

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DE LA ADICIÓN DEL POLVILLO RESIDUAL DE LOS  
HORNOS DE UNA PLANTA DE CEMENTO EN LA PRODUCCIÓN DE  
YESO TIPO I**

REALIZADO POR:

***Br. Migdalia Andreina Bravo Rosario***

***C. I. 18.549.490***

Trabajo de grado presentado ante la ilustre Universidad de Oriente  
como requisito parcial para optar al título de:

**INGENIERO QUÍMICO**

Puerto La Cruz, mayo de 2010.

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DE LA ADICIÓN DEL POLVILLO RESIDUAL DE LOS  
HORNOS DE UNA PLANTA DE CEMENTO EN LA PRODUCCIÓN DE  
YESO TIPO I**

Revisado y aprobado por:

---

Ing. Quím. Héctor Silva, MSc.  
Asesor Académico

---

Lic. Quím. Avelino Andrade  
Asesor Industrial

Puerto La Cruz, mayo de 2010.

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DE LA ADICIÓN DEL POLVILLO RESIDUAL DE LOS  
HORNOS DE UNA PLANTA DE CEMENTO EN LA PRODUCCIÓN DE  
YESO TIPO I**

Jurado:

---

Ing. Quím. Héctor Silva, MSc.  
**Asesor Académico**

---

Ing. Quím. Frank Parra  
**Jurado Principal**

---

Ing. Quím. Alexis Cova, MSc.  
**Jurado Principal**

Puerto La Cruz, mayo de 2010

## **RESOLUCIÓN**

De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajo de Grado: “Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participara al Consejo Universitario”.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a Dios todopoderoso que día a día me enseña el camino de la vida y que nunca se ha equivocado conmigo.

A toda mi familia, este éxito también es de ustedes.

A todos los investigadores que usan la ciencia como medio para alcanzar un mundo mejor y a aquellos que piensan que el conocimiento no vale nada si no lo puedes compartir.

A todas las personas que confían su vida a Dios y no a su propia fuerza, pues nunca quedan defraudados.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Dios por haberme dado salud, inteligencia, sabiduría y fortaleza para poder culminar con éxito esta etapa de mi vida. A ti que nunca me abandonaste y siempre me mostraste el camino que debía seguir, éste logro es por ti y para ti.

Agradezco infinitamente a mis padres Migdalia Coromoto y Carmelo Rafael por ser siempre mis guías, ejemplo a seguir y además patrocinadores oficiales de mis estudios. Siempre van a ser los mejores padres, gracias por enseñarme lo que verdaderamente es importante en la vida. Los amo. A mi hermano Carmelo Jesús por ser ejemplo de superación y hacerme ver que la vida no es para nada complicada y que siempre hay que ser positivos, te quiero hermano.

A mis abuelas Dilia Marcolina y Luisa Jacinta (Q.E.P.D.) por siempre sentirse orgullosas de mí, ser ejemplos de lucha y de superación. Por quererme siempre. Gracias.

A la familia León Guaquirían, mi tía Francisca, mi tío Juan Oswaldo, Juan Francisco, Milagros del Valle y mi futuro primo José Manuel, por haberme acogido en su casa como un miembro más de la familia, darme su amor y apoyarme durante toda la carrera. Ustedes que han sido mi familia durante estos cinco años nunca me cansaré de agradecerles todo lo que han hecho por mí. Gracias por soportarme. Los amo.

A todo el resto de mi familia tíos, tías, primos, primas, a todos aquellos que no siendo familia siempre se han portado con tal.

A Anyelo Prado, quien llegó en la última etapa de mi carrera para animarme y apoyarme en la culminación de este proyecto.

Agradezco a la Universidad de Oriente por ser mi casa durante 5 años, en ella no sólo aprendí sobre ingeniería química, también a valerme por mí misma, a luchar por un bien común, lo que es la amistad, que existen personas buenas pero también malas. En esta casa de estudio, además de formarme como ingeniero químico, me formé como una persona.

A mi grupo de estudio y amigos personales Alejandra Tomassi, Belkis Enidian Romero, Nayibeth Espinoza y Oswaldo Cova (los conflictivos) porque juntos formamos un grupo sin igual. Ustedes hicieron que estudiar ingeniería química fuera algo agradable. Siempre recordaré los innumerables momentos que pasamos juntos, el apoyo y la comprensión que tuvieron conmigo.

A Luis Alejandro Rosas (hijo) tú que estuviste desde el primer semestre a mi lado, te agradezco los buenos momentos que vivimos. Lucy Márquez, Demerysis García, Francisco Martínez y Ana De Moya, compañeros de estudio y de viaje, a ustedes que los conozco desde la infancia y fueron muchos los momentos que compartimos. Gracias.

A las personas con las que compartí gran parte de la carrera y que muchas de ellas son grandes amigos personales como Cariana Campos, Aniliana Sanabria, Juan Poblador, Roberth Fajardo, Angélica Ovalles, Francisco Ruiz, Zulivis vívenes, Jose Danglad, Guillermo Linero, Adolfo Rodríguez, Ysabel Rojas, Marycarmen Frafán, Mary Ugueto, Yohana Veracierta, Yoscary licett, Daniel Atay, Aleya Velásquez, Carlos Delgado, Carlos Álvarez, Moira Rodríguez, Yalimar yarbouh, Antonio Bejarano,

Bricmar Córdoba, Laura Bónoli, Yaneska Macero, Fergie Fernández, Jesús Velásquez, Maribeth Torrealba, María Fernanda Guevara, Laudimar Rengel, Diego Páez, Keren Bello, Armando Álvarez, Zoraida Castillo, Claudia Cósola, Asdrúbal Reyes, Emil Marín, Carlos Duque y a Freddy Macadán quien vivió conmigo el proceso para que pudiera presentar mi tesis, gracias por formar parte de mi vida universitaria. Ustedes han hecho de nuestra generación una de las mejores y que difícilmente será olvidada.

A la profesora Xiomara Salazar por su apoyo en el comienzo de mi carrera y a la profesora Justa Rodríguez quien me dio la oportunidad de trabajar como preparadora en el laboratorio de química I y a todos los profesores del Departamento de Ingeniería Química por aportar sus conocimientos en pro de la formación de la generación de relevo.

Agradezco especialmente al profesor Héctor Silva por sus conocimientos aportados a esta investigación y por su invaluable colaboración, comprensión y dedicación.

A Cemex Venezuela, Empresa en Transición por darme la oportunidad de tener mi primera experiencia laboral en la industria y desarrollar un tema de investigación, especialmente le agradezco al Sr. Avelino Andrade por su tutoría, brindarme sus conocimientos y experiencia que me ayudaron a desarrollar y finalizar el trabajo con éxito y por apoyarme durante mi estadía en la empresa. Muchas Gracias. También quiero agradecerles al señor Nelson Vásquez y al equipo de la planta de yeso por poner a mi disposición toda su experiencia sobre la fabricación de yeso. A la señora Rebeca Meneses, la señora Maruma Rodríguez, María Vega y Jesús Verde por prestar todo el apoyo en el desarrollo de esta investigación, así como sus conocimientos. A los ensayistas del laboratorio físico de planta II, los señores

Jorge, Ubaldo, Jesús y Tulio por sus enseñanzas, apoyo incondicional en el desarrollo de la investigación y por brindarme su amistad. Así como a los analistas del laboratorio químico y del laboratorio central. Sin olvidar a los toma muestras el señor Audis, el señor Cheli, el señor Nelson y el señor Villael, la señora Migdalia, Johanna y Norelys a todos muchas gracias por hacer de mi estadía en la empresa inolvidable.

A mis compañeros de pasantía Andrea Mejías, Angélica Ovalles, Jorge Leras, Anyenis Peña, Paola Mora y Juan Poblador por todos los buenos momentos compartidos en la empresa y a Diego Blanco quien aportó sus conocimientos sobre yeso, colaboró en el desarrollo de éste trabajo y con quien tuve el agrado de compartir momentos agradables desde el primer día de mi llegada a la planta, gracias.

## RESUMEN

Con el objetivo de evaluar la adición del polvillo residual de los hornos de clinker de planta I al yeso tipo I de Cemex Venezuela, Empresa en Transición, se reprodujo a nivel de laboratorio la cocción del yeso tipo I, empleando tamices de 90  $\mu\text{m}$  de apertura en una estufa, y la molienda en un molino de bolas, obteniéndose como resultados que la cocción y molienda del yeso tipo I son totalmente reproducibles a nivel de laboratorio. Esto permitió estimar las variables más importantes que afectan la cocción del yeso como el calor suministrado, el tiempo de cocción y la velocidad de la transferencia de calor. Al estudiar la influencia del calor suministrado al sistema de cocción se encontró que éste no es proporcional a la deshidratación del yeso. Es posible obtener yesos de buena calidad en menor tiempo de cocción variando la velocidad de la transferencia de calor, debido a que la transformación de las fases del sistema sulfato de calcio – agua no es constante. Posteriormente se determinó el tiempo de fraguado, mediante el aparato Vicat, y la resistencia a la compresión a peso constante de muestras de yeso con diferentes porcentajes de polvillo (entre 1 y 10%), mediante estas pruebas se obtuvo que polvillo es un excelente acelerador del tiempo de fraguado y en general disminuye la resistencia a la compresión del yeso tipo I. También se determinaron las variables del proceso de cocción y molienda que presentan posibles relaciones con la adición de polvillo y se encontró que modificando la granulometría del yeso se pueden conseguir tiempos de fraguados deseados, así como la incorporación del método de deshidratación con una temperatura constante en un tiempo de cocción menor permite obtener yesos con buenos tiempos de fraguado (18 – 22 min) que conllevan a la realización de un número mayor de hornadas diarias. Se seleccionó la relación yeso – polvillo que cumpliera con las

especificaciones de la norma COVENIN 3638:2000, la cual establece los requisitos que deben cumplir los yesos de construcción y moldeo, siendo el porcentaje seleccionado de 2% para finalmente calcular el aumento de la producción del yeso tipo I por efecto de la adición de polvillo, el cual fue de 84,71%.

## TABLA DE CONTENIDO

RESOLUCIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vi
RESUMEN .....	x
TABLA DE CONTENIDO.....	xii
TABLA DE FIGURAS .....	xvi
LISTA DE TABLAS.....	xviii
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>22</b>
1.1 Descripción de la empresa.....	22
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	23
1.3 OBJETIVOS.....	24
1.3.1 Objetivo general .....	25
1.3.2 Objetivos específicos .....	25
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>26</b>
2.1 ANTECEDENTES.....	26
2.2 EL YESO .....	27
2.2.1 Aspectos históricos .....	27
2.2.2 Naturaleza y explotación del yeso.....	27
2.2.3 Factores que condicionan la calidad de los yesos aglomerantes.....	29
2.2.4 Deshidratación del yeso .....	30
2.2.4.1 Sistema sulfato cálcico-agua .....	30
2.2.4.2 El proceso de deshidratación.....	34
2.2.4.3 Transformaciones de fases.....	36

2.2.5 El proceso de hidratación: fraguado del yeso.....	41
2.2.5.1 Teoría del crecimiento cristalino o de la cristalización ...	42
2.2.5.2 Teoría coloidal .....	44
2.2.6 Transformaciones y variables alotrópicas más importantes del yeso .....	45
2.3 PRODUCCIÓN DEL YESO CALCINADO.....	47
2.4 POLVILLO DE LOS HORNOS.....	50
2.5 PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO.....	52
CAPÍTULO 3 .....	53
3.1 REPRODUCCIÓN A NIVEL DE LABORATORIO DE LA COCCIÓN Y MOLIENDA DEL YESO TIPO I .....	53
3.1.1 Reproducción de la cocción .....	53
3.1.2 Reproducción de la molienda .....	65
3.2 ESTIMACIÓN DE LAS VARIABLES MÁS IMPORTANTES QUE AFECTAN LA COCCIÓN DEL YESO .....	68
3.2.1 Influencia del calor suministrado .....	68
3.2.2 Influencia del tiempo de cocción .....	70
3.2.3 Influencia de la velocidad de transferencia de calor.....	72
3.3 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE FRAGUADO Y DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MUESTRAS DE YESO CALCINADO CON DIFERENTES PORCENTAJES DE POLVILLO .....	74
3.4 ESTABLECIMIENTO DE POSIBLES RELACIONES ENTRE LA ADICIÓN DEL POLVILLO Y LAS VARIABLES DEL PROCESO DE MOLIENDA Y COCCIÓN DEL YESO .....	77
3.4.1 Relación entre la granulometría del yeso y las propiedades físicas y el agua combinada del yeso calcinado .....	77
3.4.2 Relación entre la granulometría del yeso y la temperatura de cocción.....	79

3.5 SELECCIÓN DE LA RELACIÓN YESO CALCINADO – POLVILLO QUE CUMPLA CON LAS ESPECIFICACIONES DE LA NORMA COVENIN 3638:2000.....	80
3.6 CÁLCULO DEL INCREMENTO DE LA PRODUCCIÓN DEL YESO TIPO I POR EFECTO DE LA ADICIÓN DEL POLVILLO .....	84
3.7 MUESTRA DE CÁLCULO.....	84
3.7.1 Determinación del agua combinada .....	84
3.7.2 Determinación de la resistencia a la compresión .....	86
3.7.3 Determinación de la Granulometría del yeso con el tamiz 100 (150 µm) .....	88
3.7.4 Determinación de la resistencia a la compresión de muestras de yeso calcinado con diferentes porcentajes de polvillo .....	88
3.7.5 Determinación de la producción de la planta de yeso implementando el nuevo método de deshidratación.....	89
CAPÍTULO 4 .....	93
4.1 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	93
4.1.1 Reproducción a nivel de laboratorio de la cocción y molienda del yeso tipo I.....	93
4.1.1.1 Reproducción de la cocción.....	93
4.1.1.2 Reproducción de la molienda .....	95
4.1.2 Estimación de las variables más importantes que afectan la cocción del yeso .....	96
4.1.2.1 Influencia del calor suministrado.....	96
4.1.2.2 Influencia del tiempo de cocción.....	98
4.1.2.3 Influencia de la velocidad de transferencia de calor ....	100
4.1.3 Determinación del tiempo de fraguado y de la resistencia a la compresión de muestras de yeso calcinado con diferentes porcentajes de polvillo.....	101

4.1.3.1 Determinación del tiempo de fraguado a muestras de yeso calcinado con diferentes porcentajes de polvillo.....	104
4.1.3.2 Determinación de la resistencia a la compresión a muestras de yeso calcinado con diferentes porcentajes de polvillo .	105
4.1.4 Establecimiento de posibles relaciones entre la adición del polvillo y las variables del proceso de molienda y cocción del yeso ....	107
4.1.4.1 Relación entre la granulometría del yeso y las propiedades físicas y químicas del yeso calcinado.....	107
4.1.4.2 Relación entre la granulometría del yeso y la temperatura de cocción .....	109
4.1.5 Selección de la relación yeso calcinado – polvillo que cumpla con las especificaciones de la norma COVENIN 3638:2000.....	112
4.1.6 Cálculo del incremento de la producción del yeso tipo por efecto de la adición del polvillo. ....	115
4.2 CONCLUSIONES .....	117
4.3 RECOMENDACIONES .....	118
BIBLIOGRAFÍA .....	120
ANEXO A .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
ANEXO B .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
ANEXO C .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO.	122

## TABLA DE FIGURAS

Figura 2.1 Estructura del yeso, según los datos de Schofield y colaboradores (1996). Coincidente con los parámetros generales aceptados por Chang, Howie y Zussman (1996). Tomada de la American Mineralogist Crystal Structure Database[6].	31
Figura 2.2 Estructura del semihidrato según Ballirano y colaboradores (2001). Imagen tomada de la American Mineralogist Crystal Structure Database (2007) [6].	32
Figura 2.3 Estructura de la anhidrita soluble, según Bezou y colaboradores (1995). Tomada de la American Mineralogist Crystal Structure Database (2007) [6].	33
Figura 2.4 Esquema de las transformaciones del dihidrato, con sus principales fases y estado alotrópicos de interés técnico [8].	46
Figura 2.5 Estructura del horno “tipo caldera” de la planta de yeso de Pertigalete [3].	48
Figura 2.6 Proceso de fabricación del yeso tipo I en la planta Pertigalete de Cemex Venezuela, Empresa en Transición.	50
Figura 2.7 Diagrama de flujo del proceso de fabricación del cemento [5].	52
Figura 3.1 Estufa de laboratorio usada en la simulación de la cocción.	53
Figura 3.2 Bandeja de aluminio colocada debajo del tamiz que se emplea en la simulación de la cocción.	54

Figura 3.3 Forma de extender el yeso en el tamiz para realizar la simulación de la cocción. ....	55
Figura 3.4 Procedimiento de compactación del yeso crudo en el tamiz para la simulación de la cocción. ....	55
Figura 3.5 Comportamiento de la curva de deshidratación empleada en la planta de yeso. ....	56
Figura 3.6 Forma de desalojar los tamices de la estufa, una vez finalizada la simulación de cocción. ....	57
Figura 3.7 Extensión del yeso para lograr un enfriamiento efectivo. ....	57
Figura 3.8 Aparato Vicat modificado. ....	61
Figura 3.9 Aparato de Vicat. ....	62
Figura 3.10 Prensa hidráulica empleada como máquina de prueba en el ensayo de resistencia a la compresión del yeso. ....	63
Figura 3.11 Método de deshidratación para evaluar la influencia de la velocidad de transferencia de calor en el sistema sulfato de calcio – agua. .	72
Figura 4.1 Cantidad de agua necesaria para lograr una consistencia normal en el yeso calcinado en función del porcentaje de polvillo adicionado. ....	103
Figura 4.2 Tiempo de fraguado del yeso calcinado de la planta de yeso en función del porcentaje de polvillo adicionado. ....	104
Figura 4.3 Resistencia a la compresión de yeso calcinado en función del porcentaje de polvillo adicionado. ....	106

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Datos para el cálculo del porcentaje de agua combinada en muestras de yeso calcinado proveniente de la simulación de la cocción de la planta de yeso.....	59
Tabla 3.2 Fuerza soportada por los cubos de yeso obtenidos mediante la simulación de la cocción de la planta de yeso.....	65
Tabla 3.3 Material retenido en el tamiz 100 en función de la velocidad de rotación del molino BOND.....	68
Tabla 3.4 Datos para el cálculo del agua combinada en muestras de yeso calcinado con diferentes temperaturas de salida para evaluar la influencia de la energía suministrada en el sistema sulfato de calcio – agua. ....	69
Tabla 3.7 Fuerza soportada por los cubos de yeso con distintas adiciones de polvillo para calcular la resistencia a la compresión. ....	76
Tabla 3.8 Datos para el cálculo del agua combinada en muestras de yeso calcinado con diferentes granulometrías de la materia prima. ....	78
Tabla 3.9 Fuerza soportada por los cubos de yeso con distintas granulometrías para calcular la resistencia a la compresión. ....	79
Tabla 3.10 Datos para el cálculo del agua combinada en muestras de yeso calcinado a una temperatura de 200 °C con diferentes granulometrías. ....	79
Tabla 3.11 Propiedades físicas del yeso de construcción según las norma COVENIN 3638:2000.....	80

Tabla 3.12 Especificaciones internas del yeso tipo I de Cemex Venezuela Empresa en Transición. ....	81
Tabla 3.13 Cargas soportada por los cubos de yeso con el polvillo seleccionado adicionado y retenido en el tamiz 100 (150 $\mu$ m) para calcular la resistencia a la compresión.....	82
Tabla 3.14 Retenidos en el tamiz 200 (apertura de 75 $\mu$ m) para el yeso al cual se le va a adicionar el polvillo y el yeso con el polvillo adicionado. ...	83
Tabla 4.1 Propiedades físicas y porcentaje de agua combinada del yeso obtenido mediante la simulación de la cocción del yeso a nivel de laboratorio y del yeso producido en la planta de yeso de Pertigalete .....	94
Tabla 4.2 Granulometrías (pasante en el tamiz 100) de los yesos obtenidos mediante la simulación de la molienda en el laboratorio. ....	95
Tabla 4.3 Tiempo de fraguado y porcentaje de agua combinada en muestras de yeso calcinado con diferentes temperaturas de salida para evaluar la influencia del calor suministrado en el sistema sulfato de calcio – agua.....	97
Tabla 4.4 Tiempo de fraguado y porcentaje de agua combinada en muestras de yeso calcinado con diferentes tiempos de cocción para evaluar la influencia del tiempo de cocción en el sistema sulfato de calcio – agua. .	99
Tabla 4.5 Tiempo de fraguado y porcentaje de agua combinada en muestras de yeso calcinado con diferentes tiempos de cocción para evaluar la influencia de la velocidad de transferencia de calor en el sistema sulfato de calcio – agua.....	100
Tabla 4.6 Propiedades químicas del polvillo residual de los hornos de clinker de la planta I de Pertigalete. ....	102

Tabla 4.7 Tiempo de fraguado, porcentaje de agua combinada, resistencia a la compresión y pasante en tamiz 100 para yesos con diferentes granulometrías simulando la hornada de planta de yeso. .... 107

Tabla 4.8 Tiempo de fraguado y porcentaje de agua combinada de yesos con distintas granulometrías simulando la curva de deshidratación de la planta de yeso pero con una temperatura de salida de 200 °C. .... 109

Tabla 4.9 Tiempo de fraguado, porcentaje de agua combinada y resistencia a la compresión de yesos con un porcentaje de pasante en tamiz 100 de 89,2 % de pasante en tamiz 100 deshidratados mediante diferentes métodos de cocción. .... 111

Tabla 4.10 Tiempo de fraguado, resistencia a la compresión, porcentaje de pasante en tamiz 100 y en tamiz 200 del yeso calcinado para adicionar el polvillo y con el porcentaje de polvillo adicionado, comparadas con las especificaciones de las normas COVENIN y las especificaciones internas. .... 113

Tabla 4.11 Análisis químico de la producción promedio mensual de la planta de yeso de Pertigalete y del yeso con adición de polvillo del 2%..... 113

Tabla 4.12 Producción de la planta de yeso de Pertigalete actual, incorporando la nueva curva de deshidratación, manteniendo la temperatura constante de 200 °C e incorporando la curva antes mencionada y el porcentaje de polvillo seleccionado. .... 116

Tabla A.1 Ensayo de colorimetría para las muestras de yeso calcinado con diferentes porcentajes de polvillo adicionado, para los yesos de diferentes granulometrías obtenidos del molino de laboratorio y del molino Raymond de la planta de yeso de Pertigalete. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla B.1 Cantidad de polvillo y de yeso necesarias para la preparación de las muestras de yeso con diferentes porcentajes de polvillo para la

realización de los ensayo de consistencia normal y de tiempo de fraguado.  
.....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla B.2 Cantidad de agua de consistencia normal necesaria para muestras de 500 g con diferentes porcentajes de polvillo para la realización del ensayo de resistencia a la compresión. ....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla B.3 Cantidad de polvillo y de yeso necesarias para la preparación de las muestras de yeso con diferentes porcentajes de polvillo para la realización del ensayo de resistencia a la compresión.**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C.1 Cantidad de agua necesaria para obtener una consistencia normal en el yeso con diferentes porcentajes de polvillo.**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C.2 Tiempo de fraguado de muestras de yeso con diferentes porcentajes de polvillo. ....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C.3 Resistencia a la compresión de muestras de yeso calcinado tipo I con diferentes porcentajes de polvillo. ....**¡Error! Marcador no definido.**

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción de la empresa

Cemex Venezuela, Empresa en Transición, es una organización industrial dedicada a la fabricación, comercialización y transporte de cemento, yeso, concreto y sus agregados. Con el nombre de Venezolana de Cementos C. A., fue fundada en la ciudad de Caracas en el año 1943 por iniciativa del señor Eugenio Mendoza y un grupo de personas con visión futurista [1].

La empresa cuenta con cuatro plantas cementeras ubicadas en Barquisimeto, estado Lara, instalada en 1945, Maracaibo, estado Zulia, instalada en 1947, Pertigalete, estado Anzoátegui, instalada en 1949 y una planta de molienda en Guayana, estado Bolívar, adquirida en 1993. Con esta distribución estratégica se atienden los mercados de consumo del centro, oriente y occidente de Venezuela. Planta Pertigalete agrupa dos unidades de producción, Planta I de proceso vía húmeda y Planta II de proceso vía seca [1]. Además cuenta con oficinas principales ubicadas en la capital del país, un terminal marítimo de recepción y despacho en Catia La Mar y un centro de distribución en Porlamar, estado Nueva Esparta.

La planta Pertigalete está ubicada en las costas del municipio Guanta, en la población de Pertigalete; limita al norte con el Mar Caribe, al sur con la carretera nacional Guanta – Cumaná, al este con el tramo Arapo y al oeste con Pamatacualito.

En el año 1956 fue instalada la planta de yeso en las adyacencias de planta I en Pertigalete, estado Anzoátegui, donde se fabrica actualmente el yeso tipo I. La planta cuenta con los mismos equipos desde su inauguración y es la que se encarga del abastecimiento del mercado nacional, y en ocasiones se exporta este yeso hacia las islas del Caribe. Tiene una producción aproximada de 3000 ton/mes.

En 1994 la Corporación Venezolana de Cementos S.A.C.A. se integra a la empresa internacional Cemex de México, cuarto productor mundial de cemento [2], que finaliza en julio de 2008 con la nacionalización por parte del Estado venezolano, por lo que la empresa se encuentra en un estado de transición adoptando el nombre de Cemex Venezuela, Empresa en Transición.

## **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En el proceso de producción del cemento vía húmeda en la planta de Pertigalete, específicamente en la cocción del material crudo, se genera una gran cantidad de polvillo, aproximadamente el 10% de la producción de clinker que es 3000 ton/día; es decir, se generan 300 ton/día del polvillo, el cual es captado por un sistema de electrofiltros. Este material posee un valor como materia prima que ha sido transportada, triturada y molida, presentando algunas características como su alto contenido de óxido de calcio o cal, de aproximadamente 40%, y de óxido de silicio; lo que le permitiría ser utilizado como posible aditivo en la producción de yeso tipo I.

Actualmente una parte de este polvillo es introducido nuevamente al proceso de fabricación de cemento, y la otra parte es destinada a patios de almacenamiento provisionales, en donde se acumulan creando problemas

ambientales y de espacio físico; así como gastos de transporte y manejo de dicho residuo. Por ello se ha decidido minimizar esta problemática incorporando parte de este polvillo al yeso tipo I, a fin de disminuir su cantidad a valores relativamente bajos, que adicionalmente permitan aumentar la producción de la planta de yeso.

Con el objetivo de evaluar la adición del polvillo residual de los hornos de clinker de Planta I al yeso tipo I de la planta de Pertigalete de Cemex Venezuela Empresa en Transición, se reproducirá a nivel de laboratorio la cocción y molienda del yeso tipo I, lo que permitirá estimar las variables más importantes que afectan la cocción del yeso. Posteriormente se determinará el tiempo de fraguado y la resistencia a la compresión de muestras de yeso calcinado con diferentes porcentajes de polvillo, para de esta forma establecer las posibles relaciones entre la adición del polvillo y las variables del proceso de cocción y de molienda del yeso, lo que permitirá elegir la relación yeso calcinado-polvillo que cumpla con las especificaciones de la norma COVENIN 3638:2000, norma venezolana que establece los requisitos que deben cumplir los yesos de construcción y moldeo. Finalmente basado en el cumplimiento de la norma anteriormente nombrada se calculará la incidencia en producción del yeso tipo I por efecto de la adición de polvillo.

En general, con este proyecto se pretende disminuir el impacto ambiental del polvillo depositado en patios, ya que una parte del mismo podría ser destinado al uso como materia prima en la fabricación de yeso calcinado y a la vez disminuir los costos en el consumo de yeso crudo importado.

### **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo general**

Evaluar la adición del polvillo residual de los hornos de clinker de Planta I al yeso tipo I de la planta de Pertigalete de Cemex Venezuela, Empresa en Transición.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Reproducir a nivel de laboratorio la cocción y molienda del yeso tipo I.
2. Estimar las variables más importantes que afectan la cocción del yeso.
3. Determinar el tiempo de fraguado y la resistencia a la compresión de muestras de yeso calcinado con diferentes porcentajes de polvillo.
4. Establecer posibles relaciones entre la adición del polvillo y las variables del proceso de molienda y cocción del yeso.
5. Elegir la relación yeso calcinado-polvillo que cumpla con las especificaciones de la norma COVENIN 3638:2000.
6. Calcular el incremento de la producción del yeso tipo I por efecto de la adición del polvillo.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 ANTECEDENTES**

Salazar, S. (1997) [4], determinó las causas que originan las fluctuaciones en los diferentes parámetros de calidad durante el proceso de fabricación del yeso tipo VII. Este trabajo asegura que las fluctuaciones se deben a la presencia de cloruros. En cuanto a la evaluación de los equipos encontró que la cámara de combustión del horno trabaja con un porcentaje de aire en exceso bastante elevado y que las pérdidas de calor influyen considerablemente en los tiempos de cocción. Este trabajo se diferencia de la investigación en curso debido a que en él se evalúa la técnica de fabricación del yeso tipo VII y no la del yeso tipo I, como pretende hacerse en la presente investigación. Además en el trabajo realizado por Salazar se evalúa el comportamiento del yeso tipo VII con la adición de cloruro de calcio y de sodio, ácido cítrico y bórico y bórax, mientras que en la presente investigación se evalúa el comportamiento del yeso tipo I con la adición del polvillo residual de los hornos de la industria cementera.

Silva, H. (1988) [5], diseñó un proceso para obtener sulfato de potasio a partir del polvillo subproducto de los hornos rotatorios en la industria del cemento, el cual es comúnmente desperdiciado en las plantas que operan por el proceso húmedo. El polvillo, una vez libre de álcalis, reúne las condiciones químicas para ser retornado al proceso de fabricación del cemento. Esta investigación tuvo su enfoque en determinar si el polvillo de los hornos de una industria cementera era apto para ser retornado a la

producción de cemento, así como diseñar y evaluar económicamente una planta para obtener sulfato de potasio, diferenciándose de la investigación en curso que evalúa la incorporación del polvillo, al que se hace referencia, al proceso de producción del yeso tipo I.

## **2.2 EL YESO**

### **2.2.1 Aspectos históricos**

El yeso ha sido conocido y utilizado desde la más remota antigüedad, principalmente en países de clima seco. Tal vez las primeras noticias de su empleo corresponden al antiguo Egipto.

En la construcción se ha empleado el yeso para unir materiales o elementos constructivos, para protección de elementos internos o externos o para la decoración. A pesar de su larga historia, poca fortuna ha tenido en cuanto se refiere a su fabricación. Esta ha sido rutinaria y poco económica y sin duda por esta razón, la extensión de su uso ha sido limitada.

Sin embargo, a partir de la primera guerra europea, la industria yesera ha experimentado un considerable desarrollo, perfeccionando los métodos de la fabricación y aumentando el número de sus productos como consecuencia de su mejor calidad [3].

### **2.2.2 Naturaleza y explotación del yeso**

La roca llamada piedra de yeso o algez es la materia prima más común para la fabricación del yeso, se encuentra frecuentemente en la naturaleza y está compuesta por sulfato cálcico dihidratado. El yeso comercial se obtiene

por deshidratación parcial de la roca de algez que sometida a temperatura de aproximadamente 170 °C, pierde molécula y media de agua, formándose el sulfato de calcio hemihidratado. Se obtiene así el yeso cocido o deshidratado, el cual amasado con agua se rehidrata formando de nuevo el hemihidrato.

El sulfato de calcio dihidratado es una roca blanca cuando no está contaminada de impurezas y, en general, presenta colores claros. Su dureza es 2 en la escala de Mohs y su densidad varía de 2,3 a 2,4 Kg/dm<sup>3</sup>. Su aspecto cristalino puede ser netamente cristalino o amorfo; en este caso, sus cristales son irregulares y están entremezclados de tal forma que le dan un aspecto no cristalino. En la naturaleza se distinguen las variedades laminar, fibrosa y ordinaria y común [3].

El color del yeso como mineral generalmente es blanco o transparente, pero puede ser gris, amarillento, verde, rojo o pardo, estando el color relacionado en la mayoría de las ocasiones con la presencia de impurezas, en especial hierro, del que toma el color según su estado de oxidación.

Mecánicamente es algo flexible aunque tiene un periodo elástico pequeño. Es soluble en ácido clorhídrico y en agua caliente. Funde con facilidad y se hace opaco por la pérdida del agua interlaminar. Su índice de refracción es  $n = 1,52$  y su brillo es generalmente vítreo, aunque puede ser perlado o sedoso, según la variedad. Se reconoce fácilmente por su dureza baja (se raya con la uña) y por la exfoliación característica. Además en solución ácida con cloruro de bario, da un precipitado blanco de sulfato de bario [6].

Como el yeso es un material barato, también lo han de ser todas las operaciones que comprende la fabricación. Así pues, es casi obligado que la piedra de yeso aflore a la superficie para que se pueda explotar a cielo abierto, ya que de lo contrario, se encarece notablemente esta fase de la producción. El tipo de explotación depende fundamentalmente de las circunstancias particulares de cada cantera de yeso. La maquinaria a utilizar depende de la magnitud de la producción, así como de los distintos minerales que se puedan extraer de la cantera [3].

### **2.2.3 Factores que condicionan la calidad de los yesos aglomerantes**

El fraguado del yeso, que es el resultado de un proceso de hidratación, que al amasar el yeso hemihidratado con agua se endurece en un plazo breve, el cual va acompañado de una fuerte elevación de temperatura y un ligero aumento de volumen.

Finura del molido, es importante debido a que al mezclarlo con agua ocurre una reacción, por tanto, a mayor grado de finura, más completa será la reacción y en consecuencia se mejorará la calidad del producto obtenido.

Expansión, cuando una masa de yeso aglomerante se mezcla con agua y se endurece, se produce una expansión como consecuencia del rápido crecimiento de los cristales durante el fraguado. Esta propiedad hace del yeso un material muy apropiado para el molde, aumentando de volumen al endurecer y penetrando en todos los intersticios de este.

Resistencias mecánicas, las resistencias a la tracción y a compresión de los yesos dependen de su naturaleza, de su composición, de su finura, de

la cantidad de agua de amasado y del contenido de humedad al momento de la ruptura.

Permeabilidad, el yeso es un material que no puede emplearse en lugares expuestos a la acción del agua, ya que existe una rápida pérdida de resistencia que experimenta el material fraguado al absorber agua ávidamente a través de la red capilar [3].

#### **2.2.4 Deshidratación del yeso**

El yeso para construcción se fabrica calcinando piedras de yeso a temperaturas alrededor de 120°C y pudiendo llegar a 900°C. La piedra de yeso está compuesta por sulfato de calcio hidratado; con la cocción el agua se va perdiendo, en el entorno de los 120°C se desprende parte del agua, dando lugar al semihidrato, continuando el calentamiento, el yeso acaba perdiendo todo el agua, quedando anhidrita, que sobre los 800 °C comienza a descomponerse en SO<sub>3</sub>, gas que se emana a la atmósfera, y CaO (cal viva) [6].

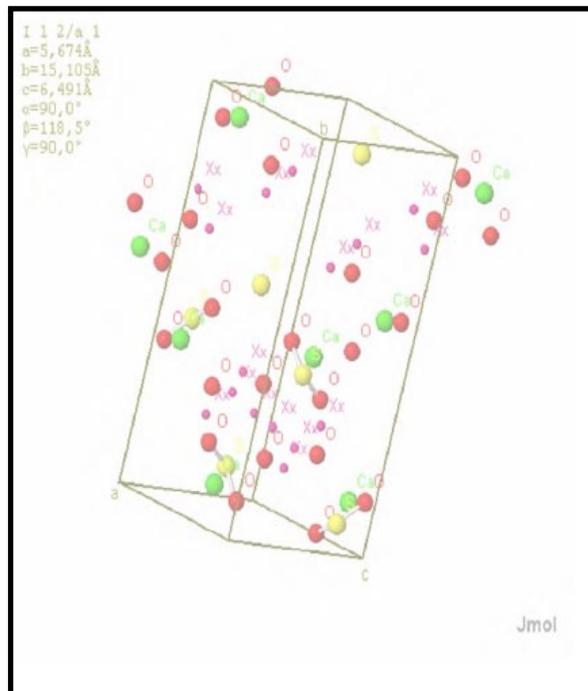
##### **2.2.4.1 Sistema sulfato cálcico-agua**

En la literatura científica se conoce como sistema sulfato cálcico-agua al conjunto de compuestos químicos procedentes de la deshidratación del yeso y a todos sus polimorfos. Estos productos o fases, pese a ser conocidos y estudiados desde el siglo XIX, son objeto de amplio debate académico, persistiendo la discusión sobre su naturaleza precisa.

Los campos de estabilidad y las temperaturas de transformación de fase son difíciles de discernir con exactitud, debido a la gran cantidad de

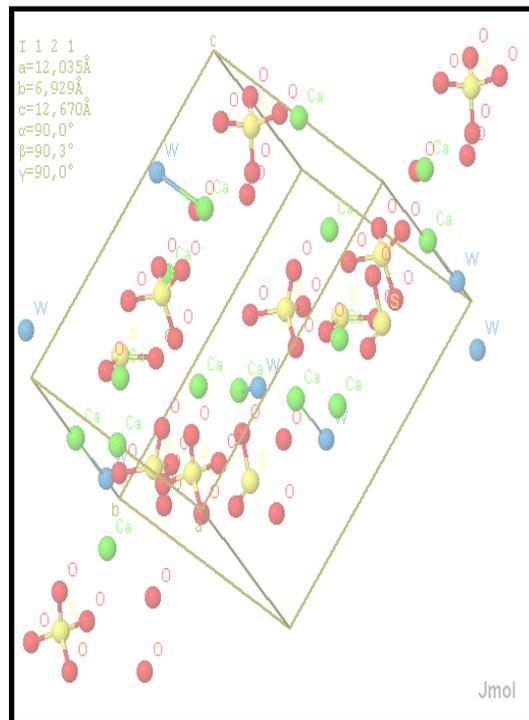
factores que influyen en el proceso, siendo referidos en la literatura siempre con intervalos de temperatura o entornos. Las fases del sistema sulfato cálcico-agua más aceptadas son cinco:

- Yeso: sulfato de calcio con dos moléculas de agua, conocido como dihidrato. Tienen simetría monoclinica y su fórmula química es  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Al terminar el ciclo de deshidratación-rehidratación, lo que se denomina ciclo tecnológico del yeso, el sulfato de calcio vuelve a formarse como fase estable del sistema, entonces se habla de yeso rehidrato o yeso endurecido. En la figura 2.1 se observa la estructura del yeso.



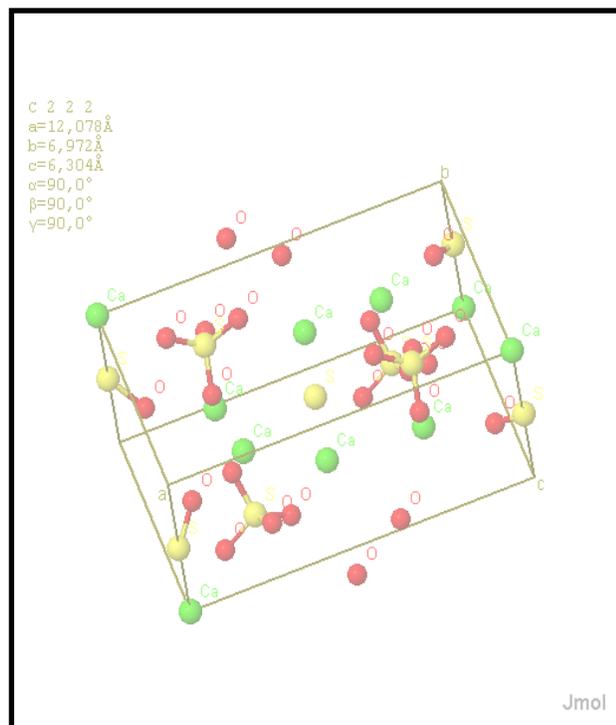
**Figura 2.1 Estructura del yeso, según los datos de Schofield y colaboradores (1996). Coincidente con los parámetros generales aceptados por Chang, Howie y Zussman (1996). Tomada de la American Mineralogist Crystal Structure Database[6].**

- Semihidrato: sulfato de calcio con media molécula de agua, denominado semihidrato (SH) o hemihidrato. Existe en dos formas alotrópicas, el semihidrato alfa ( $\text{SH}\alpha$ ) y el semihidrato beta ( $\text{SH}\beta$ ), que se diferencian fundamentalmente en la morfología cristalina y en el comportamiento. Son fases de la primera etapa de deshidratación del yeso y se da una u otra según la presión de vapor de agua del sistema: el alfa a alta presión y el beta a baja. Su simetría es hexagonal, su fórmula es  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ . El agua en la estructura del semihidrato se aloja en los canales de un modo helicoidal rodeando a los oxígenos, pero tiene afinidad por el catión de calcio, con el que se enlaza mediante fuerzas de Van der Waals. En la figura 2.2 se muestra la estructura del semihidrato.



**Figura 2.2 Estructura del semihidrato según Ballirano y colaboradores (2001). Imagen tomada de la American Mineralogist Crystal Structure Database (2007) [6].**

- Anhidrita soluble: anhidrita III (AIII) o anhidrita gamma (A $\gamma$ ). Es la primera fase de deshidratación total del yeso, cristaliza en el sistema hexagonal y posee una pequeña cantidad de agua variable ( $\epsilon$ ), su fórmula química es por tanto  $\text{CaSO}_4 \cdot \epsilon \text{H}_2\text{O}$ . Se han descrito tres estado límite de la anhidrita soluble, por diferencias texturales y de comportamiento, son la anhidrita III beta (AIII $\beta$ ), la anhidrita III prima beta (AIII' $\beta$ ) y la anhidrita III alfa (AIII $\alpha$ ). La estructura de la anhidrita insoluble se puede observar en la figura 2.3.



**Figura 2.3 Estructura de la anhidrita soluble, según Bezou y colaboradores (1995). Tomada de la American Mineralogist Crystal Structure Database (2007) [6].**

- Anhidrita insoluble: anhidrita II (AII), o anhidrita beta (A $\beta$ ). Esta fase está totalmente deshidratada y su organización cristalina responde a una

simetría ortorrómbica, coincidiendo plenamente con la anhidrita natural. Para algunos autores, el tamaño y forma de los canales de esta fase es clave para que no pueda alojarse agua con comodidad. De la anhidrita ortorrómbica se han descrito tres polimorfos en función de su comportamiento de rehidratación, y se corresponden a tres estadios de temperatura, son la anhidrita ligeramente soluble (All-s), la anhidrita totalmente insoluble (All-u), y la anhidrita parcialmente disociada o anhidrita de pavimentos (All-E). En el último caso la molécula de sulfato cálcico comienza a descomponerse en  $\text{SO}_3$  y  $\text{CaO}$ , se habla de yeso hidráulico para esta fase. Al poseer cal libre por la descomposición, puede formar fases hidráulicas a altas temperaturas, por combinación con silicatos que acompañen al yeso como impureza (habitualmente arcillas) y que también sufran el proceso de calentamiento a alta temperatura, o bien por la adición de material a modo de mezcla o aditivo.

- Anhidrita de alta temperatura: anhidrita I (AI), anhidrita disociada, o anhidrita alfa ( $A\alpha$ ). Esta anhidrita tiene simetría ortorrómbica, pero sólo es estable a alta temperatura, por encima de  $1200^\circ\text{C}$ , al descender la temperatura por enfriamiento pasa a anhidrita II [6].

#### **2.2.4.2 El proceso de deshidratación**

En el proceso de deshidratación del yeso influyen numerosos factores. Por una parte hay un grupo de variables propias de la naturaleza del material (factores internos), que se pueden dividir en tres bloques: factores estructurales (presencia de vacancias y dislocaciones), texturales (tamaño, distribución granulométrica, morfología, defectos superficiales de los cristales y existencia de maclas) y composicionales (impurezas), y por otra parte

factores ambientales (externos), fundamentalmente: temperatura, presión, presión de vapor de agua y velocidad de calentamiento.

Para estudiar el proceso de deshidratación, los científicos, a su vez, han seguido tres vías: la determinación de las estructuras cristalinas de los productos formados a distintas temperaturas, la observación microscópica de la deshidratación, y la medida de las tasas de transformación ( $\alpha$ ), de unas fases en otras. Todas estas experiencias han sido realizadas variando las condiciones del material (factores internos) y las condiciones ambientales del sistema (factores externos), dando lugar a una abundante literatura sobre el tema. Los resultados de estos estudios llevan a dos formas de explicar el proceso: por una parte los modelos cinéticos; y por otra los modelos morfológico-texturales, a partir de los cuales se han elaborado las teorías de la deshidratación al uso. En especial la teoría de la deshidratación por crecimiento cristalino, y la de deshidratación topotáctica o teoría coloidal.

La existencia de dislocaciones en los sólidos en proceso de deshidratación es muy importante de cara a su reactividad. En el yeso y sus derivados las dislocaciones son más abundantes en los planos de exfoliación y en los bordes de los cristales. Esta cuestión de orden microestructural y textural afecta a la cinética de la deshidratación y condiciona la morfología de las fases resultantes del proceso de calentamiento. En la teoría de la deshidratación topotáctica la estructura se acomoda y se reordena, y las transformaciones son a pequeña escala, de modo que la forma exterior se mantiene, aunque matizada por la formación de microbloques tridimensionales de material debido a la fisuración por deshidratación, según los ejes principales de simetría y las direcciones perpendiculares a ellos [6].

### 2.2.4.3 Transformaciones de fases

La secuencia teórica de transformación por deshidratación es la siguiente [6].

El dihidrato (DH) se transforma en semihidrato (SH) que puede ser  $\alpha$  o  $\beta$ , éste luego se transforma en anhidrita III (AIII) cuya estructura es hexagonal, posteriormente se forma la anhidrita II (AII) que finalmente se transforma en anhidrita I (AI). Pero la complejidad del sistema hace que esto suceda de múltiples maneras y que el comportamiento térmico del yeso no esté todavía completamente conocido, a modo de síntesis sobre la literatura al respecto se presentan las siguientes consideraciones:

#### A. Transformación yeso-semihidrato

Al calentar el yeso se produce un fenómeno de deshidratación por pérdida del agua estructural. Considerando que el agua puede dividirse según su afinidad en agua aniónica y catiónica, también se observa un comportamiento diferente frente al calentamiento. El agua catiónica, que está unida mediante enlaces débiles a los tetraedros sulfato, empieza a perderse por encima de 40°C, y el proceso finaliza totalmente entre 120 y 150°C. El agua aniónica (enlazada a los oxígenos, mediante puentes de hidrógeno, más fuertes que las fuerzas de Van der Waals), se puede perder, o bien de un modo continuo, desde el principio del calentamiento, o bien tras el escalón de la pérdida del agua catiónica, según sean las condiciones del sistema.

En este proceso influye la energía que se esté suministrando al yeso, así como la velocidad con la que esto suceda, y la presencia de vapor de agua, lo cual acelera la tasa de deshidratación, y como los defectos

cristalinos y las impurezas ayudan a la transformación, los yesos mejor cristalizados y más perfectos tienen tiempos de deshidratación mayores. Así se forma el semihidrato, con una cantidad de agua estructural entorno a 0,5 moléculas, según estudios de resonancia magnética nuclear, con un exceso, no estructural que podría estar en forma de agua ceolítica, ya que su estructura presenta unos canales interiores cuyo diámetro podría alojar moléculas de agua en forma de vapor, así como también se puede quedar retenida una pequeña cantidad de agua en las imperfecciones de las caras cristalinas. De hecho, a nivel cristalino, el calentamiento supone una disolución parcial de la superficie del yeso y un crecimiento del semihidrato como nueva fase estable, con el agua reorganizada, lo cual, da lugar a una configuración geométrico-espacial diferente, que responde a otra simetría estructural.

Para explicar el fenómeno del crecimiento cristalino de los semihidratos se ha propuesto un modelo de deshidratación por nucleación-propagación, según el cual, se forman núcleos de semihidrato en dislocaciones y otros lugares con defectos (vacancias) en el cristal del dihidrato, se produce el crecimiento cristalino acompañado de pequeñas reacciones en las áreas circundantes a los núcleos y se propaga a lo largo de los planos de exfoliación.

En función de la presión de vapor de agua sobre las caras de los cristales nuclea el polimorfo alfa (alta presión), y el semihidrato beta (baja presión), coexistiendo ambos frecuentemente. Si la deshidratación se realiza en autoclave, a presiones superiores a 1 bar, la formación de semihidrato se produce en estado líquido, lo que propicia un mecanismo de disolución-precipitación, dando lugar a la variedad alfa. Si la presión es inferior a 1 bar, el agua se elimina como vapor, dejando un sólido microporoso constituido

por un conjunto amalgamado de pequeños cristales de semihidrato beta. La presencia de aditivos e impurezas (sobre todo las solubles), influye en el proceso de crecimiento cristalino del semihidrato alfa sobre el yeso. El hierro es un inhibidor del crecimiento cristalino de los semihidratos.

A alta presión de vapor de agua, la reacción es más fluida y sencilla, mientras que a bajas presiones, el proceso es más complejo. Por otra parte, puede suceder que la deshidratación sea completa a temperaturas relativamente bajas, formándose anhidrita I. También es posible que se dé coexistencia de la anhidrita con los semihidratos, esta anhidrita se da cuando hay una presión de vapor muy baja, y es muy inestable e higroscópica, de modo que suele transformarse en contacto con el aire en semihidrato beta. Ambos polimorfos son en realidad los términos extremos de una serie más o menos continua de variedades intermedias, salvo que por razones industriales se desee fabricar estrictamente uno de los dos polimorfos.

Existe una variedad alfa de baja presión de vapor, con propiedades intermedias, que se forma cuando en el medio se producen oscilaciones bruscas de humedad. Se ha constatado mediante la medida de las energías de activación de las nuevas fases formadas, que la velocidad de cambio de fase no es constante y eso sugiere que en cada caso particular el fenómeno de la deshidratación se puede dar de formas distintas demostrando que además del control por nucleación y crecimiento se da según las condiciones un control por límite de fase y un control por difusión.

## **B. Transformación semihidrato-anhidrita**

El agua, se pierde en los semihidratos (alfa y beta), entre 150 y 200°C. La estructura de los semihidratos contiene canales, según se ha visto

anteriormente, y el agua alojada en los canales se extrae con cierta dificultad, de modo que siempre queda una pequeña cantidad retenida, lo mismo sucede con el agua que se ha introducido en las fisuras producidas en la superficie de los cristales por las tensiones térmicas de la deshidratación. Para algunos autores el agua que queda en la anhidrita soluble, es de carácter ceolítico, ya que la energía de activación necesaria para extraerla de los canales es del mismo orden de la necesaria en las zeolitas. En general el proceso de transformación de semihidrato a anhidrita soluble se produce por la salida del agua y la reordenación de la estructura, que se explica como una pequeña contracción, por lo cual una simetría hexagonal como la del semihidrato es aceptada para la anhidrita.

Para un proceso de deshidratación total, encaja un mejor un modelo de simetría ortorrómbica para la anhidrita. Como se ha visto anteriormente la anhidrita soluble puede formarse directamente del yeso sin pasar por los semihidratos, en régimen de presiones de vapor muy bajas. Para algunos autores, tanto la transformación semihidrato a anhidrita soluble, como la de yeso a anhidrita soluble, se inician en las zonas de dislocaciones que existen en la superficie de los cristales de yeso o semihidrato, produciendo una coalescencia de vacancias, todo ello genera nuevas grietas y fisuras del yeso original, en las que se produce sinterización.

### **C. Transformación anhidrita hexagonal-anhidrita ortorrómbica**

La transformación de anhidrita hexagonal en anhidrita ortorrómbica (AIII a AII), comienza sobre 360°C a presión ambiente. A altas presiones (fabricación en autoclave), se forma anhidrita ortorrómbica entre 160 y 180°C. En las etapas iniciales del proceso aparecen gérmenes desordenados de la anhidrita ortorrómbica en la superficie de la anhidrita hexagonal, estos

gérmenes precisan cierta energía para su organización. El papel del agua residual en el proceso de transformación de AIII a AII está sujeto a controversia, existiendo dos posibilidades: la primera es que se ceda y se pierda, provocando una recristalización en estado sólido (proceso similar al metamorfismo), la segunda posibilidad es que no se pierda sino que se forme un microsistema sulfato cálcico-agua, en el que se desarrolle la (AII) como fase estable a las condiciones de alta temperatura (metasomatismo).

En la fabricación industrial, es difícil que se obtengan fases puras; lo habitual es que se obtengan mezclas en función del tiempo de cocción y la temperatura. Incluso a alta temperatura se obtienen varios tipos de anhidrita ortorrómbica, con diferentes comportamientos durante la rehidratación:

A II-s (Anhidrita ligeramente soluble) producida entre 300 y 500°C, de rápida rehidratación.

All-u (Anhidrita insoluble), producida entre 500 y 700°C, de lenta rehidratación.

All-E (Anhidrita disociada parcialmente), obtenida por encima de 700°C, de tiempo de reacción en la rehidratación intermedio.

#### **D. Descomposición térmica de la anhidrita**

Tras la deshidratación completa, al alcanzar el límite de estabilidad del sulfato de calcio, se produce un fenómeno de descomposición térmica con la ecuación general:



La mayoría de los estudios sobre esta reacción se han realizado mediante análisis térmico diferencial y termogravimetría. Pero el problema resulta muy complejo, pues como ya se ha visto el comportamiento en calentamiento de los sulfatos de calcio es muy complicado y se ve afectado de numerosas variables, tanto internas como externas. En la descomposición afectan principalmente: la atmósfera del horno (vacío en algunos casos, medio acuoso en otros), la tasa de flujo y composición química de los gases presentes, la temperatura, la velocidad de calentamiento, el tamaño y forma de los granos y la presencia de impurezas. Haciendo variar mucho el punto de inicio y la tasa de transformación de cada proceso.

Resumiendo se puede ver, que el efecto de las impurezas hace disminuir el punto de inicio de la descomposición térmica, y por otra parte acelera el proceso. Esto se debe a la formación de polisilicatos, aluminatos o ferritas que puede tener lugar a relativamente bajas temperaturas (750°C). Demostrándose en la literatura científica (Colussi y Longo, 1974) que el aditivo más eficaz en términos generales es la sílice, lo que equivale en términos mineralógicos al cuarzo, como impureza natural del yeso [6].

### **2.2.5 El proceso de hidratación: fraguado del yeso**

El yeso cocido en polvo se amasa con agua para ser aplicado en obra, dando lugar a una pasta con una viscosidad adecuada al tipo de trabajo que se ha de realizar. Al tratarse de un producto deshidratado formado por fases reactivas al agua se produce un fenómeno de rehidratación, conocido como fraguado, y que provoca el endurecimiento de la pasta. El inicio de la reacción de rehidratación se llama principio de fraguado y su conclusión final de fraguado.

Este proceso tiene dos aspectos a considerar: el químico-mineralógico (hidratación-cristalización), y el físico-mecánico-reológico (endurecimiento por aumento de resistencias y cambios de estado: líquido-viscoso-sólido). El estudio experimental y teórico del fraguado del yeso ha sido una constante en la investigación tecnológica de este material. Durante este proceso, el semihidrato y la anhidrita, fases anhidras, o parcialmente hidratadas del polvo de yeso cocido, se transforman en yeso, pudiendo darse este cambio mediante dos mecanismos que han conducido a dos teorías:

#### **2.2.5.1 Teoría del crecimiento cristalino o de la cristalización**

Le Châtelier, siguiendo los estudios iniciados en el siglo XVIII por Lavoisier, propone esta teoría en 1887, aclarando el mecanismo de la hidratación del yeso a la comunidad científica. Parte de la idea de que primero se forma una disolución saturada de la fase anhidra y sobresaturada respecto al dihidrato, a partir de la cual crece el yeso (SNIP, 1982).

Según esta teoría, seguida por la mayoría de los autores, (Arens, 2002) (Singh y Middendorf, 2007), el fraguado se produce en tres fases. La primera se denomina periodo de inducción y termina con el principio de fraguado. Al contacto con el agua de amasado, las fases anhidras se disuelven parcial o totalmente, liberando iones sulfato y calcio en el seno de la disolución, que en poco tiempo queda saturada respecto al yeso como doble hidrato. A partir de esa disolución sobresaturada puede cristalizar el yeso por formación espontánea de núcleos de cristalización (nucleación homogénea), o sobre impurezas, sobre gérmenes inducidos, o sobre las superficies de las fases iniciales que no se hayan disuelto por completo (nucleación heterogénea). La velocidad de hidratación en este estado depende de la abundancia de núcleos, de la velocidad de formación de los mismos y de la velocidad de

crecimiento de los cristales, que viene dada por las condiciones ambientales. La longitud y el tamaño de los cristales depende, entre otros factores de la relación agua / polvo de yeso cocido al ser amasado y de la reactividad del sólido.

Al principio los cristales son muy finos y luego van aumentando de tamaño. Según la teoría del crecimiento cristalino, durante este tiempo, llamado periodo de inducción se están formando y disolviendo los posibles núcleos de crecimiento cristalino, hasta consolidarse los que tienen un tamaño superior a un determinado radio crítico que les estabiliza termodinámicamente. El tamaño del radio crítico es inversamente proporcional a la sobresaturación, de modo que cuanto mayor sea ésta menor será el tamaño crítico necesario para que comience la cristalización. Durante la segunda fase se produce el crecimiento cristalino del yeso. Se va dando a la vez la disolución de los componentes anhidros (semihidratos y anhidritas) y el crecimiento de la fase hidratada estable a presión y temperatura ambiente (yeso).

El crecimiento de los cristales de yeso es alimentado por los iones sulfato de la disolución que difunden a través de la fase acuosa. El yeso crece como placas o como agujas en superficies favorables de las fases anhidras en disolución o sobre los gérmenes. Esta etapa se caracteriza por una elevación de la temperatura del sistema muy significativa, que se llega a percibir manualmente cuando se manipula el yeso. La tercera fase del proceso de fraguado da lugar a una reticulación de los cristales por contacto ínter cristalino de las nuevas formaciones, con ello va aumentando la resistencia de la masa que va a fraguar.

### 2.2.5.2 Teoría coloidal

Esta teoría es reflejo de la teoría coloidal del endurecimiento de cementos enunciada por Michaelis en 1909, en la que se expone que la formación de las nuevas fases hidratadas se produce en un medio gelificado, a través de una película de agua adsorbida por los cristales en disolución. Las tres etapas del fraguado del yeso para los autores que siguen esta teoría, serían: primero un periodo de inducción en el que se produce la adsorción de agua por parte de las fases anhidras a través de fuerzas electrostáticas e introducción en su microestructura a través de fenómenos de microcapilaridad, formando una estructura gelificada lo cual da lugar al principio del fraguado. Esta etapa está afectada por la presencia de aditivos e impurezas que actúan sobre el proceso de gelificación. La segunda etapa produce un aumento de volumen por penetración del agua a niveles intermoleculares e interatómicos, con el inicio de la formación de yeso y un fuerte aumento de la temperatura del sistema, que acabaría con el final de fraguado. Finalmente hay un periodo de endurecimiento por interpenetración de los cristales de yeso, pero sin apenas aumento de temperatura.

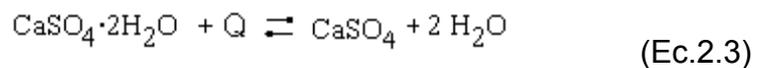
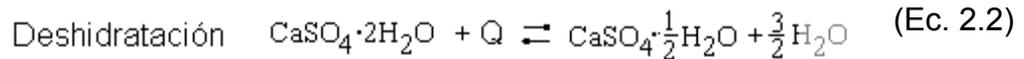
Esta teoría ha ido perdiendo partidarios con el tiempo para el sistema del semihidrato, ya que la moderna concepción del proceso de fraguado incluye en la etapa de disolución una captación de agua, que se dispone como una fina lámina de agua sobre los cristales de las fases deshidratadas. Es en el interior de esta interfase acuosa, donde se produce la nucleación y posterior crecimiento cristalino, lo cual podría representar la región gelificada de la teoría coloidal [6].

### 2.2.6 Transformaciones y variables alotrópicas más importantes del yeso

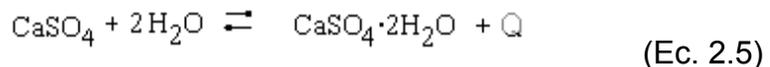
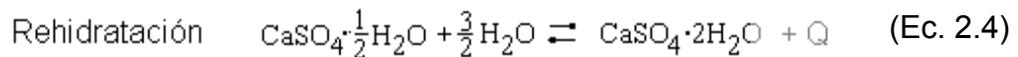
Las variables alotrópicas más importantes relacionadas con las propiedades técnicas del yeso son la  $\alpha$  y la  $\beta$  para el hemihidrato y para la anhidrita III [7].

La razón fundamental de la aplicación del yeso en la construcción es la facilidad con que se dan las siguientes transformaciones en las que está implicado (reacciones reversibles):

Por efecto de calentamiento, el yeso dihidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) cambia de fase y pierde agua combinada transformándose en semihidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ ) y anhidritas ( $\text{CaSO}_4$ ).

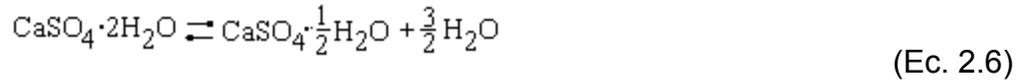


Cuando se le añade agua al semihidrato y a algunas anhidritas tienen capacidad de endurecer (fragar), quedando el yeso fraguado en su estado original (yeso dihidrato).

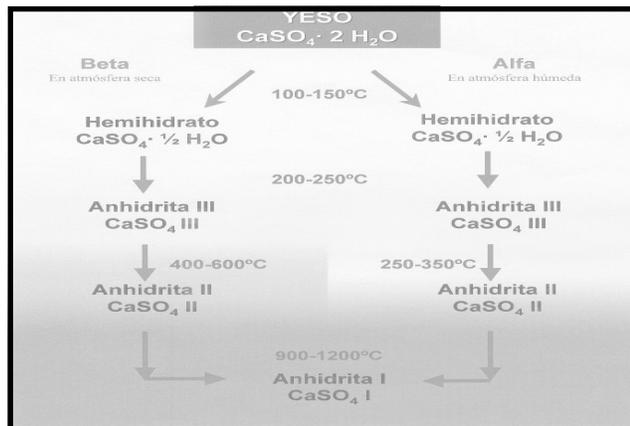


Partiendo de yeso crudo dihidrato (DH) (cuyos cristales son del sistema monoclinico) y por calentamiento, ocurre la primera transformación a

hemihidrato o semihidrato (SH) (del sistema romboédrico). A presión atmosférica la temperatura de equilibrio es de 107°C, siendo una reacción endotérmica que requiere una energía de unas 600 MJ/t de semihidrato.



En esta reacción, el equilibrio se establece en función de la presión de vapor existente. La constante de equilibrio es proporcional a la presión de vapor de agua elevado a 3/2, por lo que dependerá de que la atmósfera sea seca o muy húmeda, para influir en el equilibrio de la reacción y por consiguiente en su velocidad y en la forma de los cristales obtenidos. Con atmósferas secas la deshidratación es más brusca y genera cristales aciculares de semihidrato, denominados BETA. En cambio con atmósferas húmedas y presiones de 2-4 bares se generan cristales de SH más gruesos con formas más cuadradas, denominados del tipo ALFA [8]. Las temperaturas a las cuales ocurren estas transformaciones se encuentran en la figura 2.4.



**Figura 2.4** Esquema de las transformaciones del dihidrato, con sus principales fases y estado alotrópicos de interés técnico [8].

Los SH más empleados en la construcción son los SH-beta, que son fabricados en atmósferas secas y con depresión, para favorecer la reacción. Los SH-beta son obtenidos industrialmente a temperaturas superiores a la de equilibrio (107 °C) del orden de 120-190 °C, según el horno, para favorecer cinéticamente el proceso de calcinación. La capacidad de fraguar del semihidrato hace de este producto la fase básica en la fabricación de yesos [8].

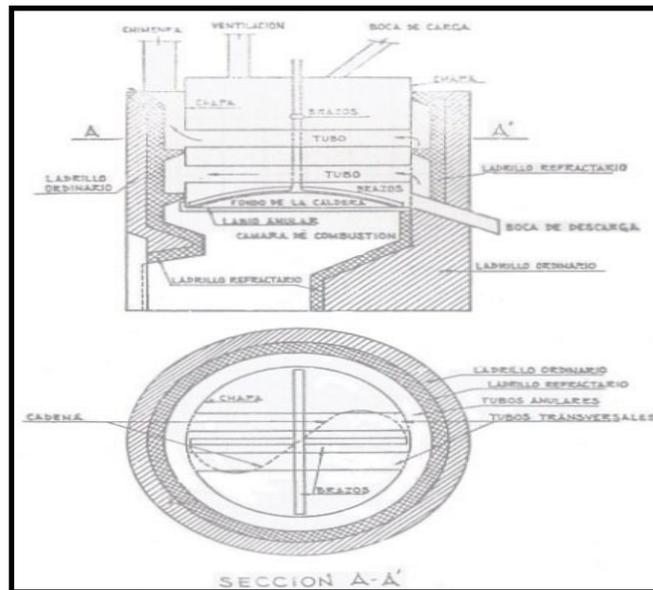
El yeso aglomerante comercial contiene, además de semihidrato, contenidos notables de anhidritas y de dihidrato como consecuencia de la poca diferencia que existe en las temperaturas de deshidratación u obtención de éstas fases y la dificultad de seleccionar técnicamente estos estrechos intervalos de temperatura [9].

### **2.3 PRODUCCIÓN DEL YESO CALCINADO**

El yeso crudo ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) es la materia prima para la fabricación del yeso aglomerante comercial. En la planta Pertigalete este material proviene generalmente de España o en ocasiones de México, transportado por vía marítima en embarcaciones de aproximadamente 30.000 ton. El material es descargado y transportado mediante camiones hacia un lugar al aire libre que sirve como depósito, luego cierta cantidad es llevada hacia el patio de almacenamiento de la planta de yeso.

Del patio de almacenamiento el material crudo cae por gravedad hacia una banda transportadora mediante un túnel de recuperación con compuertas accionadas manualmente, al final de la banda está un elevador de cangilones que transporta el material hacia la tolva de alimentación del molino Raymond, cuya función es la de dosificar, mediante un alimentador

tipo exclusiva, el yeso en el molino antes mencionado, el cual es de rodillos suspendidos. Al molino se le inyecta aire a través de un ventilador primario a una presión ligeramente superior a la presión atmosférica y a una temperatura aproximada de 140°C con la función de arrastrar el material ya molido hacia un ciclón que lo separa del aire. El material es llevado a la tolva de almacenamiento de yeso crudo molido, el cual es transportado mediante un tornillo sin fin al horno que es de caldeo indirecto; es decir, los gases de combustión no se encuentran en contacto directo con el material, en la figura 2.5 se puede observar la estructura de este horno. Durante la cocción, lo que se quiere es que el yeso crudo se convierta en yeso hemihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) y así adquirir sus propiedades de aglomerante.

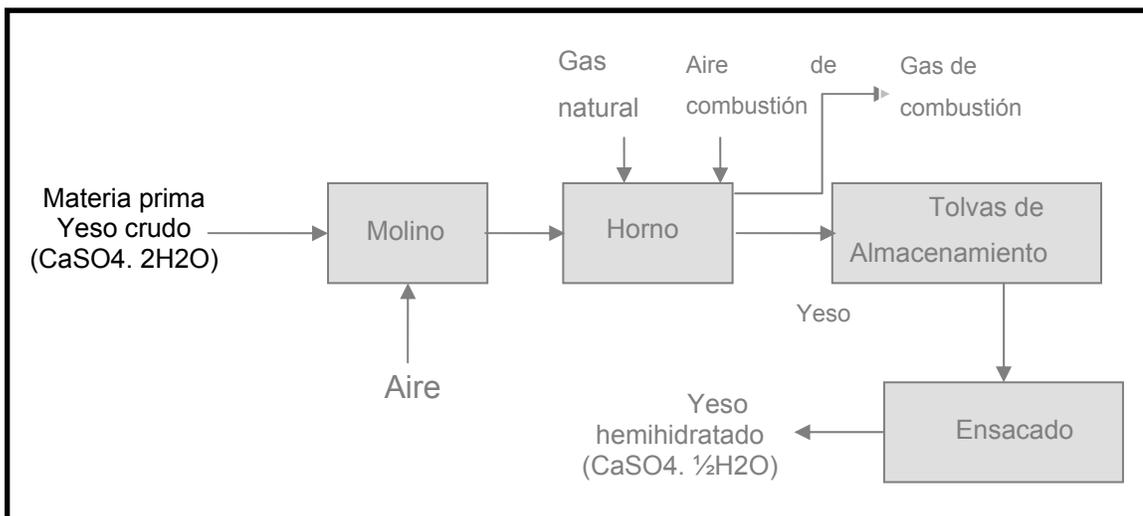


**Figura 2.5 Estructura del horno “tipo caldera” de la planta de yeso de Pertigalete [3].**

La alimentación del yeso al horno se realiza en cuatro etapas, por lo que la temperatura del mismo varía a medida que se van realizando estas

alimentaciones. Inicialmente el horno se encuentra a una temperatura de 180°C, al agregar la primera carga de alimentación la temperatura comienza a descender a 110°C aproximadamente y se elevará al dejar de alimentar el horno a 120°C, luego se realizan las alimentaciones restantes cada 15 min, en los cuales la temperatura del horno varía entre 110 y 113°C hasta que se deja de alimentar, la carga del horno que ha estado flotando en una atmósfera de vapor se asienta, cesando la ebullición turbulenta y la temperatura del horno sube rápidamente descargándose el yeso a una temperatura aproximada de 180°C.

El proceso de cocción tiene una duración aproximada de 3 horas 10 minutos, desde que se comienza a alimentar hasta que se descarga. El yeso una vez calcinado se pasa a una fosa, en la cual se deja enfriar para posteriormente llevarlo a través de roscas transportadoras y elevadores de cangilones hacia las tolvas de ensacado, donde es colocado en sacos de 30 kg. Finalmente es arreglado en paletas para el transporte en gandolas. El proceso de una forma muy general se ilustra en la figura 2.6.



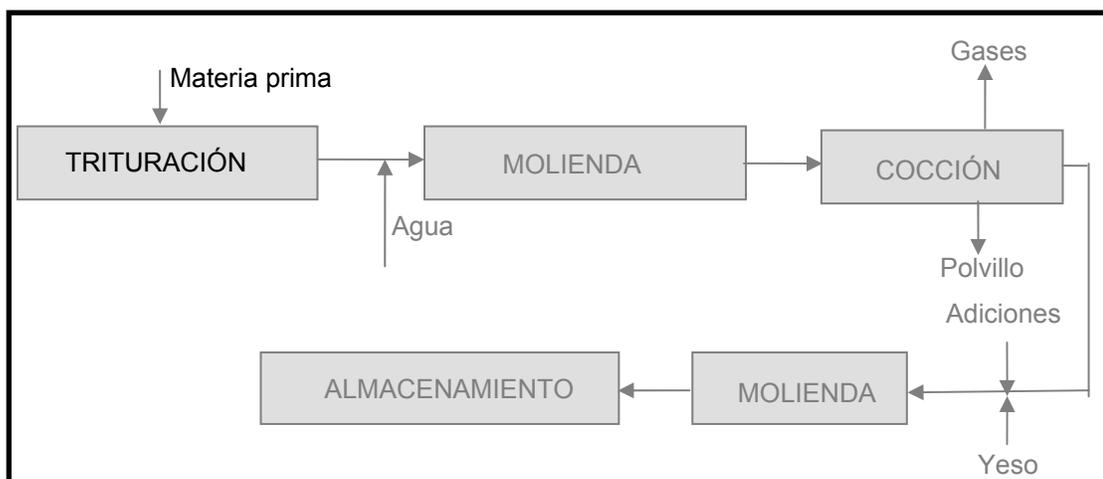
**Figura 2.6 Proceso de fabricación del yeso tipo I en la planta Pertigalete de Cemex Venezuela, Empresa en Transición.**

#### 2.4 POLVILLO DE LOS HORNOS

En la fabricación de cemento Portland, que se muestra en la figura 2.7, el proceso comienza en las canteras, donde son extraídos los diferentes materiales necesarios para aportar los componentes básicos al cemento (cal, sílice, alúmina y óxido de hierro). Estos materiales son triturados y molidos hasta un tamaño determinado, para que de esta forma se realicen a cabalidad las diferentes reacciones en el horno. La molienda del material crudo se realiza por vía húmeda o seca, dependiendo del tipo de horno en uso. En los hornos, lo primero que ocurre es la expulsión del agua de hidratación de la arcilla y la expulsión del anhídrido carbónico de la caliza. El carbonato de calcio cede su anhídrido carbónico a temperatura entre 700 y 1000 °C y se convierte en cal viva, la cual al aumentar la temperatura entra en reacción con las otras sustancias existentes en el crudo. Entonces éste adquiere una coloración amarilla, se forman silicatos y aluminatos de calcio y adquiere propiedades hidráulicas, pero formándose todavía únicamente lo que se denomina “inocidos” o “poco conocidos”. Cuando la temperatura

de cocción rebasa los 1200°C el producto adquiere una coloración gris. A los 1350 °C empieza a apuntar la clinkerización del material que es ya normal a los 1400-1480 °C, caracterizada por la formación de aluminoferritas de calcio. Se forma entonces el clinker que presenta una coloración negro-verdosa.

En los hornos se genera una gran cantidad de polvo (polvillo), particularmente en los hornos rotatorios, aproximadamente el 10% de la producción diaria de clinker. En ellos hay una gran cantidad de partículas muy finas que forman una nube de polvo a medida que el material da tumbos a lo largo del horno, la cual se desplaza hacia el extremo de la salida portada por los gases de combustión. La calcinación de la caliza produce bióxido de carbono y partículas finas que se incorporan a la corriente de los gases que fluyen a lo largo del horno. Los vapores alcalinos desprendidos a causa de la temperatura van portados en los gases de combustión hasta que el descenso de la temperatura los hace condensar sobre la superficie de las partículas de polvo. Estas partículas deben captarse antes de descargar los gases a la atmósfera a fin de evitar la contaminación del aire [5].



**Figura 2.7 Diagrama de flujo del proceso de fabricación del cemento [5].**

## **2.5 PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO**

Un electrofiltro o precipitador electrostático es un aparato que limpia gases del proceso usando fuerzas eléctricas para quitar partículas sólidas que acarrea el flujo de gas. Los gases sucios se pasan a través de un campo eléctrico entre electrodos de polaridades opuestas. Los electrodos de descarga, llamados así por la corona de descarga que resulta de la aplicación de alto voltaje; imparten una carga negativa a las partículas. Estas partículas son atraídas a los electrodos de recolección que son positivos respecto a los electrodos de descarga y en la práctica están conectados a tierra.

En el caso de polvo, las partículas se acumulan en el electrodo de recolección hasta que una fuerza de sacudido se aplique a los electrodos para soltar y desalojar esta capa en aglomerados lo suficientemente grande que por su peso caen en la tolva sin reintroducirse.

El proceso de precipitación electrostática consiste en tres pasos fundamentales: carga de partículas, recolección de partículas y desalojo de material recolectado. Los primeros dos pasos son funciones de las condiciones eléctricas dentro del precipitador, mientras que el tercero depende más de las fuerzas mecánicas.

El monóxido de carbono (CO), es un gas, letal, venenoso e inflamable en grandes concentraciones. Si hay presencia mayor de 1% en los gases que entran al electrofiltros, puede haber una explosión, por el alto voltaje desarrollado en su interior, lo que se conoce como efecto de arco. Cuando se

presenta eventualmente esta situación anormal, el horno continúa funcionando, pero el sistema queda inactivo por falta de energía eléctrica, los gases de salida pasan directamente por el filtro electrostático sin depurarse y salen a través de la chimenea en grandes volúmenes. Si no se controla la situación en pocos minutos, hay que parar el horno [10].

## CAPÍTULO 3

### DESARROLLO DEL TRABAJO

#### 3.1 REPRODUCCIÓN A NIVEL DE LABORATORIO DE LA COCCIÓN Y MOLIENDA DEL YESO TIPO I

##### 3.1.1 Reproducción de la cocción

En esta etapa se simuló la cocción o proceso de deshidratación del yeso crudo a nivel de laboratorio. El yeso crudo utilizado fue el proveniente del molino Raymond de la planta de yeso. El proceso consistió en cocer el yeso en una estufa de laboratorio (marca BINDER, modelo 1505330000202, mostrada en la figura 3.1).



**Figura 3.1 Estufa de laboratorio usada en la simulación de la cocción.**

Para ello se usaron muestras de 70 g de yeso, ya que esta cantidad es la que genera una capa lo más fina posible en los tamices que son N° 170 (apertura de 90  $\mu\text{m}$ ), fueron elegidos estos tamices debido a que ellos poseen una apertura de malla menor que el tamaño promedio de los granos de yeso y así evitar la pérdida de material, adicionalmente se incorporó una bandeja de aluminio debajo de los tamices antes colocar el yeso en los mismos, con el objetivo de transferir el material, que eventualmente pudo pasar a través de la malla, de nuevo al tamiz. Esto se puede observar en la figura 3.2.



**Figura 3.2 Bandeja de aluminio colocada debajo del tamiz que se emplea en la simulación de la cocción.**

Una vez colocado el yeso en el tamiz, el siguiente paso es crear una capa muy fina, tipo película, lo cual se logra extendiendo el yeso con la ayuda de un palito de madera, como se muestra en la figura 3.3.



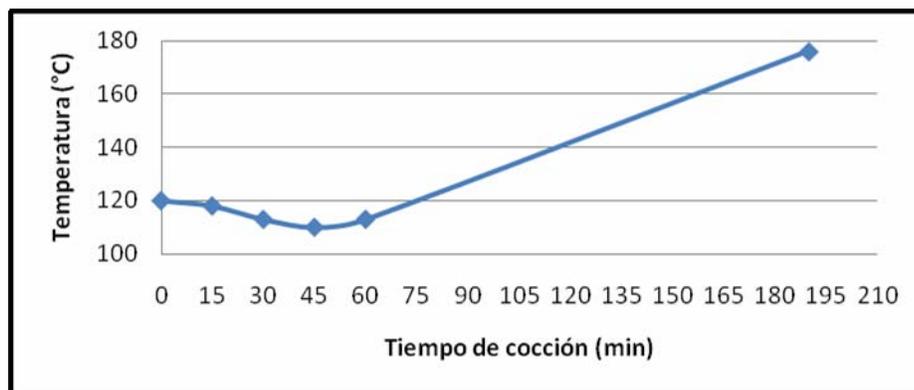
**Figura 3.3 Forma de extender el yeso en el tamiz para realizar la simulación de la cocción.**

Posteriormente se procede a limpiar con un pincel las paredes del tamiz, de manera que el yeso no se quede pegado de éstas, formando una capa lo más uniforme posible, como se observa en la figura 3.4.



**Figura 3.4 Procedimiento de compactación del yeso crudo en el tamiz para la simulación de la cocción.**

El mismo procedimiento anterior se realizó en cada tamiz para completar 280 g de yeso en cuatro tamices. Una vez preparados los tamices, se procede a introducirlos en la estufa, estando ésta a una temperatura de 120°C, luego se realiza la primera perturbación disminuyendo la temperatura hasta 113°C, luego a 110°C, se incrementa de nuevo a 113°C y finalmente se eleva hasta la temperatura de salida que es de 176°C, éste es el procedimiento seguido en la curva de deshidratación empleada en la planta de yeso. Cada perturbación se realiza en intervalos de 15 min, siendo el tiempo total de perturbaciones de 1 hora. Una vez realizada la última perturbación, la temperatura tarda aproximadamente veinte minutos en estabilizarse en la temperatura de salida, permaneciendo constante hasta cumplir las 3 horas 10 minutos que dura la cocción. El comportamiento de la curva de deshidratación empleada en la planta de yeso de Pertigalete se puede observar en la figura 3.5.



**Figura 3.5 Comportamiento de la curva de deshidratación empleada en la planta de yeso.**

Culminado el tiempo de cocción se procede a sacar los tamices de la estufa con la ayuda de una pinza, como se observa en la figura 3.6, y a colocarlos en las bandejas de aluminio para no perder material que ahora

tiene un tamaño menor, debido a que una vez calcinado, el yeso pierde 1,5 moléculas de agua, ocasionando una disminución en el tamaño de las partículas de aproximadamente 20%.



**Figura 3.6 Forma de desalojar los tamices de la estufa, una vez finalizada la simulación de cocción.**

Se deja reposar el yeso en los tamices por un tiempo de 10 minutos, tiempo necesario para que éstos se puedan manipular, y se vierte el material sobre un papel extendiéndolo completamente, con la ayuda de una varilla de madera, para lograr un enfriamiento efectivo y uniforme. En la figura 3.7 se puede apreciar este paso.



**Figura 3.7 Extensión del yeso para lograr un enfriamiento efectivo.**

Después de un mínimo de 2 h de enfriamiento, el yeso queda listo para realizarle los ensayos de tiempo de fraguado y de agua combinada, recordando que los tiempos de fraguados se ven afectados por la temperatura del material cocido, por lo que existe una variación en esta propiedad física cuando se realiza el ensayo respectivo al yeso recién cocido.

Para evaluar el proceso de deshidratación del yeso a nivel de laboratorio es necesario realizar algunas pruebas físicas y químicas al producto calcinado, siendo las más importantes el porcentaje de agua combinada determinada mediante la norma COVENIN 36340:2000 [11] y la consistencia normal, el tiempo de fraguado y la resistencia a la compresión determinada mediante norma COVENIN 3639:2000 [12].

#### **A. Determinación del agua combinada**

El agua combinada es el agua de cristalización que se encuentra en el yeso; a través de ella se obtiene la pureza de éste, y por ende el porcentaje de anhidrita presente en la muestra, el procedimiento se muestra a continuación:

1. Se pesó 1 g de la muestra con precisión de 0,000 1g en una pesa sustancia previamente pesada, limpia y seca.
2. Posteriormente se colocó la muestra en la estufa con la tapa semi colocada durante 2 h a una temperatura entre 215 y 230°C.
3. Luego se colocó una tapa herméticamente a la pesa sustancia.
4. Se sacó de la estufa.

5. Se dejó enfriar a temperatura ambiente en un desecador.
6. La pesa sustancia se pesó con precisión de 0,0001 g.
7. La muestra se colocó en la estufa durante 15min.
8. Se pesó nuevamente la pesa sustancia con precisión de 0,0001 g, si se tiene un peso contante se finaliza, de lo contrario se coloca de nuevo en la estufa durante otros 15 min hasta que la muestra tenga un peso constante.

El resultado se expresa en forma porcentual, en base a la muestra original. Los datos para el cálculo del agua combinada para dos muestras obtenidas de las hornadas realizadas para la simulación de la cocción de planta de yeso se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 3.1 Datos para el cálculo del porcentaje de agua combinada en muestras de yeso calcinado proveniente de la simulación de la cocción de la planta de yeso.**

Muestra	mvacía (g)	mllena (g)	mllena 2h (g)
1	17,6513	18,6565	18,5894
2	17,8682	18,8927	18,8479

Donde:

mvacía: masa de la pesa sustancia vacía

mllena: masa de la pesa sustancia llena

mllena 2h: masa de la pesa sustancia llena después de 2 h en la estufa.

## **B. Determinación de la consistencia normal**

Esta prueba se realiza por medio del aparato Vicat modificado (método del émbolo cónico), mostrado en la figura 3.8. El ensayo debe realizarse en dos o tres muestras de mismo origen para comprobar la repetitividad del mismo. EL objetivo de la prueba es la determinación del volumen adecuado de agua que se debe mezclar con cierta cantidad de yeso (pasta de yeso) para realizar las pruebas de tiempo de fraguado y de resistencia a la compresión, debido a que cada yeso requiere una cantidad de agua distinta, según su composición y finura, el agua necesaria para estos ensayos se llama agua de consistencia normal. Se considera un yeso de consistencia normal cuando se obtiene en el aparato Vicat una penetración de  $(30\pm 2)$  mm. La consistencia normal se debe expresar como los mililitros de agua que hay que agregar a 100 g de yeso, el procedimiento se muestra a continuación.

1. Se pesaron 200 g de yeso calcinado.
2. Luego se pesó una cantidad conocida de agua destilada.
3. Se incorporó el yeso con el agua contenida en un recipiente de mezclado.
4. Se dejó reposar durante 2 min contados desde el momento en que el yeso hace contacto con el agua.
5. Pasado el tiempo se mezcló la muestra durante 1 min con una espátula para conseguir la homogenización adecuada.

6. Se transfirió la pasta a un molde previamente engrasado a fin de evitar filtraciones, el cual se enrasó con una espátula.
7. Se dejó caer el émbolo. Si la penetración es de  $(30 \pm 2)$  mm entonces se tiene una consistencia normal, de lo contrario se debe probar con otra cantidad de agua hasta lograr ésta penetración.



**Figura 3.8 Aparato Vicat modificado.**

### **C. Determinación del tiempo de fraguado**

El tiempo de fraguado es el tiempo necesario para que la aguja Vicat, mostrada en la figura 3.9, penetre 25 mm o menos en una pasta de yeso de consistencia normal. Es el tiempo desde que se acciona el cronómetro hasta que la aguja alcanza una penetración de 25 mm. El tiempo de fraguado se debe expresar en minutos. Este ensayo no debe realizarse inmediatamente después de la cocción, debido a que la temperatura del material puede

afectar esta propiedad, por eso todas las muestras se dejaron enfriar un mínimo de 2 h antes de la realización de este ensayo y la prueba se realizó a tres muestras las cuales fueron promediadas con el objetivo de obtener los resultados mostrados en figura 4.2.



**Figura 3.9 Aparato de Vicat.**

El procedimiento según la norma COVENIN 3629:2000 es el siguiente:

1. Se pesaron 200 g de yeso.
2. Se midió la cantidad de agua destilada necesaria para lograr una consistencia normal en un envase de plástico.
3. En el recipiente que contenía el agua se incorporó el yeso, simultáneamente se accionó el cronómetro y se dejó reposar por 2 min.
4. Se mezcló con una espátula durante 1 min.

5. La pasta se transfirió a un molde previamente engrasado a fin de evitar filtraciones y se enrasó con la espátula.
6. Se dejó caer la aguja sobre la pasta progresivamente hasta que alcance una penetración de 25 mm y se detiene el cronómetro.

#### **D. Determinación de la resistencia a la compresión**

Esta propiedad es una de las resistencias mecánicas que generalmente se determinan en los yesos, conjuntamente con la resistencia a la tracción. La resistencia a la compresión se determina mediante el rompimiento de probetas prismáticas o “cubos” de yeso a peso constante, preparados con la cantidad de agua necesaria para lograr una consistencia normal, ya que esta propiedad depende del contenido de humedad al momento de la ruptura. Un equipo que ejerce una fuerza constante sobre los cubos de yeso, denominado prensa hidráulica, que puede ser electrónica como la que fue usada en esta investigación, mostrada en la figura 3.10, es el equipo que arroja la carga soportada por cada cubo.



**Figura 3.10 Prensa hidráulica empleada como máquina de prueba en el ensayo de resistencia a la compresión del yeso.**

El procedimiento para realizar el ensayo de la resistencia a la compresión del yeso tipo I se describe a continuación.

1. Se mezclaron 500 g de yeso con 1000 g de arena normalizada Ottawa.
2. Se agregó la mezcla yeso – arena la cantidad de agua necesaria para lograr una consistencia normal en una taza limpia y seca y dejara reposar por 2 min.
3. Con una mezcladora mecánica se homogenizó la mezcla yeso – arena – agua durante 1 min.
4. En moldes en forma de prisma previamente lubricados, se colocó la pasta formada.
5. Se golpearon 20 veces los moldes para compactar la pasta y facilitar la expulsión de aire retenido.
6. Se enrasó la superficie con la ayuda de una espátula.
7. Los cubos previamente desmoldados fueron colocados en un cuarto húmedo con humedad controlada, durante no menos de 16 h.
8. Luego los cubos se trasladaron a una estufa a 45 °C hasta obtener un peso constante.
9. Los cubos fueron llevados a un desecador durante un mínimo de 16 h hasta su rotura.

10. Posteriormente se les aplicó mediante una prensa hidráulica una carga de manera continua y sin choque, a un ritmo constante.

La resistencia a la compresión debe ser expresada en kPa o en psi. El resultado se expresa como la resistencia a la compresión del material, y se toma el promedio de los resultados obtenidos, excepto en el caso de que alguno de los valores exceda en más de 15 % al promedio total; se descartan aquellos y la resistencia se expresa por el promedio de los valores restantes.

Los resultados arrojados por el equipo son en kgf por lo que se deben dividir entre el área del cubo que es 25,8 cm y posteriormente transformarlos a psi. Con el objetivo de obtener resultados exactos se ensayan tres cubos, calculándose la resistencia como un promedio de las cargas soportadas por éstos. Los resultados del ensayo están reflejados en la siguiente tabla:

**Tabla 3.2 Fuerza soportada por los cubos de yeso obtenidos mediante la simulación de la cocción de la planta de yeso**

Cubo (#)	Fuerza (kgf)
1	2620
2	2550
3	1700

### 3.1.2 Reproducción de la molienda

Con el objetivo de establecer un sistema de estudio en el cual se pueda evaluar la influencia de esta etapa del proceso en las propiedades físicas del yeso tipo I, se procedió a simular la molienda del mismo en un molino de laboratorio, específicamente un molino de bolas marca BOND. El objetivo es

obtener yesos con diferentes granulometrías, siendo éstas 82,2, 85,4 y 89,2 % pasante tamiz 100 (apertura de 150  $\mu\text{m}$ ), para establecer la influencia del tamaño de partícula en la calidad del yeso tipo I, específicamente en los tiempos de fraguado y la resistencia a la compresión, que permitirá relacionar la granulometría del yeso con la incorporación del polvillo seleccionando una granulometría adecuada que permita ésta adición. Inicialmente el yeso crudo, proveniente del patio de materia prima de la planta de yeso de Pertigalete, se redujo de tamaño utilizando una trituradora de mandíbula SOIL TEST, modelo C-2; posteriormente el yeso triturado se sometió a un proceso de tamizado para obtener un material que pase por el tamiz N° 12 (apertura 1,397 mm), el cual es el tamaño adecuado para la operación del molino de bolas BOND. Luego el material pasante del tamiz 12 se extiende sobre bolsas plásticas a fin de lograr que el yeso desprenda la humedad libre o agua no combinada que tiene en su superficie para evitar apelmazamiento al momento de realizar la molienda, este proceso dura aproximadamente 3 días. Una vez que el yeso crudo se encuentra en un tamaño adecuado y sin humedad libre se procede a introducirlo en el molino de bolas BOND, con una carga de cuerpos moledores de 20 kg con diversos tamaños. En el molino se introducen 2,5 kg de yeso crudo. Aunque este molino opera con bolas a diferencia del molino de la planta de yeso, que opera con rodillos, el producto obtenido presenta características semejantes, además de ser práctico para fines investigativos gracias a su tamaño y comodidad para la carga y la descarga del material. Este molino tiene un sistema que permite fijar la cantidad de revoluciones, así que se escoge un número de revoluciones determinada y se sacan 100 g de material molido para realizarle un ensayo en el tamiz 100 para obtener la granulometría del material molido, luego si la granulometría obtenida no es la deseada se sigue accionando el molino hasta obtener la granulometría que se quiere. Debido a que los cuerpos moledores (bolas) utilizados en el molino de laboratorio son

de hierro, y no de cerámica que es el recomendado para el yeso, éstos pueden eventualmente otorgar cierta coloración al material crudo molido, por lo cual se decidió realizar una prueba de colorimetría (anexo A) con el objetivo de determinar si existe o no tal coloración y si existe una desviación significativa con el color del yeso obtenido mediante el molino Raymond de planta de yeso, para de esta forma descartar posibles influencias de dicha coloración en las propiedades físicas del yeso obtenido mediante el molino de bolas de laboratorio.

La granulometría es uno de los parámetros que; como se ha mencionado anteriormente, se debe medir para establecer la calidad de los yesos aglomerantes según la norma COVENIN y las especificaciones internas de la empresa, debido a que ésta tiene una marcada influencia en las propiedades físicas del material estudiado. El procedimiento se muestra a continuación.

1. Se pesaron 200 g de yeso con una balanza analítica.
2. El yeso se colocó dentro del tamiz N° 100 con su respectiva tapa.
3. Manualmente se golpeó contra una superficie dura y plana con una inclinación de 30°, hasta que después de 5 min de golpeo continuo no exista pasante.
4. Se pesó el retenido en el tamiz.

Para la simulación de la molienda se obtuvieron los siguientes datos para el cálculo de la granulometría del yeso

**Tabla 3.3 Material retenido en el tamiz 100 en función de la velocidad de rotación del molino BOND.**

Ensayo (#)	Revoluciones	Retenido tamiz 100 (g)
1	1200	17,8
2	1350	14,4
3	1500	10,8

### **3.2 ESTIMACIÓN DE LAS VARIABLES MÁS IMPORTANTES QUE AFECTAN LA COCCIÓN DEL YESO**

Según la bibliografía revisada en el capítulo 2 y a la experiencia de los operadores técnicos de la planta de yeso de Pertigalete, se presume la existencia de ciertas variables en la cocción del yeso que influyen marcadamente en las propiedades físicas y químicas del mismo una vez calcinado, por lo que se decidió evaluar cada una de estas variables en el sistema de simulación de cocción en el laboratorio con el objetivo de obtener información certera de la influencia de éstas en la calidad del producto estudiado y posteriormente poder incorporarlas en el proceso de cocción a fin de obtener un producto con una calidad determinada. Las variables que se evaluaron fueron el calor suministrado al sistema, el tiempo de cocción y la velocidad de transferencia de calor.

#### **3.2.1 Influencia del calor suministrado**

La primera variable se evalúa mediante la temperatura de salida del material, manteniendo el tiempo de cocción constante, es decir 3 h 10 min, siguiendo la curva de deshidratación empleada en la planta de yeso,

mostrada en la figura 3.5, y teniendo como materia prima yeso crudo proveniente del molino Raymond con una granulometría de 98% pasante en tamiz 100 (apertura 150  $\mu\text{m}$ ). Para ello se decidió establecer diferentes temperaturas de salida o final, las cuales fueron 180, 190, 200, 220 y 240  $^{\circ}\text{C}$ . Al finalizar la cocción, al material obtenido se le realizaron ensayos de agua combinada y de tiempo de fraguado mediante los procedimientos explicados en el apartado 3.1.1.4 A y C respectivamente, reportándose los resultados en la tabla 4.4. Estos resultados se compararon entre ellos y con los obtenidos para la simulación de la cocción empleada en planta de yeso, explicados en el punto 3.1.1, a fin de estimar su influencia en las propiedades del material cocido. Los datos para el cálculo del porcentaje de agua combinada de las muestras deshidratadas a cada temperatura establecida para el estudio se muestran en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Datos para el cálculo del agua combinada en muestras de yeso calcinado con diferentes temperaturas de salida para evaluar la influencia de la energía suministrada en el sistema sulfato de calcio – agua.**

T Salida ( $^{\circ}\text{C}$ )	mvacía (g)	mllena (g)	mllena 2h (g)
176	17,7598	18,7746	18,7187
180	18,0412	19,0611	18,9920
190	39,7284	40,7481	40,6726
200	17,9752	18,9893	18,9285
220	39,7265	40,7428	40,6875
240	18,0895	19,0975	19,0290

Donde:

T salida: temperatura de salida del yeso calcinado

m vacía: masa de la pesa sustancia vacía

m llena: masa de la pesa sustancia llena

m llena 2h: masa de la pesa sustancia llena después de 2 h en la estufa.

### **3.2.2 Influencia del tiempo de cocción**

Posteriormente se evaluó la influencia del tiempo de cocción, para ello se utilizó la curva de cocción empleada en la planta de yeso, mostrada en la figura 3.5, pero esta vez manteniendo la temperatura de salida o final constante en 200 °C y variando los tiempos en que el material permanece en la estufa. Se utilizó para ello yeso crudo proveniente del molino Raymond de planta de yeso con una granulometría de 98% pasante en tamiz 100 (apertura 150 µm). Los tiempos de cocción empleados fueron de 3 h 10 min, 2 h 55min, 2 h 40 min, 2 h 25 min, 2 h 10 min, 1 hora 55 min, 1 h 40 min y 1 h 30 min. Al finalizar cada hornada se realizó el ensayo de agua combinada, datos que se encuentran en la tabla 3.5, luego se esperó un tiempo de 2 h aproximadamente para que se enfríe el material y posteriormente se realizaron los ensayos de tiempo de fraguado mostrándose los resultados en la tabla 4.5.

Tabla 3.5 Datos para el cálculo del agua combinada en muestras de yeso calcinado con diferentes tiempos de cocción para evaluar la influencia del tiempo de cocción en el sistema sulfato de calcio – agua.

t cocción (h, min)	mvacía (g)	mllena (g)	mllena 2h (g)
3,10	17,9757	18,9893	18,9285
2,55	17,8606	18,8704	18,7955
2,40	18,0438	19,1003	19,0330
2,25	16,0699	17,0754	17,0441
2,10	17,9678	18,9920	18,9297
1,55	16,0361	17,0601	16,9927
1,40	17,8614	18,8750	18,8116
1,30	17,6419	18,6995	18,6321

Donde:

t cocción : tiempo de cocción del yeso

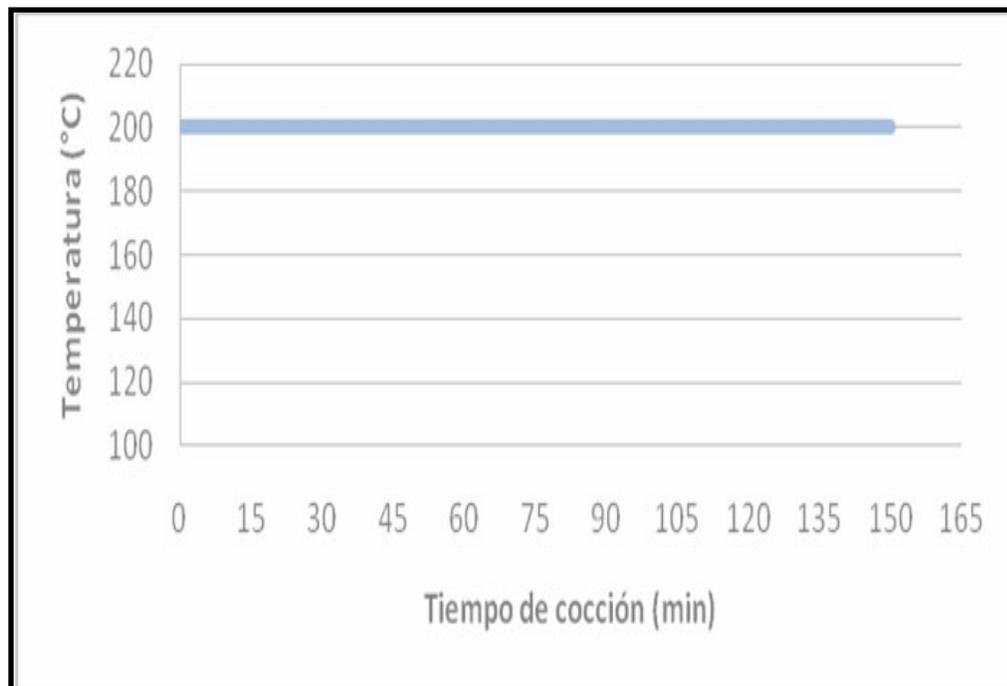
mvacía: masa de la pesa sustancia vacía

mllena: masa de la pesa sustancia llena

mllena 2h: masa de la pesa sustancia llena después de 2 h en la estufa.

### 3.2.3 Influencia de la velocidad de transferencia de calor

Para evaluar la influencia de la velocidad de transferencia de calor en la deshidratación del sistema sulfato de calcio – agua se procedió a simular la cocción manteniendo la temperatura constante durante toda la cocción en 200 °C, es decir, sin realizar perturbaciones en la operación y teniendo como variable los tiempos de cocción. Para ello se utilizó como materia prima el yeso crudo proveniente del molino Raymond de planta de yeso que tiene una granulometría de 98 % de pasante en tamiz 100 (apertura 150  $\mu\text{m}$ ). El nuevo método de deshidratación empleado para este ensayo se muestra en la figura 3.11.



**Figura 3.11 Método de deshidratación para evaluar la influencia de la velocidad de transferencia de calor en el sistema sulfato de calcio – agua.**

Los tiempos de cocción que se emplearon fueron de 2 h 30 min, 2 h 15 min, 2 h, 1 h 45 min y 1 h 30 min. Al finalizar cada ensayo se realizaron las pruebas de agua combinada, encontrándose los datos necesarios para esta determinación en la tabla 3.6, y de tiempo de fraguado, presentándose estos resultados en la tabla 4.6.

Tabla 3.6 Datos para el cálculo del agua combinada en muestras de yeso calcinado con diferentes tiempos de cocción para evaluar la influencia de la velocidad de transferencia de calor en el sistema sulfato de calcio – agua.

t cocción (h, min)	mvacía (g)	mllena (g)	mllena 2h (g)
2,30	18,0409	19,0570	18,9990
2,15	39,7645	40,8455	40,7589
2,00	18,0895	19,0993	19,0364
1,45	18,0415	17,1055	19,0401
1,30	17,6419	18,6995	18,6321

Donde:

t cocción : tiempo de cocción del yeso

m vacía: masa de la pesa sustancia vacía

m llena: masa de la pesa sustancia llena

m llena 2h: masa de la pesa sustancia llena después de 2 h en la estufa.

### **3.3 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE FRAGUADO Y DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MUESTRAS DE YESO CALCINADO CON DIFERENTES PORCENTAJES DE POLVILLO**

Esta etapa consiste en realizar ensayos de tiempo de fraguado y de resistencia a la compresión a muestras de yeso calcinado, proveniente de la planta de yeso, con porcentajes de polvillo del 1 al 10%, con intervalos de 0,5%, a fin de determinar cómo afecta y en qué proporción los porcentajes de polvillo añadidos a estas propiedades físicas del yeso.

Antes de realizar estos ensayos se hizo necesario caracterizar al polvillo empleado para tal fin, proveniente de los hornos de clinker de la planta I de Pertigalete, mediante un análisis químico de rayos X [13], método que consiste básicamente en la fluorescencia de rayos x de dispersión por longitud de onda en discos fundidos, y por un método de ensayo químico tradicional, los cuales son el método gravimétrico y el método complexométrico, conocido como vía húmeda, éstos análisis se encuentran en la tabla 4.7.

Una vez caracterizado el polvillo se procedió a realizar los ensayos de tiempo de fraguado y de resistencia a la compresión, para lo cual el primer paso común en los dos ensayos es la preparación de las muestras de yeso – polvillo, las cuales deben ser las más homogéneas posibles para obtener

resultados confiables, para ello se procede a pesar en una balanza granetera Sartorius, modelo BP 4100S, las cantidades necesarias de cada material, de acuerdo al porcentaje de polvillo que se desea adicionar, estas cantidades se encuentran en las tabla B.1 y B.2 (anexo B), para los ensayos de tiempo de fraguado y de resistencia a la compresión respectivamente, una vez que se tiene la cantidad adecuada de cada material se procede a la homogeneización en bolsas plásticas. En total son 20 muestras a las que se le realiza cada ensayo mencionado.

Debido a que cada yeso requiere de una cantidad de agua distinta, como se mencionó en la sección 3.1.1.4 - B, y más aún cuando se tienen adiciones, se hace necesario realizar a cada muestra el ensayo de consistencia normal a fin de determinar el agua de amasado requerida para la realización de los ensayos de tiempo de fraguado y de resistencia a la compresión, éste ensayo se encuentra descrito en la sección mencionada anteriormente y los resultados se encuentran en forma de gráfico en la figura 4.1.

Determinada el agua para lograr la consistencia normal se procede a realizar los ensayos de tiempo de fraguado y de resistencia a la compresión a cada una de las muestras, siguiendo los procedimientos descritos en las secciones 3.1.1.4 - C y 3.1.1.4 – D, la diferencia con aquellos ensayos está en que las muestras tienen una adición de polvillo.

En cuanto a la resistencia a la compresión, en la tabla 3.7 se reportan las fuerzas aplicadas a los cubos de yeso preparados con adición de polvillo.

**Tabla 3.7 Fuerza soportada por los cubos de yeso con distintas adiciones de polvillo para calcular la resistencia a la compresión.**

Polvillo adicionado (%)	Cubo 1 (kgf)	Cubo 2 (kgf)	Cubo 3 (kgf)
0	2600	2610	2670
1	2410	2340	2740
1,5	2080	2070	2140
2,0	2610	2590	2750
2,5	2260	2210	2240
3,0	3110	2960	2640
3,5	2530	2170	2250
4,0	2170	2220	2130
4,5	2240	2220	2290
5,0	1430	2740	2780
5,5	2270	2800	2360
6,0	1300	2240	2120
6,5	2370	2510	2080
7,0	2060	1870	2680
7,5	2770	2850	1660
8,0	2750	2500	2560
8.5	2380	2770	2950
9,0	2780	2830	2760
9,5	2890	2810	2800
10,0	3050	2470	1910

### **3.4 ESTABLECIMIENTO DE POSIBLES RELACIONES ENTRE LA ADICIÓN DEL POLVILLO Y LAS VARIABLES DEL PROCESO DE MOLIENDA Y COCCIÓN DEL YESO**

Una vez determinado el efecto provocado por la adición del polvillo en el tiempo de fraguado y la resistencia a la compresión del yeso tipo I, se procede a establecer dependencias entre las propiedades físicas del yeso calcinado y la adición de polvillo, lo cual a su vez permite establecer posibles relaciones entre las variables de producción como son la granulometría, obtenida en el molino Raymond, y la temperatura de cocción obtenida en el horno de planta de yeso.

#### **3.4.1 Relación entre la granulometría del yeso y las propiedades físicas y el agua combinada del yeso calcinado**

La molienda es una operación fundamental en la calidad de los yesos, debido a que ésta permite obtener diferentes granulometrías. En esta etapa de la investigación se obtuvieron diferentes granulometrías para establecer cuál es la influencia del tamaño de la partícula en la calidad del yeso tipo I producido en la planta de Pertigalete a fin de encontrar una granulometría que permita la adición de polvillo sin perjudicar las propiedades físicas del yeso.

Las diferentes granulometrías se obtuvieron mediante un molino de bolas a escala de laboratorio, siendo estas granulometrías 82,2, 85,4 y 89,2 % pasante en tamiz 100 (apertura de 150  $\mu\text{m}$ ), esto se hizo siguiendo el procedimiento para la simulación de la molienda de planta de yeso explicada en la sección 3.1.2. Una vez obtenidos los yesos con las distintas granulometrías se procede a la cocción del mismo, mediante la curva de

deshidratación de la planta de yeso, posteriormente se realizaron los ensayos de porcentaje de agua combinada, tiempo de fraguado, resistencia a la compresión y porcentaje pasante en el tamiz 100. En las tablas 3.8 y 3.9 se muestran los datos para la determinación del porcentaje de agua combinada y resistencia a la compresión respectivamente, los resultados de estas pruebas, así como del tiempo de fraguado, se muestran en la tabla 4.8.

**Tabla 3.8 Datos para el cálculo del agua combinada en muestras de yeso calcinado con diferentes granulometrías de la materia prima.**

Pasante en tamiz 100 (%)	mvacía (g)	mllena (g)	mllena 2h (g)
82,2	18,0982	19,1070	19,6295
85,6	17,6042	18,6100	18,5272
89,2	17,8670	18,9092	18,8476

Donde:

mvacía: masa de la pesa sustancia vacía

mllena: masa de la pesa sustancia llena

mllena 2h: masa de la pesa sustancia llena después de 2 h en la estufa.

**Tabla 3.9 Fuerza soportada por los cubos de yeso con distintas granulometrías para calcular la resistencia a la compresión.**

Pasante en tamiz 100 (%)	Cubo 1 (kgf)	Cubo 2 (kgf)	Cubo 3 (Kgf)
82,2	2080	1720	1990
85,4	2020	1320	1690
89,2	2440	2140	2210

### **3.4.2 Relación entre la granulometría del yeso y la temperatura de cocción**

Para determinar esta relación se procedió a evaluar los resultados obtenidos en las etapas 3.2 y 3.3 a fin de establecer la temperatura de cocción que permita la adición de polvillo, pero con la granulometría de yeso adecuada, para lo cual se procedió a someter a deshidratación el yeso con las granulometrías obtenidas en la sección 3.4.1 a una temperatura constante de 200 °C, una vez cocido el material se procedió a realizarle el ensayo de agua combinada, para lo cual se tomaron los datos mostrados en la tabla 3.10.

**Tabla 3.10 Datos para el cálculo del agua combinada en muestras de yeso calcinado a una temperatura de 200 °C con diferentes granulometrías.**

Pasante en tamiz 100 (%)	mvacia (g)	mllena (g)	mllena 2h (g)
82,2	17,8430	18,8813	18,8049
85,4	18,0347	19,0363	18,9645
89,2	17,8020	18,8595	18,8010

Donde:

$m_{vacía}$ : masa de la pesa sustancia vacía

$m_{llena}$ : masa de la pesa sustancia llena

$m_{llena\ 2h}$ : masa de la pesa sustancia llena después de 2 h en la estufa.

Los resultados de los ensayos mencionados anteriormente se encuentran en la tabla 4.10.

### **3.5 SELECCIÓN DE LA RELACIÓN YESO CALCINADO – POLVILLO QUE CUMPLA CON LAS ESPECIFICACIONES DE LA NORMA COVENIN 3638:2000**

Se debe seleccionar el porcentaje de polvillo a adicionar, de tal forma que el yeso con la adición cumpla con las especificaciones de la norma COVENIN 3638:2000 [14] y las especificaciones internas de la empresa, las cuales se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla 3.11 Propiedades físicas del yeso de construcción según las norma COVENIN 3638:2000.**

Tiempo de fraguado (min)	Finura en cedazo COVENIN # 200 (%)	Resistencia a la compresión (psi)
15 a 30	Mínimo 85	Mínimo 1100

**Tabla 3.12 Especificaciones internas del yeso tipo I de Cemex  
Venezuela Empresa en Transición.**

Propiedad	LIE	LSE	OBJETIVO	LIC	LSC
Tiempo de fraguado (min)	15	19	23	26	30
Pasante tamiz 100 (%)	97,0	98,0	98,5	99,0	-
Pasante tamiz 200 (%)	98,5	99,0	99,5	99,0	-
CaSO <sub>4</sub> .½H <sub>2</sub> O (%)	70,0	75,0	80,0	85,0	-
Resistencia a peso constante (psi)	1100	1300	1750	2200	-

Donde:

LIE: límite inferior de especificación

LSE: límite superior de especificación

LIC: límite inferior de control

LSC: límite superior de control

Evidentemente las especificaciones internas están basadas en la norma COVENIN a la que se hace referencia y tienen valores de propiedades mucho más rigurosos con el objeto de asegurar la calidad del producto, así que el yeso que cumpla con una de las normas automáticamente cumple con la otra.

Para realizar la selección de la cantidad de polvillo a adicionar se procedió a revisar la influencia que ejerce cada porcentaje de polvillo en el yeso de acuerdo a los ensayos realizados en la sección 3.3 y se seleccionó

un porcentaje que pueda compensar las propiedades de tiempo de fraguado y de resistencia a la compresión del yeso con la granulometría y tiempo y temperatura de cocción adecuadas que fueron seleccionadas según lo estudiado en la sección 3.4, posteriormente se le realizó a este yeso los ensayos de agua combinada, tiempo de fraguado, resistencia a la compresión y porcentaje pasante en el tamiz 100, según los procedimientos explicados en la sección 3.1. Los datos para el cálculo del porcentaje pasante en el tamiz 100 y de la resistencia a la compresión se muestran en la tabla 3.13.

**Tabla 3.13 Cargas soportada por los cubos de yeso con el polvillo seleccionado adicionado y retenido en el tamiz 100 (150  $\mu\text{m}$ ) para calcular la resistencia a la compresión.**

Cubo (#)	Carga soportada (kgf)	Retenido en tamiz 100 (g)
1	2640	2,94
2	2580	
3	2530	

Los resultados de estos ensayos se muestran en la tabla 4.11.

El porcentaje pasante en el tamiz 200 (apertura 75  $\mu\text{m}$ ) es un requerimiento de las normas COVENIN 3638:2000 y de las especificaciones internas, por lo que se hace necesaria la realización de esta prueba al yeso con el polvillo adicionado y también al yeso seleccionado para tal adición, el procedimiento que se empleó se muestra a continuación:

1. Se pesaron 100 g de material con una balanza analítica y se colocaron dentro del tamiz N° 200.
2. El tamiz se sumergió en alcohol, al menos tres veces.
3. Luego se secó el tamiz en una estufa a temperatura de 200°C durante 5 min.
4. Se pesó el retenido en el tamiz.

Los datos obtenidos para el cálculo de la fineza en el tamiz 200 se encuentran en la siguiente tabla.

**Tabla 3.14 Retenidos en el tamiz 200 (apertura de 75  $\mu\text{m}$ ) para el yeso al cual se le va a adicionar el polvillo y el yeso con el polvillo adicionado.**

Tipo de yeso	Retenido en tamiz 200 (g)
Sin polvillo	0,60
Con el porcentaje de polvillo seleccionado	0,82

También se procede a realizar un análisis químico del yeso con el porcentaje de polvillo seleccionado mediante los procedimientos de la norma COVENIN 3640:2000, a fin de que estos parámetros también cumplan con las especificaciones internas de la empresa, mostrándose estas propiedades en la tabla 4.12.

### **3.6 CÁLCULO DEL INCREMENTO DE LA PRODUCCIÓN DEL YESO TIPO I POR EFECTO DE LA ADICIÓN DEL POLVILLO**

Seleccionada la relación yeso calcinado-polvillo, de acuerdo a los criterios de la sección 3.5 y establecidas las nuevas condiciones de cocción y molienda que permitan la adición de este polvillo en el proceso fabricación del yeso tipo I, según lo estimado en la sección 3.4, Para ello es necesario conocer la producción actual la cual fue tomada como un promedio de los años 2007, 2008 y 2009 mostrada en el anexo D, también es necesario conocer detalles de la producción actual de la planta de yeso como la duración de cada hornada y el número de toneladas de yeso producido en cada una de ellas. Las condiciones de producción actuales del horno de la planta de yeso de Pertigalete son una producción aproximada por hornada de 13 toneladas y con una duración de 3,17. Suponiendo que las condiciones de laboratorio se puedan reproducir totalmente a nivel industrial, se determina la nueva producción de la planta de yeso implementando las nuevas condiciones de deshidratación. Una vez obtenida esta producción se le calculó el porcentaje de producción que se obtiene mediante la incorporación del porcentaje de polvillo seleccionado y se le adiciona nueva producción para finalmente calcular el incremento de la producción por efecto de la adición de polvillo.

### **3.7 MUESTRA DE CÁLCULO**

#### **3.7.1 Determinación del agua combinada**

El agua combinada se determina mediante la ec. 3.1.

$$\text{Agua combinada (\%)} = \frac{(A-B)}{A} \times 100 \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

A: masa inicial de la muestra (g)

B: masa final de la muestra (g)

Se procede a calcular la masa inicial de la muestra (A) y la masa final de la muestra (B), mediante las ec. 3.2 y 3.3 respectivamente, para la muestra 1 de la tabla 3.1.

$$A = m_{\text{llena}} - m_{\text{vacía}} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

$$A = (18,6565 - 17,6513)\text{g}$$

$$A = 1,0052 \text{ g}$$

$$B = m_{\text{llena 2h}} - m_{\text{vacía}} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

$$B = (18,5894 - 17,6513)\text{g}$$

$$B = 0,9361 \text{ g}$$

Luego se procede a calcular el agua combinada, mediante la ecuación 3.1.

$$\text{Agua combinada (\%)} = \frac{(1,0052 - 0,9361)\text{g}}{1,0052 \text{ g}} \times 100$$

$$\text{Agua combinada (\%)} = 6,87$$

Este resultado es reportado en la tabla 4.1.

### 3.7.2 Determinación de la resistencia a la compresión

Para determinar la resistencia a la compresión se calcula un promedio aritmético entre las cargas de los tres cubos ensayados, pero si hay un valor que se aleja significativamente de los demás, éste se puede despreciar según Arredondo [3]. En este caso la carga 1700 kgf se aleja significativamente de los valores restantes, por eso se desprecia.

Se calcula entonces el promedio de la siguiente forma:

$$\text{Prom cargas} = \text{Carga1} + \text{Carga2} + \text{Carga3} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde:

Prom cargas: Promedio de las cargas de los cubos (kgf)

Carga i= carga de cada cubo (kgf)

Sustituyendo los datos de la tabla 3.2 en la 3c. 3.4, se tiene que:

$$\text{Prom cargas} = (2620 + 2550)\text{kgf}$$

$$\text{Prom cargas} = 2585 \text{ kgf}$$

Posteriormente se divide esta carga entre el área de un cubo que es 25,8 cm y así obtener la resistencia a la compresión.

$$RC = \frac{\text{Prom cargas}}{\text{Área del cubo}} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Donde RC: Resistencia a la compresión (kgf/cm<sup>2</sup>)

$$RC = \frac{2583 \text{ kgf}}{25,8 \text{ cm}^2}$$

$$RC = 100,1 \text{ kgf/cm}^2$$

Luego se transforma esta resistencia en kPa multiplicando el valor obtenido anteriormente por 98,07 y para transformar a psi se multiplica por 14,22 como sigue.

$$RC = 100,1 \text{ kgf/cm}^2 \times 98,07$$

$$RC = 9818,8 \text{ kPa}$$

Ahora se realiza el cálculo para obtener la resistencia en psi.

$$RC = 100,1 \text{ kgf/cm}^2 \times 14,22$$

$$RC = 1423,4 \text{ psi}$$

Este resultado se muestra en la tabla 4.1.

### 3.7.3 Determinación de la Granulometría del yeso con el tamiz 100 (150 $\mu\text{m}$ )

Con el material retenido en el tamiz se calcula el pasante mediante la siguiente ecuación:

$$Pas = ret - 100 \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde:

Pas: pasante (%)

ret: retenido (g)

El pasante es la cantidad de material que ha pasado a través de la malla, se expresa en porcentaje.

Con los datos de la tabla 3, ensayo 1 se procede a calcular el porcentaje pasante mediante la ec. 3.6

$$Pas = 17,8g - 100$$

$$Pas = 82,2 \%$$

Este resultado así como el de los ensayos restantes se encuentran en la tabla 4.3.

### 3.7.4 Determinación de la resistencia a la compresión de muestras de yeso calcinado con diferentes porcentajes de polvillo

Como se mencionó en la sección 3.3.2 es necesario calcular la cantidad de agua necesaria para lograr una consistencia normal en muestras de yeso de 500 g ya que inicialmente se determinó en muestras de 200 g, para ello se usa la relación mostrada en la siguiente ecuación:

$$500\text{g de yeso} \times \frac{\text{ml de agua}}{200 \text{ g de yeso}} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

De acuerdo a la figura 4.1 para un porcentaje de adición de polvillo de 2,0% es de 140 ml, resultado que se sustituye en la ec. 3.7 como sigue.

$$500\text{g de yeso} \times \frac{140 \text{ ml de agua}}{200 \text{ g de yeso}}$$

**350 ml de agua**

Este resultado así como los resultados para los demás porcentajes de polvillo adicionado se encuentran en la tabla B.3. Esta es la cantidad de agua necesaria para preparar las briquetas con los cubos que permiten obtener las cargas soportadas mediante el ensayo en la prensa hidráulica, estos datos se encuentran en la tabla 3.7 y la resistencia a la compresión se determina mediante el procedimiento de la sección 3.7.1.1 – A. Los resultados se muestran en la figura 4.3.

### **3.7.5 Determinación de la producción de la planta de yeso implementando el nuevo método de deshidratación**

Tomando los datos de las producciones de los años 2007, 2008 y 2009 de la tabla del anexo D, se calculó una producción promedio que se consideró como la producción actual de la planta de yeso como sigue:

$$\mathbf{Prod\ actual\ prom = Prod\ 2007 + Prod\ 2008 + Prod\ 2009} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Donde:

Prod actual prom: producción actual promedio (ton/año)

Prod i: producción para el año correspondiente (ton/año)

Sustituyendo los datos de la tabla del anexo D en la ecuación anterior se tiene lo siguiente:

$$\mathbf{Prod\ actual\ prom = 35088\ ton/año + 34121\ ton/año + 35264\ ton/año}$$

$$\mathbf{Prod\ actual\ prom = 34824\ ton/año}$$

Para obtener el número de hornadas por año se divide la producción actual entre las toneladas por hornada que son 13, de la siguiente forma

$$\mathbf{Hornadas\ anuales = \frac{Producción\ anual}{Capacidad\ del\ horno}} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Donde:

Producción anual (ton/año)

Capacidad del horno (ton/hornadas)

Se sustituye en la ecuación anterior en la siguiente ecuación los datos necesarios para obtener las hornadas anuales

$$\text{Hornadas anuales} = \frac{34824 \text{ ton/año}}{13 \text{ ton/hornada}}$$

$$\text{Hornadas anuales} = 2678 \text{ hornas/año}$$

Posteriormente se calcula el número de horas que trabaja el horno en el año como sigue:

$$\text{Rendimiento del horno} = \text{Hornadas anuales} \times \text{duración de una hornada} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

Donde:

Rendimiento del horno (h/año)

Duración de una hornada (h/hornada)

Sustituyendo en la ec. 3.10 se tiene que:

$$\text{Rendimiento del horno} = 2678 \text{ hornadas/año} \times 3,17 \text{ h/hornada}$$

$$\text{Rendimiento del horno} = 8489,26 \text{ h/año}$$

Luego se calcula el nuevo rendimiento del horno dividiendo el rendimiento actual del horno entre la duración de una hornada usando el método de deshidratación empleado:

$$\text{Nuevo rendimiento horno} = \frac{\text{rendimiento actual}}{\text{duración de una hornada}} \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Donde:

Nuevo rendimiento del horno (h/año)

Rendimiento actual (h/año)

Duración de una hornada (h/hornada)

Al sustituir los datos requeridos en la ecuación se obtiene el nuevo rendimiento del horno:

$$\text{Nuevo rendimiento horno} = \frac{8489,26 \text{ h/año}}{1,75 \text{ h/hornadas}}$$

$$\text{Nuevo rendimiento horno} = 4851,01 \text{ hornadas/año}$$

Finalmente multiplicando el nuevo rendimiento del horno por la capacidad del horno se tiene la nueva producción por la planta de yeso implementando el nuevo método de deshidratación, lo cual se puede calcular mediante ecuación mostrada a continuación:

$$\text{Nueva producción} = \text{Nuevo rendimiento horno} \times \text{capacidad del horno} \quad (\text{Ec. 3.12})$$

$$\text{Nueva producción} = 4851,01 \text{ hornadas/año} \times 13 \text{ ton/hornada}$$

$$\text{Nueva producción} = 63063,13 \text{ ton/año}$$

## **CAPÍTULO 4**

### **DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **4.1 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

Esta sección tiene la finalidad de mostrar y discutir los resultados más importantes obtenidos en el desarrollo de la investigación realizada. Para ello se ha estructurado en seis etapas que cumplen con los objetivos planteados.

##### **4.1.1 Reproducción a nivel de laboratorio de la cocción y molienda del yeso tipo I.**

###### **4.1.1.1 Reproducción de la cocción**

La tabla 4.1 muestra los resultados de los ensayos de consistencia normal, tiempo de fraguado, resistencia a la compresión y agua combinada, reportada como un promedio entre dos muestras, realizados al yeso provenientes de la deshidratación que simula la cocción de la planta de yeso y se compara con las propiedades promedio del yeso obtenido de la planta de yeso.

**Tabla 4.1 Propiedades físicas y porcentaje de agua combinada del yeso obtenido mediante la simulación de la cocción del yeso a nivel de laboratorio y del yeso producido en la planta de yeso de Pertigalete**

Forma de obtención del yeso	Agua para consistencia normal (ml)	Tiempo de fraguado (min)	Resistencia a la compresión (psi)	Agua combinada (%)
Planta de yeso	145	19,5	≈1600	5-7
Simulación	145	19	1423,4	5,62

Como se evidencia en la tabla 4.1, las propiedades físicas y químicas del yeso tipo I obtenido mediante la simulación en el laboratorio son muy similares a las que presenta el yeso de la planta Pertigalete. Similitud que se aprecia especialmente en las propiedades de tiempo de fraguado y de agua combinada, razón por la cual se puede afirmar que el método empleado para realizar la deshidratación del yeso a nivel de laboratorio resulta satisfactorio. Sin embargo la resistencia a la compresión obtenida mediante la simulación presenta una diferencia de aproximadamente 12% con respecto a la resistencia promedio obtenida para los yesos de la planta de yeso, esto se debe a que en la simulación pudo haber quedado una cantidad significativa de dihidrato o se generaron fases inestables de anhídrita que se transformaron posteriormente en dihidrato, siendo éste el responsable de la caída significativa en el valor de la resistencia de la simulación.

Los resultados logrados se deben principalmente a que el uso de tamices dentro de la estufa mejora la transferencia de calor, lo cual se logra creando una capa delgada en los tamices, de forma que cada grano de yeso o la mayoría de ellos tenga la misma oportunidad de contacto con la fuente

de calor que es el principio básico de la agitación que si ocurre en el horno industrial, influyendo este factor significativamente en los tiempos de cocción y en la homogenización. En la planta de yeso la agitación se logra incorporando en el horno un agitador con álabes, el cual va conectado a un sistema de rotación por medio de poleas que permite la agitación radial y axial, acompañado por cadenas en el fondo del horno que evitan el sobrecalentamiento del material, este sistema fue mostrado en la figura 2.6.

#### 4.1.1.2 Reproducción de la molienda

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para la reproducción de la molienda a nivel de laboratorio, mediante el molino de bolas BOND. Estos resultados se obtuvieron de los datos de la tabla 3.3.

**Tabla 4.2 Granulometrías (pasante en el tamiz 100) de los yesos obtenidos mediante la simulación de la molienda en el laboratorio.**

Ensayo (#)	Pasante en el tamiz 100 (apertura 150 $\mu$ m) (%)
1	82,2
2	85,6
3	89,2

Como se mencionó en el capítulo 3, sección 3.1.2, el molino usado para la simulación no tiene el mismo principio de operación que el empleado en la planta de yeso, que trabaja con rodillos, y el empleado en el laboratorio trabaja con bolas de hierro, que eventualmente podrían otorgarle cierta

coloración por el desprendimiento de partículas de hierro que ocasiona la fricción en las bolas durante la molienda. Por estas razones se decidió realizar un ensayo de colorimetría cuyos resultados se encuentran en la tabla A.1, en el cual se observa que no existe una diferencia significativa en el color de los yesos obtenidos en el molino del laboratorio con el color del yeso obtenido en el molino Raymond, por lo que se debe esperar que esta coloración no cause ninguna influencia en las propiedades físicas del yeso obtenido mediante la simulación.

Entonces, este molino de bolas resulta un método aceptable para simular la molienda del yeso crudo con diferentes granulometrías sin afectar las propiedades del material, que puedan influir posteriormente en las propiedades aglomerantes de los yesos obtenidos mediante esta vía.

#### **4.1.2 Estimación de las variables más importantes que afectan la cocción del yeso**

Para evaluar la influencia de estas variables que son el calor suministrado al sistema, el tiempo de cocción y la velocidad de transferencia de calor, se realizaron los ensayos de tiempo de fraguado y de agua combinada, cuyos resultados se muestran a continuación.

##### **4.1.2.1 Influencia del calor suministrado**

Los resultados de los ensayos de tiempo de fraguado y de porcentaje de agua combinada, obtenidos de los datos de la tabla 3.4, permiten inferir la influencia que ejerce el calor suministrado al sistema de cocción en las propiedades del yeso tipo I reflejadas en la tabla 4.3.

**Tabla 4.3 Tiempo de fraguado y porcentaje de agua combinada en muestras de yeso calcinado con diferentes temperaturas de salida para evaluar la influencia del calor suministrado en el sistema sulfato de calcio – agua.**

Temperatura de salida (°C)	Tiempo de fraguado (min)	Porcentaje de agua combinada (%)
176	19	5,62
180	14	6,78
190	17	7,40
200	22	6,00
220	13	5,44
240	15	6,80

Los resultados obtenidos confirman que la transformación de las fases del sistema sulfato de calcio – agua no es constante, como tampoco lo es el rango de temperatura en el cual se obtienen, lo cual se evidencia en los porcentajes de agua combinada obtenidos, ya que la lógica dice que a medida que se le suministra un calor mayor al sistema, el agua combinada debería ser menor, sin embargo esto ocurre de una forma desproporcionada debido a que es posible que se dé la coexistencia de la anhidrita con los semihidratos, a la temperatura de formación de estos últimos y no de la primera, lo cual sucede cuando hay una presión de vapor muy baja,

recordando que existe una tasa de generación de vapor de agua que genera cierta presión en la estufa debido a la deshidratación que está ocurriendo, siendo esta anhidrita inestable e higroscópica, transformándose en contacto con el aire en semihidrato beta.

Ahora bien, relacionando los tiempos de fraguado obtenidos con las características de las fases existentes para este sistema, se encuentran ciertas coherencias como lo es el hecho de que hasta 200 °C se forma el hemihidrato, teniendo éste tiempo de fraguado aproximado de 20 min, y que a temperaturas mayores de 200°C se forma una anhidrita III, o anhidrita soluble, la cual tiene un tiempo de fraguado más corto como es evidente en la tabla 4.3.

En base a lo anteriormente expuesto se puede afirmar que los tiempos de fraguado obtenidos mediante esta simulación, variando el calor suministrado al sistema se corresponden con el comportamiento teórico de las fases formadas para dichos intervalos de temperatura, influyendo esta variable de manera significativa en la cocción del yeso y en consecuencia en la calidad del producto obtenido.

#### **4.1.2.2 Influencia del tiempo de cocción**

En esta etapa se evaluó el comportamiento del yeso calcinado incorporando el tiempo de cocción como una variable en el sistema de simulación, que sigue la deshidratación empleada en la planta de yeso, para obtener resultados de tiempo de fraguado y de porcentaje de agua combinada los cuales se reportan en la tabla 4.4.

**Tabla 4.4 Tiempo de fraguado y porcentaje de agua combinada en muestras de yeso calcinado con diferentes tiempos de cocción para evaluar la influencia del tiempo de cocción en el sistema sulfato de calcio – agua.**

Tiempo de cocción (h, min)	Tiempo de fraguado (min)	Porcentaje de agua combinada (%)
3, 10	22	6,00
2,55	14	7,42
2,40	18	6,37
2,25	12	3,11
2,10	13	6,08
1,55	14	6,58
1,40	14	6,25
1,30	9	7,13

Los resultados obtenidos demuestran que el agua combinada en la mayoría de los casos aumentó en relación a los tiempos de cocción, pero no así los tiempos de fraguado, lo cual sugiere la formación de fases inestables como lo es la anhidrita III la cual es higroscópica, como se mencionó anteriormente, por lo que se transforma en semihidrato y hace que los tiempos de fraguado fluctúen. También ocurre la formación de anhidritas solubles y estables ya que a esta temperatura de cocción (200°C) es posible su formación, debido a lo cual los tiempos de fraguado son más cortos, ya que esta por tener una mayor solubilidad en el agua, reacciona rápidamente trayendo como consecuencia inmediata una disminución drástica de los tiempos de fraguado. El aumento del porcentaje de agua combinada con respecto a los tiempos de cocción se debe a que existe una cantidad de

agua como hemihidrato o dihidrato que debido al poco tiempo de residencia en la estufa no logra desprenderse tan fácilmente de la red cristalina, pero que no es significativa como para influir notablemente en el comportamiento de los tiempos de fraguado.

#### 4.1.2.3 Influencia de la velocidad de transferencia de calor

En la tabla 4.5 se muestran los tiempos de fraguado y los porcentajes de agua combinada para simulaciones de cocción manteniendo la temperatura constante de 200 °C y teniendo como variable los tiempos de cocción, permitiendo éstos evaluar la influencia de la velocidad de la transferencia de calor.

**Tabla 4.5 Tiempo de fraguado y porcentaje de agua combinada en muestras de yeso calcinado con diferentes tiempos de cocción para evaluar la influencia de la velocidad de transferencia de calor en el sistema sulfato de calcio – agua.**

Tiempo de cocción (h, min)	Tiempo de fraguado (min)	Porcentaje de agua combinada (%)
2,30	14	5,71
2,15	17	8,01
2,00	16	6,23
1,45	21	6,22
1,30	20	6,37

En esta tabla se refleja como el tiempo de fraguado va aumentando a medida que se disminuye el tiempo de cocción, así como el agua combinada se ubica dentro de los valores óptimos para un yeso comercial con propiedades aglomerantes (agua combinada entre 5 y 7 %) y en general el agua combinada va disminuyendo proporcionalmente con la disminución del tiempo de fraguado. Debido a que la velocidad de cambio de fase no es constante, lo cual se ha corroborado mediante la medida de las energías de activación de las nuevas fases formadas, según Sanz Arauz [6], este hecho se debe a numerosos factores entre los cuales se pueden mencionar la presión y temperatura del sistema, la presión de vapor de agua generada y por supuesto la velocidad de transferencia de calor. Se puede decir que en cada caso particular el fenómeno de deshidratación se puede dar de formas distintas, confirmándose por los resultados obtenidos, pero la afirmación más importante es que si se suministra al sistema una cantidad mayor de calor y se aumenta la velocidad de transferencia de ésta, entonces se puede disminuir el tiempo de cocción del material, obteniéndose tiempos de fraguados altos en tiempos de cocción relativamente cortos.

#### **4.1.3 Determinación del tiempo de fraguado y de la resistencia a la compresión de muestras de yeso calcinado con diferentes porcentajes de polvillo**

Mediante un análisis de rayos x y un análisis complexométrico y gravimétrico, conocido como vía húmeda se obtuvieron las propiedades químicas del polvillo subproducto de los electrofiltros de los hornos de clinker, mostradas en la siguiente tabla.

**Tabla 4.6 Propiedades químicas del polvillo residual de los hornos de clinker de la planta I de Pertigalete.**

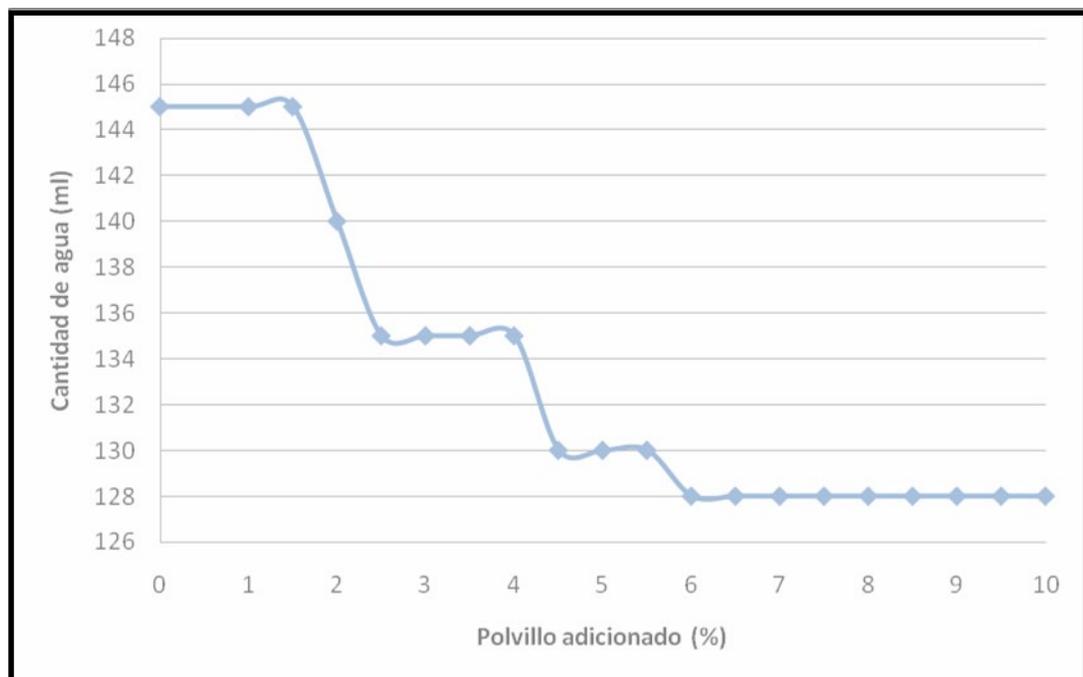
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	LOI	C <sub>3</sub> S	C <sub>3</sub> A	S	F
13,72	4,09	1,88	42,12	1,06	25,76	57,90	12,00	2,30	
14,30	4,18	2,20	44,85	1,15	25,76	62,80	10,80	2,24	

Donde: SiO<sub>2</sub>: dióxido de silicio (%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: trióxido de aluminio (%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: trióxido de hierro (%), CaO: óxido de calcio (%), MgO: óxido de magnesio (%), LOI: pérdida al fuego (%), C<sub>3</sub>S: silicato tricálcico (%), C<sub>3</sub>A: aluminato tricálcico (%), MS: módulo silícico (%) y MF: módulo férrico (%).

En la tabla anterior se aprecia que el polvillo posee altas cantidades de óxido de calcio y dióxido de silicio que son los compuestos que hacen de este material un posible aditivo para el yeso tipo I, debido a que son estos compuestos los responsables de otorgar la resistencia en los aglomerantes hidráulicos. El contenido de óxido de magnesio es bajo por lo cual no debe existir una expansión por causa de este compuesto. El contenido de silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S) está relacionado con altas resistencias en el cemento, por lo que se espera que las resistencias permanezcan altas o no disminuyan considerablemente y el contenido de aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) es el

responsable de la velocidad del fraguado, disminuyéndola en los cementos tipo Portland.

A continuación se muestra en la figura 4.1 la tendencia en cuanto a la cantidad de agua que requieren los yesos con diferentes porcentajes de polvillo adicionado para lograr una consistencia normal, los resultados para la construcción de éste gráfico se muestran en la tabla C.1.



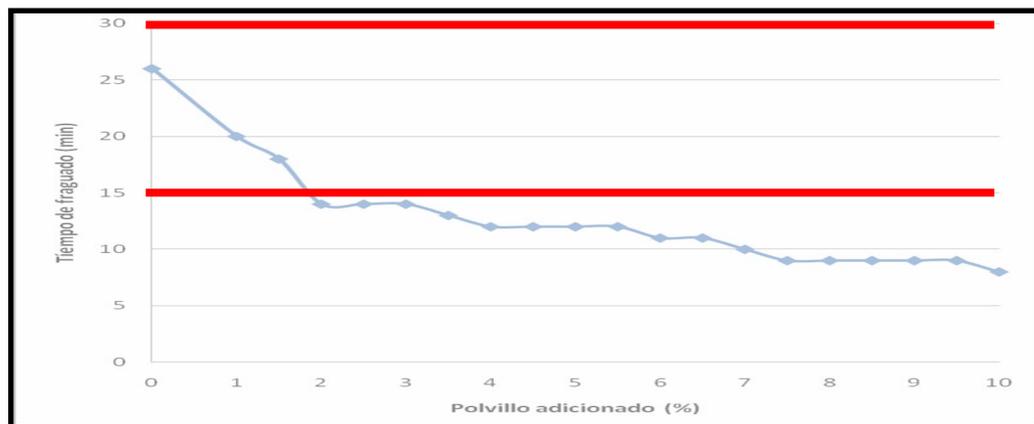
**Figura 4.1 Cantidad de agua necesaria para lograr una consistencia normal en el yeso calcinado en función del porcentaje de polvillo adicionado.**

El comportamiento reflejado en este gráfico es que a medida que el porcentaje de polvillo adicionado aumenta, la cantidad de agua necesaria para lograr una consistencia normal disminuye, lo cual se debe a que el polvillo actúa como germen aumentando la nucleación de un modo artificial, lo cual genera una alta sobresaturación, que hace que el tamaño del núcleo

necesario para lograr la cristalización sea menor, y en consecuencia la hidratación se produce a una mayor velocidad con un requerimiento de agua menor.

#### 4.1.3.1 Determinación del tiempo de fraguado a muestras de yeso calcinado con diferentes porcentajes de polvillo

Determinada el agua para lograr una consistencia normal se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en la figura 4.2, para cada muestra de yeso con porcentajes de polvillo adicionados, los datos para la construcción de este gráfico se encuentran en la tabla C.2.



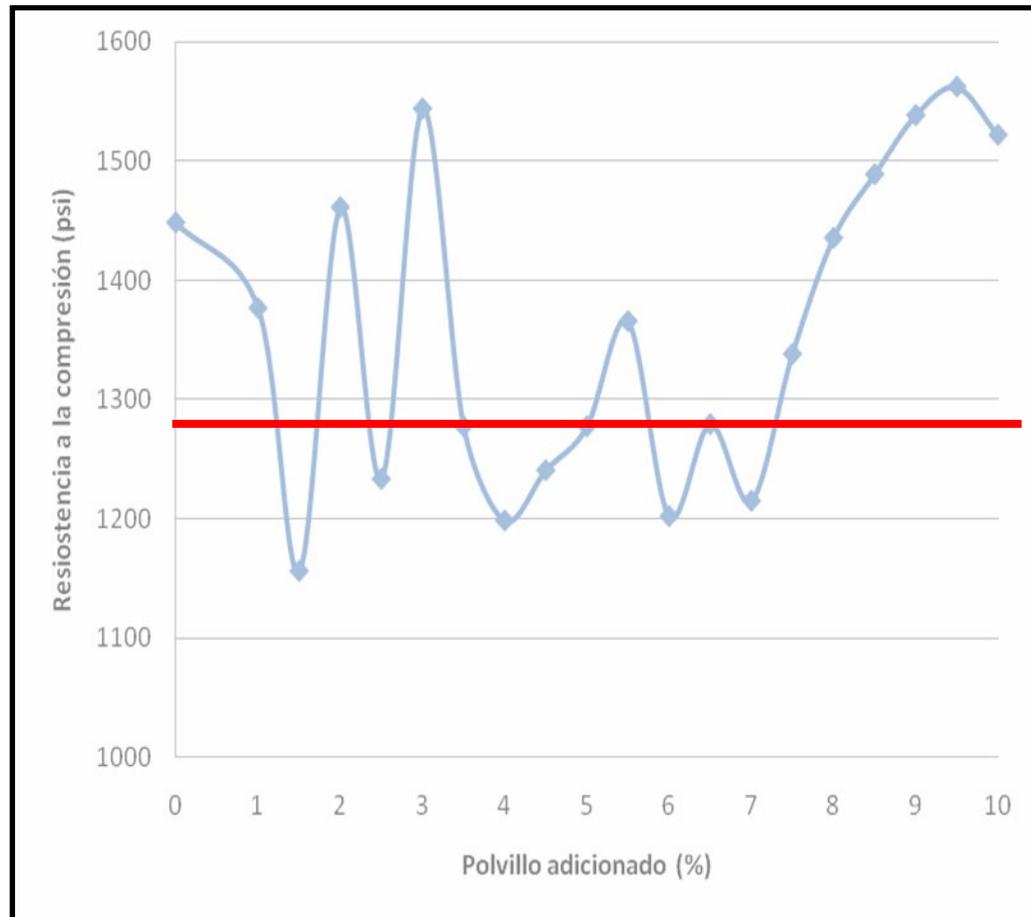
**Figura 4.2 Tiempo de fraguado del yeso calcinado de la planta de yeso en función del porcentaje de polvillo adicionado.**

Como se puede apreciar en la figura 4.2, el tiempo de fraguado del yeso calcinado con adiciones de polvillo tiende a disminuir en la mayoría de los porcentajes, incluso por debajo de 15 min que es el límite inferior según las normas COVENIN, a medida que se aumenta el porcentaje de polvillo adicionado, lo cual indica que el polvillo actúa como un acelerador de esta propiedad física, aumentando la velocidad de fraguado, el factor clave de

esta etapa según la mayoría de los autores es la etapa de la nucleación. Durante el periodo de inducción, explicado en el capítulo 2, se produce el agrupamiento de los iones de calcio y de sulfato presentes en la lámina de agua que rodea a las fases anhidras durante su disolución, este agrupamiento da lugar a núcleos de doble hidrato, los cuales han de tener un determinado tamaño (radio crítico) para poder prosperar como núcleos de cristalización. El tamaño del radio crítico es inversamente proporcional a la sobresaturación; es decir, a altas sobresaturaciones el tamaño necesario es menor, con lo cual el periodo de inducción (inicio del fraguado) dura menos tiempo y con ello la velocidad de hidratación aumenta. También la presencia de los dobles hidratos da lugar a cristales más pequeños y delgados, lo cual influye marcadamente en la aceleración del tiempo de fraguado según Sanz Arauz [6]. El contenido de C3A disminuye el tiempo de fraguado en el cemento, por lo que su contenido en el polvillo, como se evidencia en la tabla 4.6, también puede ser el responsable de la disminución del tiempo de fraguado en el yeso tipo I.

#### **4.1.3.2 Determinación de la resistencia a la compresión a muestras de yeso calcinado con diferentes porcentajes de polvillo**

Mediante la figura 4.3 se puede observar el comportamiento de la resistencia a la compresión de muestras de yeso calcinado con diferentes porcentajes de polvillo, los datos para la construcción del gráfico se muestran en la tabla C.3.



**Figura 4.3 Resistencia a la compresión de yeso calcinado en función del porcentaje de polvillo adicionado.**

Los datos obtenidos no muestran una tendencia definida, aunque a partir de una adición de 7% se nota un incremento sostenido en las resistencias, y luego cae para una adición de 10%. Este comportamiento irregular se presume que se debe a la homogenización en el material, la cual posiblemente no fue la adecuada, ya que el polvillo por ser un material tan fino al combinarse con la arena utilizada para la preparación de los cubos y el yeso que son mucho más gruesos crean unos canales, creando sitios más ricos en polvillo que otros, generando puntos débiles en los cubos. También hay que recordar que el contenido de humedad al momento de la ruptura de

los cubos afecta considerablemente las resistencias a la compresión, por lo que este factor pudo haber intervenido. Es importante destacar que la acción de los aceleradores puede causar ciertas disminuciones en las propiedades físicas, debido a que éstos favorecen la formación de cristales más pequeños y delgados en forma de agujas, los cuales influyen notablemente en estas propiedades. Aunque las resistencias presentan un comportamiento erróneo, ninguno de los yesos con las adiciones de polvillo ensayados presentan resistencias menores de la resistencia requerida por la norma COVENIN 3638:2000.

#### **4.1.4 Establecimiento de posibles relaciones entre la adición del polvillo y las variables del proceso de molienda y cocción del yeso**

Estas relaciones fueron establecidas estudiando las propiedades de tiempo de fraguado, porcentaje de agua combinada y resistencia a la compresión de los yesos calcinados cuyas variables de molienda y cocción fueron modificadas a nivel de laboratorio.

##### **4.1.4.1 Relación entre la granulometría del yeso y las propiedades físicas y químicas del yeso calcinado**

Utilizando los datos de las tablas 3.8 y 3.9 se obtuvieron los resultados de porcentaje de agua combinada y de resistencia a la compresión que se muestran en la tabla 4.7, así como el tiempo de fraguado y el porcentaje pasante en tamiz 100 luego de someter el yeso a la calcinación.

**Tabla 4.7 Tiempo de fraguado, porcentaje de agua combinada, resistencia a la compresión y pasante en tamiz 100 para yesos con diferentes granulometrías simulando la hornada de planta de yeso.**

Pasante en tamiz 100 (%)	Tiempo de fraguado (min)	Porcentaje de agua combinada (%)	Resistencia a la compresión (psi)	Pasante en tamiz 100
82,2	29	7,68	1022,00	96,28
85,4	24	7,24	1022,65	97,72
89,2	21	5,9	1247,76	98,88
98,0	19 - 21	5,62	1423,40	99,2

En la tabla 4.7 se muestran los resultados de la determinación del tiempo de fraguado, porcentaje de agua combinada, resistencia a la compresión y el porcentaje pasante en el tamiz 100 para muestras de diferentes granulometrías obtenidas en el molino de laboratorio, cocidas mediante la curva de deshidratación empleada en la planta de yeso. Aquí se observa que cuando el yeso tiene un tamaño de partícula menor (pasante en tamiz 100 de 89,2%) entonces el tiempo de fraguado es más corto así como el porcentaje de agua combinada es menor, lo que quiere decir que la deshidratación fue más efectiva, la resistencia a la compresión es la mayor y

el residuo en tamiz 100 disminuye, haciendo que el pasante por éste aumente, lo cual es de esperarse debido a que la posibilidad de utilización del yeso reside en que al amasarlo con agua se forma una pasta que endurece constituyendo un conjunto monolítico; es decir, existe una reacción del yeso con el agua, por lo que se deduce que cuanto mayor sea el grado de división del yeso, tanto más completa será la reacción y consecuentemente la calidad del producto obtenido aumenta. Entonces la influencia del tamaño de las partículas está clara, ya que la velocidad de disolución de una sustancia depende del grado de división de la misma, lo que se evidencia en el yeso con un pasante en el tamiz 100 de 89,2% que tienen una calidad superior a la de los yesos con un tamaño de partícula mayor. El resultado que destaca es indudablemente la resistencia a la compresión, la cual varía notablemente hasta por debajo de 1100 psi que es lo mínimo que exige la norma COVENIN 3638:2000, por lo que el yeso con 82,2% y 85,4% pasante en tamiz 100 no son productos que cumplen con las especificaciones internas. El yeso con 89,2% pasante en tamiz 100 sería el único que se podría considerar para su obtención y respectiva cocción en la planta de yeso.

#### **4.1.4.2 Relación entre la granulometría del yeso y la temperatura de cocción**

En la tabla 4.8 se muestran los resultados que permitieron evaluar la relación entre la adición de polvillo y la cocción de yeso.

**Tabla 4.8 Tiempo de fraguado y porcentaje de agua combinada de yesos con distintas granulometrías simulando la curva de deshidratación de la planta de yeso pero con una temperatura de salida de 200 °C.**

Pasante en tamiz 100 (%)	Tiempo de fraguado (min)	Porcentaje de agua combinada (%)
82,2	21	7,33
85,4	23	7,17
89,2	20	5,53

Los resultados obtenidos en esta tabla demuestran que los tiempos de fraguado para las tres granulometrías estudiadas son muy similares entre sí y cortos en comparación con los resultados obtenidos en la tabla 4.7, donde se deshidrataron los mismos yesos pero con una temperatura de salida de 176 °C, el agua combinada también presenta un ligero aumento, debido a que a esta temperatura es posible la formación de las anhidritas inestables, que como se explicó anteriormente, son higroscópicas y absorben agua fácilmente del ambiente en donde se encuentran, formándose en semihidratos. Por lo cual estos resultados demuestran que la mayoría del agua combinada se encuentra como semihidrato y poco dihidrato que son los responsables de la obtención de tiempos de fraguados largos, lo cual se debe a la alta temperatura a la cual fue sometido el material.

A pesar de que el yeso presenta una granulometría gruesa, la alta temperatura de salida permitió la deshidratación de todo el grano y evitó que quedara agua dentro de éste, para de esta forma lograr yesos con un alto porcentaje de semihidratos. Solo se observan ligeras diferencias entre los tiempos de fraguado y exceptuando el yeso con 82,2 % pasante en tamiz 100, se cumple que mientras mayor tamaño de partícula menor tiempo de fraguado, ya que la reacción es más completa.

Posteriormente se le realizó al yeso con una granulometría de 89,2% pasante en el tamiz 100 una cocción, utilizando el método de deshidratación que mantiene la temperatura constante en 200 °C mostrada en la figura 3.16 los resultados se muestran en la tabla 4.10 junto a los resultados del mismo yeso cocido mediante la curva de deshidratación de la planta de yeso, resultados tomados de la tabla 4.7, a modo de comparación.

**Tabla 4.9 Tiempo de fraguado, porcentaje de agua combinada y resistencia a la compresión de yesos con un porcentaje de pasante en tamiz 100 de 89,2 % de pasante en tamiz 100 deshidratados mediante diferentes métodos de cocción.**

Método de deshidratación usada	Tiempo de fraguado (min)	Porcentaje de agua combinada (%)	Resistencia a la compresión (psi)
A 200 °C constante	29	5,42	1503,20
Planta de yeso	21	5,9	1247,76

En esta tabla se hace evidente la diferencia existente entre el yeso obtenido empleando la curva de planta de yeso y la obtenida usando el método de deshidratación que mantiene la temperatura constante de 200 °C,

donde la resistencia de éste último aumentó considerablemente respecto del yeso simulando la cocción de planta de yeso, lo cual se puede explicar debido a que el porcentaje de agua combinada es menor, lo que sugiere la existencia de un porcentaje mayor de fases anhídridas que otorgan una mayor resistencia a la compresión. El tiempo de fraguado es mucho más largo en el método que mantiene la temperatura constante en 200 °C, debido a que por el poco tiempo de residencia el agua combinada presente en el yeso se debe a fases dihidratadas y no a semihidratos, lo cual influyen notablemente en el tiempo de fraguado, a demás de la granulometría presentada, que como se observó en la sección anterior, incide también en esta propiedad física. Lo que ocurrió con el yeso obtenido por la simulación de planta de yeso se debe a que en ésta como se tuvo un tiempo de residencia mucho mayor que además incluyen perturbaciones en el sistema lo que a su vez genera fluctuaciones en la presión del vapor del mismo, favoreciendo la formación de fases de anhídrita inestables, que rápidamente se pudieron haber transformado en semihidratos, por lo que el tiempo de fraguado es corto y las resistencias son bajas por la cantidad de agua combinada que sugiere la presencia de semihidratos o anhídritas.

#### **4.1.5 Selección de la relación yeso calcinado – polvillo que cumpla con las especificaciones de la norma COVENIN 3638:2000.**

El yeso empleado para adicionar polvillo es el que tiene 89,2% pasante en tamiz 100, cocido mediante la simulación que mantiene la temperatura constante en 200°C el cual tiene un tiempo de fraguado de 29 min, por lo que el porcentaje que se adicionó para que este yeso cumpliera con las especificaciones de la norma antes mencionada fue de 2,0 %. En la siguiente tabla se muestran las propiedades físicas del yeso empleado para adicionar el polvillo y del yeso con polvillo adicionado.

**Tabla 4.10 Tiempo de fraguado, resistencia a la compresión, porcentaje de pasante en tamiz 100 y en tamiz 200 del yeso calcinado para adicionar el polvillo y con el porcentaje de polvillo adicionado, comparadas con las especificaciones de las normas COVENIN y las especificaciones internas.**

Tipo de yeso	Consistencia normal (g)	Tiempo de fraguado (min)	Resistencia a la compresión (psi)	Pasante tamiz 100 (%)	Pasante tamiz 200 (%)
Sin polvillo	145	29	1503,20	98,88	99,4
Con 2 % de polvillo	140	17	1423	97,06	99,18
Norma COVENIN	-	15-30	Mínimo 1100	-	Mínimo 85
Especificaciones internas	-	15-30	Mínimo 1100	Mínimo 97	Mínimo 98,5

Se observa que todas estas propiedades físicas cumplen con las especificaciones de la norma COVENIN 3638:2000 pero están muy cercanos a los límites de control inferiores de las especificaciones internas. También se realizaron ensayos químicos a este yeso para compararlo con el yeso sin adición a fin de establecer posibles diferencias entre ambos yesos y relaciones entre estas propiedades químicas y las propiedades físicas estudiadas, mostrándose los resultados en la siguiente tabla.

**Tabla 4.11 Análisis químico de la producción promedio mensual de la planta de yeso de Pertigalete y del yeso con adición de polvillo del 2%.**

Propiedad (%)	Yeso planta	Yeso con 2% de polvillo
---------------	-------------	-------------------------

	Pertigalete	
Agua libre	0,25	0,32
Agua combinada	19,56	19,25
SiO <sub>2</sub> +RI	0,78	1,82
R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,41	0,58
CaO	32,63	33,31
MgO	0,04	0,08
SO <sub>3</sub>	45,54	44,49
NaCl	0,09	0,12
CaSO <sub>4</sub> .1/2H <sub>2</sub> O	78,68	77,78
CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	93,33	91,98

Donde: SiO<sub>2</sub>+RI: óxido de silicio y residuos insolubles, R<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: óxidos de hierro y de aluminio, CaO: óxido de calcio, MgO: óxido de magnesio, SO<sub>3</sub>: Trióxido de azufre, NaCl: cloruro de sodio y CaSO<sub>4</sub>.1/2H<sub>2</sub>O: Hemihidrato o semihidrato.

Como se aprecia en la tabla 4.11, los valores de las propiedades químicas del yeso con polvillo son en la mayoría de los casos mayores a las

del yeso de planta de yeso (sin polvillo), exceptuando el porcentaje de agua combinada y el trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ), que son menores. En el caso del agua combinada la diferencia no es representativa y este valor depende en todos los casos de la deshidratación del material, recordando que son obtenidos de formas diferentes. Para el trióxido de azufre se presume que es menor debido a que el polvillo ha sustituido el 2% de la materia de yeso y con él se ha ido parte de este óxido, y aunque el polvillo tiene un porcentaje de éste, mostrado en la tabla 4.7, no es tan apreciable como para aumentar este valor por encima del obtenido para la planta de yeso. La diferencia más apreciable es la del óxido de silicio y residuos insolubles, teniendo el yeso con adición de polvillo una marcada diferencia con respecto al yeso sin adición, lo cual puede ser una de las causas de la ligera disminución en el yeso producto de la sustitución de polvillo, ya que como es conocido éstas impurezas modifican el hábito cristalino de los yesos, haciéndolos menos resistentes; así como también puede afectar el fraguado ya que las mismas ocasionan la formación acelerada de núcleos cristalinos de doble hidrato, lo cual se explicó anteriormente en el capítulo 2; esto hace que aumente la velocidad de hidratación y en consecuencia disminuyan los tiempos de fraguado.

#### **4.1.6 Cálculo del incremento de la producción del yeso tipo por efecto de la adición del polvillo.**

En la tabla 4.12 se muestra la producción actual de yeso tipo I de la planta Pertigalete, incorporando el método de deshidratación manteniendo la temperatura constante en 200 °C e incorporando la producción antes mencionada y el porcentaje de polvillo seleccionado.

**Tabla 4.12 Producción de la planta de yeso de Pertigalete actual, incorporando la nueva curva de deshidratación, manteniendo la temperatura constante de 200 °C e incorporando la curva antes mencionada y el porcentaje de polvillo seleccionado.**

Tipo de producción	Hornadas anuales (#)	Producción anual (ton)	Aumento de la producción anual (%)
Actual	2678,77	34824	-
Con el nuevo método de deshidratación	4851,01	63063,13	81,09
Con el nuevo método de deshidratación y adición de polvillo	4851,01	64324,39	84,71

Los resultados reflejan que el aumento de la producción si se incorpora el 2% de polvillo y reproduciendo el método de deshidratación que mantiene la temperatura constante en 200 °C en planta de yeso es de un 84,71%, lo cual se traduce en una producción de 64324,39 ton/año. Se puede observar que el incremento de la producción por adición de polvillo solo representa un aumento de 1261,26 ton/año, de la producción lo cual luce poco atractivo en comparación con el aumento de la producción si se incorpora solo el nuevo método de deshidratación. Sin embargo es importante destacar que el objetivo de esta investigación no es el aumentar la producción si no la incorporación del polvillo en la fabricación del yeso tipo I a fin de contribuir con la disminución del polvillo residual de los hornos de clinker de la planta vía húmeda de Pertigalete y evitar así la acumulación de este pasivo

ambiental, además de lograr un ahorro en la utilización de la materia prima de la fabricación del yeso la cual es actualmente importada.

#### **4.2 CONCLUSIONES**

1. La cocción del yeso en estufa de laboratorio simula la cocción realizada en la planta de yeso.
2. La molienda realizada en la planta de yeso se puede simular en el laboratorio mediante un molino de bolas.
3. El calor suministrado al sistema de cocción no es proporcional a la deshidratación del yeso.
4. La transformación de las fases del sistema sulfato de calcio – agua no es constante.
5. La presencia de vapor de agua influye en la deshidratación del yeso.
6. El tiempo de cocción del yeso es directamente proporcional al tiempo de fraguado en tiempos de cocción entre 190 y 90 min.
7. El aumento de velocidad de transferencia de calor al sistema de deshidratación del yeso permite obtener yesos con tiempo de fraguado aceptables en un menor tiempo de cocción.
8. El porcentaje de agua combinada que da tiempos de fraguado satisfactorios (18-22min) se ubica entre 5 y 7,5 %.

9. La cantidad de agua de amasado necesaria para lograr una consistencia normal en el yeso tipo I disminuye a medida que aumenta la cantidad de polvillo adicionado.
10. El porcentaje de polvillo seleccionado que produce un yeso bajo con las especificaciones de la norma COVENIN 3638:2000 es de 2%.
11. El yeso seleccionado para adicionar el polvillo presenta una granulometría de 89,2 % pasante en tamiz 100 y la cocción se realiza a una temperatura constante de 200 °C durante 1 h 45 min.
12. La incorporación del método de deshidratación con una temperatura constante en un tiempo de cocción menor permite aumentar el número de hornadas diarias.
13. El aumento de la producción anual por efecto de la incorporación del 2% de polvillo y la incorporación del nuevo método de deshidratación es de 84,71%.

#### **4.3 RECOMENDACIONES**

1. Realizar ensayos donde se puedan observar las fases de los yesos calcinados, como microscopía de barrido electrónica.
2. Realizar un estudio económico formal que evalúe el costo de la incorporación de la instrumentación necesaria para llevar a cabo la adición del polvillo en la planta de yeso.

3. Evaluar el rendimiento del molino Raymond para la obtención de yesos con partículas de tamaños mayores a fin de evaluar la posibilidad de obtenerlos para hacer posible la incorporación del polvillo.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] CEMEX VENEZUELA S. A. C. A. “Proceso de fabricación del cemento”, manual de curso. Pto. La Cruz (1990).

[2] BARÓN, D., LEDEZMA A. y LUZARDO L. “Manual del proceso de fabricación del cemento”, Cemex Venezuela S. A. C. A. Pto. La Cruz (2002).

[3] ARREDONDO, F. “Estudios de materiales” Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del cemento. Tercera edición. Madrid (1963).

[4] SALAZAR N., S. “Evaluación técnica del proceso de fabricación de yeso tipo VII”. Tesis de grado, departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente. Pto. La Cruz (1997).

[5] SILVA, H. “Obtención de sulfato de potasio a partir del polvillo subproducto de los hornos rotatorios de la industria del cemento”. Tesis de grado, Post grado de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Pto. La Cruz (1988).

[6] SANZ, D. “Análisis del yeso empleado en revestimientos exteriores mediante técnicas geológicas”. Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid (2009).

[7] TAYLOR, H. F. W. “Enciclopedia de la Química Industrial” Tomo I. Química de los cementos, Volumen I. Ediciones URMO. España (1967).

[8] UNIVERSIDAD DE ALICANTE, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA. El Yeso. Disponible en <http://iq.ua.es/Yeso/propiedades.htm>. España (2009).

[9] LEA, F. y DESCH, C. H. "Chemistry of cement and concrete" Segunda edición. Londres (1956).

[10] BHA GROUP "Principios básicos de los precipitadores electrostáticos. Introducción general a la operación, teoría y mantenimiento de los precipitadores" BHA. Kansas City. (1994).

[11] COVENIN 3640:2000. Norma Venezolana. Yeso. Construcción y moldeo. Análisis químico. Caracas (2000).

[12] Norma COVENIN 3639:2000. Norma Venezolana. Yeso. Construcción y moldeo. Análisis físico. Caracas (2000).

[13] ASTM C114-09. Standard test methods for Chemicals analysis hydraulic. Philadelphia (2009).

[13] Norma COVENIN 3638:2000. Norma Venezolana. Yeso. Construcción y moldeo. Requisitos. Caracas (2000).

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

<b>TÍTULO</b>	<b>“EVALUACIÓN DE LA ADICIÓN DEL POLVILLO RESIDUAL DE LOS HORNOS DE UNA PLANTA DE CEMENTO EN LA PRODUCCIÓN DE YESO TIPO I”</b>
<b>SUBTÍTULO</b>	

**AUTOR (ES):**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>CÓDIGO CULAC / E MAIL</b>
<b>Bravo Rosario, Migdalia Andreina</b>	<b>CVLAC:18.549.490 E MAIL: migdy17_6@hotmail.com</b>

**PALÁBRAS O FRASES CLAVES:**

Yeso

Anhidrita

Hidrato

Molienda

Cocción

Polvillo residual

Hornos de clinker

Deshidratación de yeso

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

ÀREA	SUBÀREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Química

**RESUMEN (ABSTRACT):**

**Con el objetivo de evaluar la adición del polvillo residual de los hornos de la planta de cemento vía húmeda al yeso tipo I de Cemex Venezuela, Empresa en Transición, se reprodujo a nivel de laboratorio la cocción del yeso tipo I, empleando tamices de 90 µm de apertura en una estufa, y la molienda en un molino de bolas, obteniéndose como resultados que la cocción y molienda del yeso tipo I son totalmente reproducibles a nivel de laboratorio. Esto permitió estimar las variables más importantes que afectan la cocción del yeso como el calor suministrado, el tiempo de cocción y la velocidad de la transferencia de calor. Al estudiar la influencia del calor suministrado al sistema de cocción se encontró que éste no es proporcional a la deshidratación del yeso. Posteriormente se determinó el tiempo de fraguado, mediante el aparato Vicat y la resistencia a la compresión a peso constante de muestras de yeso con diferentes porcentajes de polvillo (entre 1 y 10%), mediante estas pruebas se obtuvo que el polvillo es un excelente acelerador del tiempo de fraguado. También se determinaron las variables del proceso de cocción y molienda que presentan posibles relaciones con la adición de polvillo y se encontró que modificando la granulometría del yeso se pueden conseguir tiempos de fraguados deseados, así como la incorporación del método de deshidratación con una temperatura constante en un tiempo de cocción menor permite obtener yesos con buenos tiempos de fraguado (18 – 22 min) que conllevan a la realización de un número mayor de hornadas diarias. Se seleccionó la relación yeso – polvillo que cumpliera con las especificaciones de la norma COVENIN 3638:2000, la cual establece los requisitos que deben cumplir los yesos de construcción y moldeo, siendo el porcentaje seleccionado de 2%, para finalmente calcular el aumento de la producción del yeso tipo I por efecto de la adición de polvillo y de la implementación de un nuevo método de deshidratación, el cual fue de 84,71%.**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****CONTRIBUIDORES**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL</b>				
<b>Silva U., Héctor L.</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS X</b>	<b>TU</b>	<b>JU</b>
	<b>CVLAC:</b>	<b>3.955.146</b>			
	<b>E_MAIL</b>	<b>hectorlsu@yahoo.es</b>			
	<b>E_MAIL</b>				
<b>Andrade, Avelino</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU X</b>	<b>JU</b>
	<b>CVLAC:</b>				
	<b>E_MAIL</b>	<b>avelino.andrade@</b>			
	<b>E_MAIL</b>	<b>cementosdevenezuela.com</b>			
<b>Parra, Frank</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU</b>	<b>JU X</b>
	<b>CVLAC:</b>				
	<b>E_MAIL</b>	<b>8.265.531</b>			
	<b>E_MAIL</b>				
<b>Cova, Alexis</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU</b>	<b>JU X</b>
	<b>CVLAC:</b>				
	<b>E_MAIL</b>	<b>11.905.328</b>			
	<b>E_MAIL</b>				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

<b><u>2010</u></b>	<b><u>04</u></b>	<b><u>23</u></b>
<b>AÑO</b>	<b>MES</b>	<b>DÍA</b>

**LENGUAJE: SPA.**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS.Evaluación de la adición del polvillo al yeso.doc	Application/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F  
G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r  
s t u v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ESPACIAL: Dpto. de Producción/ Cemex Venezuela, Empresa en  
Transición (Anzoátegui) (OPCIONAL)

TEMPORAL: \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pre-Grado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Química

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente /Núcleo de Anzoátegui

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****DERECHOS:****De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajos de grado****“Los Trabajos de Grado son de Exclusiva Propiedad de la Universidad de Oriente y Solo Podrán ser Utilizados para Otros Fines con el Consentimiento del Consejo de Núcleo Respectivo, el Cual Participara al Consejo Universitario”.****R., Migdalia A.****AUTOR****Silva, Héctor****Alexis****TUTOR****JURADO****Parra, Frank****Cova,****JURADO****Salas, Yraima****POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS**