar la pastilla.
- Para retirar la pastilla de la prensa, aflojar el tornillo y girar el brazo. Presionar nuevamente el botón de inicio para liberar la pastilla.
- Tomar la pastilla por el borde, NO tocar la cara inferior, marcar la cara superior con la identificación correspondiente. La pastilla está lista para llevar al analizador de rayos X.

Apéndice B9. Preparación de las pastillas fundidas

- Colocar un crisol limpio de platino - rodio - oro, sobre la plancha eléctrica a una temperatura superior a 100°C durante 15 minutos para secarlo.
- Retirar el crisol de la plancha y colóquelo en un desecador durante 10 minutos aproximadamente.
- Pesar el crisol seco (P0) en una balanza analítica con 4 decimales.
- Tarar el crisol seco.
- Pesar la muestra (P1) con 4 decimales dentro del crisol (para el caso de arcilla, clinker y cemento se pesarán 2,0000 gramos y para el caso de harinas se pesarán 3,0000 gramos).
- Llevar el crisol con la muestra al horno a la temperatura de 1070 °C para muestras de arcillas, harina, clinker y cemento, por espacio de 30 minutos aproximados.
- Retirar el crisol con la muestra calcinada del horno y dejarlo enfriar durante 15 minutos en un desecador.
- Pesar el crisol con la muestra calcinada (P2) en la balanza analítica, expresar el resultado con 4 decimales.
- Determinar el peso del fundente (Tetraborato de Litio), mediante la expresión:
 - $\text{Peso del Fundente (g)} = (P0 + P1 - P2) * 4$ para muestras de Harina, Clinker y Cemento.
 - $\text{Peso del Fundente (g)} = (P0 + P1 - P2) * 6$ para muestras de Arcilla.
- Colocar el fundente dentro del crisol con la muestra calcinada.
- Introducir el crisol en el horno por espacio de 30 minutos. Cada 10 minutos se deberá agitar el crisol para homogeneizar, tomar el crisol con la pinza y darle movimientos circulares. Colocar el crisol nuevamente dentro del horno.
- Calentar el molde (plato de platino - rodio - oro), por 5 minutos en el horno, antes de vencer el plazo de los 30 minutos de fusión. Verter el contenido del crisol en el molde.

- Retirar el plato del horno y colocarlo sobre un ladrillo refractario. Espere a que se despegue y se enfríe la pastilla fundida.
- Identifique la pastilla fundida con una etiqueta en la cara superior, la pastilla estará lista para ser analizada en el equipo de rayos X.

Apéndice B10. Determinación de la cal libre por conductimetría

- Pesar 1,0000 g de la muestra en una balanza analítica con 4 decimales.
- Medir 80 ml de etilenglicol, el cual debe estar a una temperatura aproximadamente de 80 °C, y trasladarlo a un beaker de 100 ml.
- Añadir la muestra al beaker de 100 ml que contiene etilenglicol.
- Colocar un agitador magnético, dentro del beaker.
- Llevar el beaker a la plancha termo eléctrica.
- Colocar el electrodo del conductímetro y el termómetro dentro del beaker (esperar que el agitador esté estable para evitar daños en el electrodo) y verificar en el termómetro que la temperatura permanezca en 80° C aproximadamente.
- Determine el valor de CaO libre, de acuerdo a la tabla del cálculo de CaO Libre por conductividad realizada con la curva de calibración.

Apéndice B11. Determinación de la humedad de las calizas.

- Pesar el envase porta muestra vacío (P0), expresado en gramos, con dos cifras significativas.
- Pesar la muestra (P1).
- Llevar al horno la muestra dentro del envase y mantener a 120°C durante 3 horas.
- Retirar la muestra del horno, dejar enfriar al aire libre y se pesa (P2).
- Determinar el % de humedad, con dos cifras significativas, mediante la expresión:

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{(P0 + P1 - P2) * 100}{P1}$$

Apéndice B12. Determinación de la finura por tamices

- Pesar 10,00 g. de la muestra, peso inicial P0.
- Tomar el tamiz N° 200 (75µm) ó N° 325 (45µm) para cementos.
- Limpiar el interior del tamiz con una brocha.
- Colocar el tamiz sobre la base de la aspiradora.
- Agregar la muestra sobre el tamiz, y encienda la aspiradora por un tiempo de 3 minutos. Al iniciar el proceso de succión puede ayudarse con la brocha a desmoronar los grumos que se encuentren en la muestra.
- Una vez que se apague la aspiradora, retirar el tamiz y proceder a reunir el material retenido en un solo grupo, luego voltee el tamiz sobre una hoja de papel.
- Pesar el material retenido P1, en una balanza cuya apreciación sea 0,0001g.
- Para obtener el porcentaje de retenidos en el tamiz, multiplique el peso del material retenido por 100 y divida entre el peso inicial P0.

$$\text{Retenidos (\%)} = \frac{P1 * 100}{P0}$$

Apéndice B13. Determinación de la superficie específica Blaine

- Pesar 107,30 gr. de cemento.
- Colocar en la célula de permeabilidad el disco metálico, y sobre éste un filtro de papel #11, presionando los bordes con el apisonador.
- Añadir toda la muestra de cemento dentro de la célula. Asegurase de no perder parte de la muestra.
- Golpear suavemente con el émbolo, las paredes exteriores de la célula para nivelar la superficie del cemento.
- Colocar otro filtro de papel sobre la capa de cemento.
- Comprimir la capa de cemento con el émbolo, hasta que ajuste con el tope. Darle un giro de 90° al émbolo.
- Sacar el émbolo lentamente.
- Conectar la célula de permeabilidad al aparato de Blaine automático.

- El valor de la superficie específica Blaine se mostrará en la pantalla una vez finalizado el ensayo.

Apéndice B14. Determinación de la consistencia normal

- Pesar 650,00 g. de cemento.
- Medir con un cilindro graduado una cantidad de agua (entre 140 y 152 ml. aproximadamente). Registrar el tiempo cuando comience a agregar el cemento al agua
- Preparar una pasta de la siguiente manera:
 - Colocar la paleta metálica y el recipiente de mezclado (ambos equipos deben estar bien secos) en la mezcladora.
 - Colocar el agua en el recipiente de mezclado.
 - Agregar el cemento al recipiente de mezclado y dejar que se absorba el agua durante 30 segundos.
 - Encender la mezcladora a velocidad baja por 30 segundos. En este lapso colóquese los guantes de goma.
 - Raspar hacia abajo con las manos enguantadas, el material que se haya podido adherir a las paredes del recipiente de mezclado durante 15 segundos.
 - Encender la mezcladora a velocidad rápida por 1 minuto.
 - Tomar un anillo tronco cónico y proceda a humedecer con gasoil la superficie interna y los bordes de los diámetros.
 - Tomar una placa de vidrio y proceda a humedecer con gasoil la cara superior.
 - Con las manos cubiertas por guantes de goma moldear la pasta en forma esférica.
 - Pasar la bola de pasta de una mano a otra 6 veces, manteniéndolas separadas una distancia de 15 centímetros aproximadamente.
 - Insertar la bola dentro del anillo por el extremo de mayor diámetro, sujetando el otro extremo de menor diámetro con la palma de la mano.
 - Remover el exceso de pasta que quedó en el extremo de mayor diámetro con la palma de la mano. Sobre la placa de vidrio coloque el anillo con el extremo de mayor

diámetro hacia abajo. Retirar el exceso de pasta que se encuentra en el extremo de menor diámetro con la ayuda de la cuchara de albañil.

- Durante la operación del enrase y alisado se debe tener la precaución de no comprimir la pasta.
- Proceder a colocar la escala en cero del aparato de Vicat, apoyando ligeramente el vástago de la barra sobre la superficie superior de la pasta, visualice que en la escala se encuentre la marca en el cero, posteriormente apriete el tornillo fijador y centre la muestra debajo del aparato de Vicat. Seguidamente afloje el tornillo fijador y deje caer libremente el vástago de la barra dentro de la muestra. Tome la lectura directamente de la escala del lado derecho para determinar la penetración. Es importante que no transcurran más de 30 segundos desde el momento de moldear la pasta en forma esférica.
- La pasta tendrá una consistencia normal si, transcurridos 30 segundos después de liberar el vástago de la barra, se obtiene una penetración de 10 ± 1 mm. De no obtenerse dicha penetración, se deberá repetir todos los pasos anteriores aumentando o disminuyendo la cantidad de agua inicial.

Apéndice B15. Determinación del fraguado Vicat

- La muestra obtenida en el ensayo de consistencia normal se debe colocar inmediatamente en la cámara de humedad y dejar reposar allí por espacio de 30 minutos, sin moverla antes de hacer la primera penetración.
- Para realizar el ensayo de penetración, colocar la probeta debajo del aparato y apoyar ligeramente la aguja de vicat sobre la superficie de la pasta, visualizar que en la escala se encuentre la marca en el cero, posteriormente apriete el tornillo fijador. Seguidamente centre la probeta debajo del aparato de Vicat y afloje el tornillo fijador, dejar caer libremente la aguja dentro de la probeta y que asiente durante 30 segundos. Tomar la lectura directamente de la escala para determinar la penetración.

- Se realiza el paso anterior cada 15 minutos hasta que se obtenga una penetración de 25 mm o menos y determinar el tiempo para obtener esta penetración. Este es el tiempo inicial de fraguado.
- Se debe tener precaución al determinar la penetración de una pasta muy blanda, con el fin de evitar que se doble la aguja. De la misma forma se debe evitar realizar una penetración sobre una anterior.
- El fraguado final ocurre cuando la aguja no produce una marca visible sobre la pasta. Se procede a realizar la resta del tiempo en el cual la aguja deja de marca y el tiempo en el cual se comenzó a añadir el cemento al agua.

Apéndice B16. Determinación de la expansión en autoclave

- Preparar el molde, limpiar las distintas piezas y los topes de medición. Armar los moldes y los topes de medición, recubrirlos interiormente con una capa delgada de gasoil. Colocar los topes en su lugar, y verificar la longitud efectiva (L_0), comprendida entre los extremos más internos de los tornillos.
- La pasta sobrante de los ensayos anteriores se emplea para realizar las barras de expansión.
- Con las manos cubiertas por guantes de goma moldear la pasta en forma cilíndrica.
- Llenar los moldes en dos capas aproximadamente iguales, compactar con la yema de los dedos la pasta. Debe tener la precaución de llenar completamente las aristas y las esquinas de los moldes, presionando con los dedos la pasta.
- Enrasar la superficie de las barras con la ayuda de la cuchara de albañil. Si es necesario alisar la cara superior con la cuchara de albañil.
- Finalizado la confección de las barras, se guarda el molde en la cámara de humedad al menos por 20 horas, con una humedad relativa no menor de 90 %. Se desmoldan las barras antes de las 24 horas, éstas deben permanecer en la cámara de humedad hasta la realización del ensayo.

- Antes de realizar las mediciones de las longitudes de las barras, colocar la barra patrón en el comparador de longitudes y girar lentamente la barra patrón, la aguja indicadora del reloj debe mostrar la longitud de la barra patrón.
- A las 24 horas de la elaboración de las barras, se sacan de la cámara de humedad e inmediatamente se mide su longitud (L1) entre los extremos libres de los topes de medición con el comparador de longitud. Seguidamente se colocan las barras en un soporte adecuado y se llevan a la autoclave, de forma tal que sus 4 caras mayores queden expuestas a la acción del vapor. El autoclave debe contener agua suficiente para mantener la atmósfera saturada de vapor durante todo el ensayo. Normalmente entre 7 y 10 % del volumen del autoclave debe estar ocupado por agua.
- Se inicia el calentamiento del autoclave, asegurándose de que la válvula de eliminación de aire permanezca abierta hasta que por ella comience a salir vapor.
- A continuación cerrar la válvula de eliminación para permitir que se incremente la temperatura hasta alcanzar una presión de 295 ± 10 psi (2 ± 0.07 MPa) en un periodo de 45 a 75 minutos.
- Durante las 3 horas siguientes, la presión se debe mantener en 295 ± 10 psi que corresponde a la temperatura de 216 ± 2 ° C.
- Posteriormente se apaga el autoclave y se deja enfriar el Autoclave de manera que al cabo de 90 minutos la presión manométrica sea inferior a 15 psi.
- Abra la válvula de eliminación a fin de eliminar el vapor que se encuentra en el interior del autoclave hasta alcanzar la presión atmosférica.
- Abrir el autoclave, sacar las barras y colocar las probetas de ensayo en un recipiente que contenga agua cuya temperatura sea superior a los 90 ° C.
- La temperatura del agua se hace disminuir de manera uniforme añadiendo agua fría, de tal forma que descienda a 23 ° C en 15 minutos.
- Se mantiene esta temperatura durante un periodo adicional de 15 minutos, al cabo del cual se retiran las probetas del recipiente.
- Secar las superficies de las barras y proceder a medir su longitud (L2) entre los extremos libres de los topes de medición con el comparador de longitud.

- Luego de medir la longitud de cada probeta antes y después del ensayo, determinar la diferencia entre L2 y L1. Dicha diferencia se divide entre la longitud efectiva (L0) y se multiplica por 100 para expresarlo en porcentaje de la longitud efectiva original, con aproximación de 0.01 %.

$$\text{Expansión \%} = \frac{(L2 - L1) * 100}{L0}$$

- En caso de que hubiese contracción el resultado se indica por un signo negativo (-

Apéndice B17. Resistencia a la compresión

- Los materiales arena, cemento, agua, se mezclan, y sus proporciones y cantidades deben cumplir con los requisitos exigidos de acuerdo al número de probetas que se desee preparar. A continuación se presenta en la Tabla.

CANTIDADES DE LOS MATERIALES A MEZCLAR

MATERIAL	6 PROBETAS	9 PROBETAS	12 PROBETAS
Arena (g.)	1375	2035	2750
Cemento (g.)	500	740	1000
Agua (ml)	242	359	485

Nota: Como los resultados a esperar son a 28 días se usará la columna marcada en rojo, ya que son tres probetas.

- Pesar 1kg de cemento de cada muestra.
- Se pesan par de envases cada uno con 2750 gr de arena.
- Se mide en un cilindro graduado, 485 ml de agua para cada muestra.
- Luego en un batidor agregamos el agua y luego el cemento, se prende a velocidad lenta durante 30 segundos.

- Luego de este tiempo se añade la arena y dejar pasar otros 30 segundos, pasado este tiempo se pone a velocidad rápida otros 30 segundos adicionales.
- Se para y se descansa durante un minuto y medio. Luego se arranca por un minuto
- Una vez más se para por otro minuto y medio. Y para terminar se pone a velocidad rápida por 15 segundos y se apaga.
- Se lleva la mezcla a los moldes de bronce cuyas especificaciones son las siguientes:

-Número de compartimentos cúbicos: 03

-Número de partes: 02 (sin incluir la base).

-Longitud de cada lado: 50.80mm

- Se comienza a colocar una capa de mortero en cada compartimiento cúbico, luego se comienza a compactar el mortero de cada compartimiento unas 32 veces, en 4 vueltas y cada vuelta en ángulo recto con la anterior como lo indica la Figura

4	5
3	6
2	7
1	8

Vuelta 1 y 3

1	2	3	4
8	7	6	5

Vuelta 2 y 4

- Finalizado la compactación de la primera capa en todos los compartimientos cúbicos se termina de llenar los compartimientos con el mortero restante y se compacta igual que la primera capa.
- Se alisan los cubos pasando la parte plana de la cuchara, (con la punta ligeramente levantada) suavemente a lo largo del molde.
- Inmediatamente después de completar el moldeo, se colocan las probetas de ensayo en el cuarto húmedo cuya temperatura debe estar entre 21,5°C a 24,5°C.
- Finalizado este proceso se esperan 24 horas a partir del momento de elaboración, se desmoldan, se rompen 3 probetas que corresponden a 1 día y luego se colocan las probetas en piscinas de agua durante un tiempo de 3 días, 7 días y 28 días.

- Luego de cumplir estos intervalos de tiempo, se sacan las muestras y se seca la superficie de cada probeta, se marca en una de las caras del cubo, la fecha de elaboración del cemento y el tipo de cemento que representa.
- Seguidamente se coloca la probeta cuidadosamente en la guía base de la prensa hidráulica.
- Se le aplica la carga y se toma la lectura que señala el reloj digital.
- Se anotan los resultados de cada muestra ensayada a la misma edad, los cual son tres resultados de resistencia para la misma edad, así se aumenta la precisión del ensayo y se saca un promedio a cada tipo de muestra donde se le aplica una conversión de unidades para llevarlas de kg/cm^2 a Mega pascal, a su vez se calcula la desviación estándar y esta deben ser menor al 10% de desviación.

**APÉNDICE C. MOLTURABILIDAD DE LOS MATERIALES QUE
CONFORMAN EL CEMENTO**

Tabla N° 19: Molturabilidad de los materiales que conforman el cemento

Material (1 kg)	Ciclos (vueltas)	Kwh./Ton	Superficie específica Blaine
Clinker	4100	57,8	356
Caliza	500	7,1	369
Yeso Español	430	6,1	354
Yeso sintético	120	1,7	370

APÉNDICE D. CARTILLA DE OPERACIÓN DEL MOLINO DE CEMENTO2

Tabla N° 20: Cartilla de operación del molino de cemento2

Tareas operacionales del molino	Referencia	Rango	Unidad
Alimentación	112	110-114	Ton/h
Potencia del motor principal	4.300	4.200-4.400	Kw.
Foláfono	75	70-80	%
Potencia de los elevadores	48	43-52	Kw.
Lazos de control y consignas	Set Point	Rango	Unidad
Temperatura entrada molino	112	-	°C
Temperatura salida molino	118	-	°C
Presión de salida molino	-300	-	mmCA

APÉNDICE E. PESO UNITARIO DEL YESO NATURAL Y SINTÉTICO

Tabla N° 21: Peso unitario del yeso natural y sintético

	Yeso natural	Yeso sintético
Sin compactar	1443,0 kg/m ³	1085,6 kg/m ³
Compactado	1639,3 kg/m ³	1152,2 kg/m ³

APÉNDICE F. DIAGRAMAS DE FLUJOS DEL SISTEMA DE MOLIENDA DE CEMENTO 2

Apéndice F1. Trituración y transporte de yeso

Tabla N° 22: Etiquetas y función de los equipos que conforman al sistema de trituración y transporte de yeso

Etiqueta	Designación	Motor	Características principales
410-109	Patio de almacenamiento de yeso	-	Almacena el yeso posee una capacidad de 90.000 Ton.
410-110	Tolva de alimentación	-	Recibir el yeso por medio de payloaders.
410-120	Alimentador vibratorio	M 3,68 Kw	Facilitar la caída del yeso hasta la trituradora.
410-130	Trituradora N° 2	M 75 Kw	Disminuir el tamaño del conglomerado o yeso.
410-150	Elevador N° 6	M 38 Kw	Transportar el yeso hasta el registro de cambio.
410-160	Registro de cambio		Distribuir el yeso que sale del elevador N°6 a cadena de arrastre N°1 (410 - 180) y a silo de yeso de cemento 2.
410-180	Cadena de arrastre N°1	M 7,36 Kw	Transportar el yeso a cadena de arrastre N°2 (410-190)
410- 190	Cadena de arrastre N° 2	M 7,36 Kw	Transportar el yeso a silo de yeso de cemento 1.

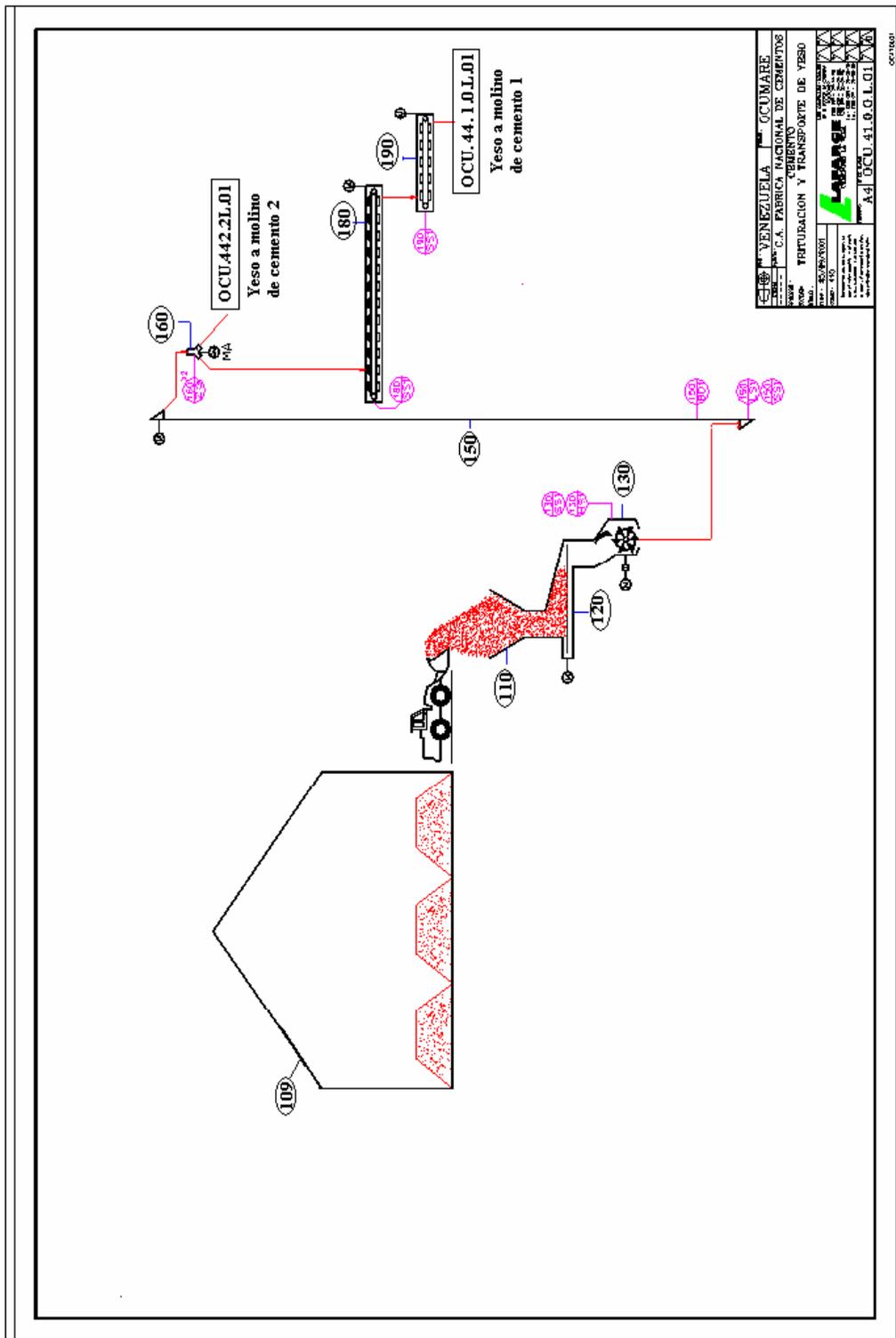


Figura N° 30: Diagrama de flujo de la trituración y transporte de yeso

Apéndice F2. Dosificación al molino de cemento n° 2

Tabla N° 23: Etiquetas y función de los equipos que conforman el sistema de dosificación al molino de cemento n° 2

Etiqueta	Designación	Motor	Función principal
442-010	Silo de clinker		Almacenar Clínger para luego ser dosificado al Molino.
442-012	Compuerta manual pendan de clinker 1		Cerrar la caída de Clínger hacia dosificador Pendan cuando se realiza mantenimiento.
442-013	Compuerta manual pendan de clinker 2		Cerrar la caída de Clínger hacia dosificador Pendan cuando se realiza mantenimiento.
442-020	Dosificadora pendan de clinker N° 1	M 1,49 kw	Dosificar el Clínger requerido para el Molino
442-030	Dosificadora pendan de clinker N° 2	M 1,49 kw	Dosificar el Clínger requerido por el Molino
442-040	Silo de yeso		Almacenar el Yeso para luego ser dosificado el material.
442-045	Compuerta manual a pendan de yeso		Cerrar la caída de Yeso hacia Dosificador Pendan cuando se realiza mantenimiento.
442-050	Dosificador pendan de yeso	M 1,49 kw	Dosificar el Yeso requerido por el Molino
442-100	Tolva de alimentación		Recibir el Clínger Fuera de Norma o caliza por medio de payloaders
442-110	Cinta de alimentación a silo metálico	M 1,10 kw	Transportar Clínger Fuera de Norma o caliza desde la Tolva (442 - 100) a Silo (442 - 110).
442-120	Silo metálico		Almacenar Clínger Fuera de Norma o caliza para ser dosificado al Molino.
442-130	Cinta dosificadora	M 5,50 kw	Transportar Clínger Fuera de Norma o caliza hasta Registro de Cambio
442-135	Registro de cambio		Enviar Clínger Fuera de Norma o caliza a Cinta (442 - 140) o descartar para realizar pesaje.
442-140	Cinta alimentadora de yeso	M 1,50 kw	Transportar Clínger Fuera de Norma y Yeso hasta Elevador
442-150	Elevador de alimentación a molino II	Motor 15 Kw	Transportar Clínger Fuera de Norma o Caliza, Clínger y Yeso hasta Cono de entrada Molino.

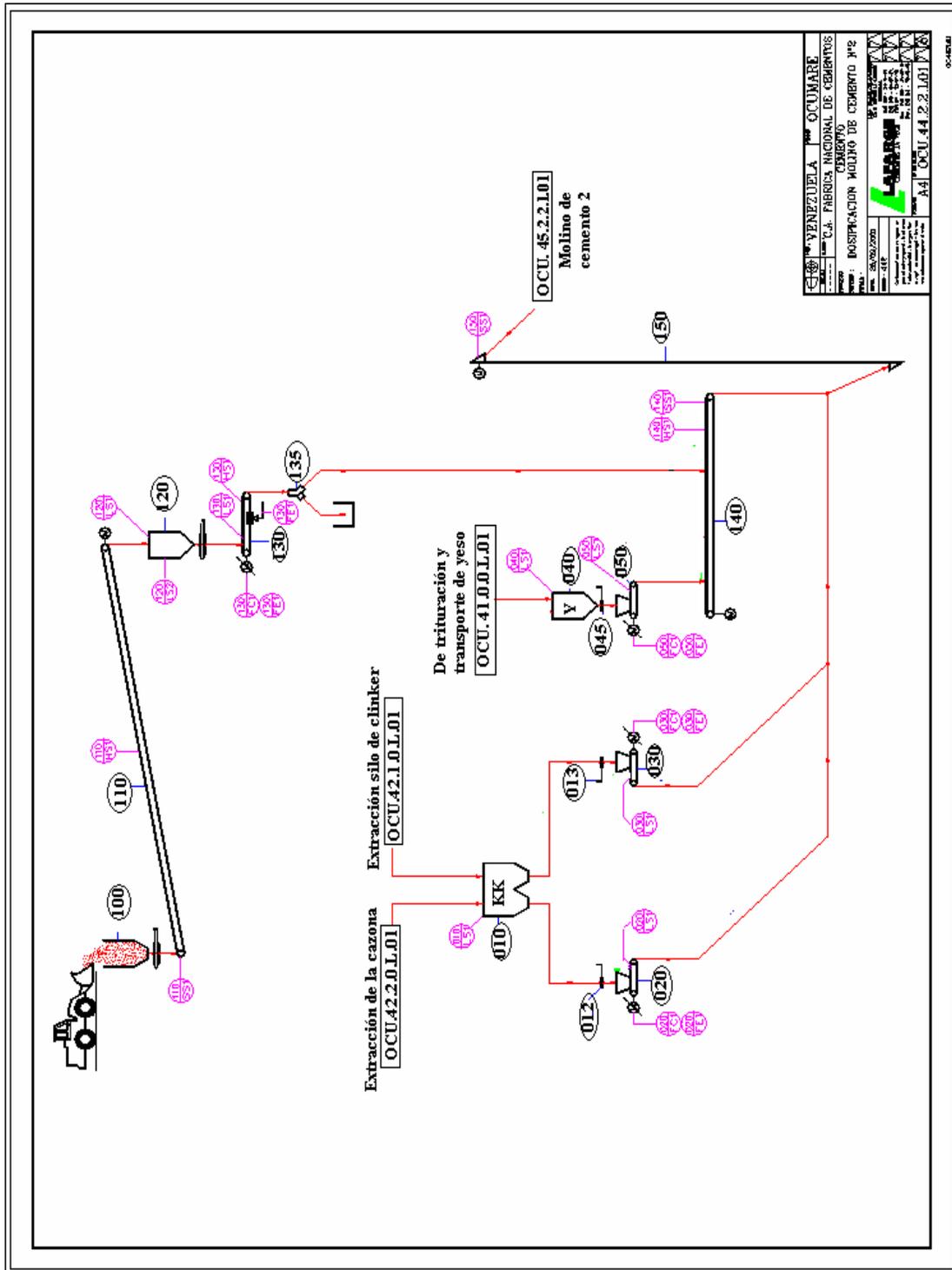


Figura N°31: Diagrama de flujo de la dosificación al molino de cemento n°

Apéndice F3. Molino de cemento 2

Tabla N° 24: Etiquetas y función de los equipos que conforman el sistema de molienda de cemento n°2

Etiqueta	Designación	Motor	Función principal
452-020	Cuerpo del molino		Moler hasta pulverizar el Clínter, Yeso, Clínter Fuera de Norma o Caliza para obtener Cemento.
452-125	Foláfono		Oído Eléctrico que mide el ruido interno del Molino.
452-130	Registro de cambio		Distribuir el Cemento que sale del Molino (452 - 020) a Regueras (452 - 140) y (452 - 240).
452-140	Reguera de alimentación a elevador B		Transportar el Cemento hasta Elevador B (452 - 150).
452-141	Ventilador de reguera	M 3,60 kw	Suministrar aire a Reguera (452 - 140) y Reguera (452 - 240).
452-150	Elevador B	M 44,70 kw	Transportar el Cemento hasta Reguera (452 - 160).
452-151	Accionamiento del sistema virolento de elevador B		Proporcionar un giro lento al elevador.
452-160	Reguera alimentación separador dinámico D	M 3,60 kw	Transportar el Cemento hasta Separador Dinámico (452 - 170).
452-161	Ventilador de reguera		Suministrar aire a Regueras (452 - 160) y (452 - 260).
452-170	Separador D	M 373 kw	Separar partículas finas de las gruesas
452-171	Sistema de lubricación al motor principal		Realizar la lubricación del reductor de Separador Dinámico (452 - 170)
452-180	Esclusa		Entregar el Cemento en forma dosificada a la reguera de material fino.
452-190	Reguera del material fino		Transportar el Cemento hasta Reguera (452 - 200).
452-191	Ventilador de reguera		Suministrar aire a Regueras (452 - 190) y (452 - 200).
452-200	Reguera Fuller		Transportar el Cemento hasta Tomamuestra
452-201	Ventilador de reguera fuller CM2		Suministrar aire a Reguera (452 - 200).

452- 220	Tomamuestra		Recolectar en forma continua durante el proceso de molienda muestras de Cemento para los análisis de laboratorio y de aquí por medio de una bomba fuller(452-230) se transporta el cemento hasta los silos por medio de tuberías.
452-240	Reguera alimentación a elevador A		Transportar el Cemento hasta Elevador A (452 - 250).
452-250	Elevador A	M 44,70 kw	Transportar el Cemento hasta Reguera (452 - 260).
452-251	Accionamiento del sistema giro lento a elevador A		Proporciona el giro lento al elevador
452-260	Reguera alimentación al separador dinámico C		Transportar el Cemento hasta Separador Dinámico (452 - 270).
452-270	Separador dinámico C	M 373 kw	Separar partículas finas de las gruesas
452-271	Sistema de lubricación al motor principal		Realizar la lubricación del reductor de Separador Dinámico (452 - 270)
452- 280	Esclusa		Entregar el Cemento en forma dosificada a la reguera de material fino.
452-290	Reguera material grueso		Transportar el material de rechazo de los separadores Dinámicos (452 - 170) y (452 - 270) hasta la entrada del Molino (452 - 020).
452-291	Ventilador de reguera		Suministrar aire a Reguera (452 - 290).
452-520	Filtro electrostático	M 0,45 kw	Recibir y luego precipitar las partículas de polvo aspiradas por el Ventilador de Tiro (452 - 523) del sistema para que los gases expulsados al ambiente sean limpios.
452-523	Ventilador de tiro	M 37,30 kw	Realizar el desempolvado desde la salida del Molino (452 - 020) hasta la Bomba Fuller (452 - 230) a través del Filtro (452 - 520).
452-530	Accionamiento N°1 a golpeadores		Golpear la jaula de placas para la precipitación del polvo de Cemento.

452-531	Accionamiento N°2 a golpeadores		Golpear la jaula de placas para la precipitación del polvo de Cemento.
452-532	Accionamiento N°3 a golpeadores		Golpear la jaula de placas para la precipitación del polvo de Cemento.
452-533	Accionamiento N°4 a golpeadores		Golpear la jaula de placas para la precipitación del polvo de Cemento.
452-534	Accionamiento N°5 a golpeadores		Golpear la jaula de placas para la precipitación del polvo de Cemento.
452-565	Rosca bajo filtro electrostático	M 5,60 kw	Transportar el polvo de cemento hasta Rosca (452 - 570).
452-570	Rosca recuperadora electrofiltro	M 5,60 kw	Recibir Cemento de Rosca (452 - 565) y transportarlo como producto terminado.
452-620	Filtro de mangas		Realizar desempolvado de circuito de rechazo de Separadores (452 - 170), (452 - 270) y Elevador (442 - 150).
452-623	Ventilador de tiro	36,80 kw	Realiza la aspiración a través del Filtro (452 - 620) para el desempolvado.
452-626	Esclusa N°1	M 0,55 kw	Descargar polvo de Cemento
452-627	Esclusa N°2		Descargar polvo de Cemento
452-810	Polipasto Cámara N°1		Para desmontar tapa de Cámara N° 1 y realizar la carga y recarga de cuerpos moledores en Cámara N° 1.
452-811	Polipasto cámara N°2		Para desmontar tapa de Cámara N° 2 y realizar la carga y recarga de cuerpos moledores en Cámara N° 2.

APÉNDICE G. BALANCE DE ENERGÍA DEL MOLINO DE CEMENTO N° 2

Tabla N° 25: Balance de energía del molino de cemento n° 2

Alimentación del molino	80 Ton/h
Temperatura de entrada al molino de cemento 2	108 °C
Temperatura de salida del molino de cemento 2	124°C
Temperatura de salida de los gases	122°C
Temperatura del clinker	200°C
Consumo de energía	
Calor sensible del cemento (kcal/h)	335.003,00
Calor sensible del agua líquida (kcal/h)	375.334,90
Calor latente del agua (kcal/h)	2.698.203,20
Calor sensible del vapor de agua (kcal/h)	33.309,40
Calor sensible del aire (kcal/h)	471.140,50
Pérdida de calor por convección natural (kcal/h)	121.465,72
Pérdida de calor por radiación (kcal/h)	101.170,11
Total calor consumido (kcal/h)	4.135.626,90
Aporte de energía	
Energía aportada por el molino (motor) (kcal/h)	3.272.950,80
Generación de calor por movimiento del molino (kcal/h)	2.945.279,00
Energía existente como calor en el clinker (kcal/h)	-2.082.602,90
Total calor aportado (kcal/h)	4.135.626,90

**APENDICE H. CONSUMO ELÉCTRICO DE LOS EQUIPOS DEL MOLINO
DE CEMENTO N° 2**

Tabla N° 26: Consumo eléctrico de los equipos del molino de cemento n°2

Equipo	Yeso español Puro (kwh)	20% Yeso sintético (kwh)
Alimentador vibratorio (410-120)	1,21	1,21
Trituradora N° 2 (410-130)	33,45	30,44
Elevador N° 6 (410-150)	12,32	12,32
Cadena de arrastre N° 1 (410-180)	9,68	9,68
Cadena de arrastre N° 2 (410-190)	9,68	9,68
Dosificadora pendan (442-050)	0,10	0,10
Cinta alimentadora de yeso (442-140)	0,75	0,75
Elevador alimentación a mol. cem.2 (442-150)	19,76	19,76
Molino Cemento 2 (452-020)	3808,80	3805,27