

EVALUACION DEL FENOMENO DE FORMACION DE GRUMOS Y/O  
ENDURECIMIENTO PREMATURO EN LOS CEMENTOS ENSACADOS EN  
CEMENTOS PAZ DEL RIO S.A.

PAOLA RINCÒN GUTIÉRREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2006

EVALUACION DEL FENOMENO DE FORMACION DE GRUMOS Y/O  
ENDURECIMIENTO PREMATURO EN LOS CEMENTOS ENSACADOS EN  
CEMENTOS PAZ DEL RIO S.A.

PAOLA RINCÓN GUTIÉRREZ

Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Químico

Director  
Dionisio Antonio Laverde Catano  
Ingeniero Químico, Ph.D.

Codirector  
Luís Fernando Rodríguez Araque  
Ingeniero Metalúrgico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2006

## DEDICATORIA

A Dios por darme tantas cosas maravillosas,

A mi mamá por su amorosa comprensión y apoyo.

A mi papá por su preocupación y apoyo.

A Neydi y Santiago por brindarme su alegría en el diario vivir.

A mi abuelita Anadelia por sus oraciones.

A mis tíos y familiares por el apoyo brindado.

A Fernando por su apoyo incondicional.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco muy especialmente:

A CPR por la financiación de este trabajo.

Al Ingeniero Humberto Vergara por la oportunidad brindada.

Al Ingeniero Luís Fernando Rodríguez Araque por su asesoría y colaboración en este trabajo.

Al Ingeniero Dionisio Antonio Laverde Catano por su dirección.

Al laboratorio de Control de Calidad por su colaboración.

A todas las personas que de una u otra manera contribuyeron con la elaboración de este trabajo.

## TABLA DE CONTENIDO

	pàg
INTRODUCCIÓN	1
1 FUNDAMENTOS BASICOS	4
1.1 FABRICACION DEL CEMENTO	4
1.1.1 Materias primas	4
1.1.2 Trituración	5
1.1.3 Prehomogenización	5
1.1.4 Dosificación de crudo	5
1.1.4.1 Factor de saturación de cal	5

1.1.4.2 Modulo silícico	5
1.1.4.3 Modulo de alumina o de fundentes	6
1.1.5 Molienda de crudo	6
1.1.6 Homogenización	6
1.1.7 Precaentamiento y Clinkerización	7
1.1.8 Enfriamiento del Clinker	7
1.1.9 Molienda del cemento	7
1.1.10 Almacenamiento del cemento y Despacho	8
1.2 MARCO TEORICO	8
1.2.1 Prehidratación del cemento	8
1.2.1.1 Deshidratación del yeso	9

1.2.1.1.1 Deshidratación del yeso en la molienda de cemento	10
1.2.1.1.2 Deshidratación del yeso en el ensilado	10
1.2.1.2 Inyección de agua en la molienda de cemento	11
1.2.2 Efectos de la finura del cemento	12
1.2.3 Efectos del empaque	12
1.2.4 Condiciones de almacenamiento del clinker	13
1.2.5 Presencia de componentes secundarios.	14
1.3 ANTECEDENTES	15
2 DESARROLLO EXPERIMENTAL	17
2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL MATERIAL DE PARTIDA	17
2.2 ANALISIS DE ALTERACION DEL CEMENTO ALMACENADO	17

2.3	DIFRACTOMETRIA DE RAYOS X (DRX)	18
2.4	NATURALEZA DEL YESO	19
2.5	REACTIVIDAD DEL CLINKER	19
2.6	EMPAQUE	19
2.7	ANALISIS GRANULOMETRICO DEL CEMENTO	20
2.8	CONDICIONES AMBIENTALES DE ALMACENAMIENTO	20
3	RESULTADOS Y ANÁLISIS	21
3.1	CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL MATERIAL DE PARTIDA	21
3.2	DETERMINACION DE LA PRESENCIA DE GRUMOS A DIFERENTES TIEMPOS DE ALMACENAMIENTO	22
3.3	DIFRACTOMETRIA DE RAYOS X (DRX)	26

3.4	NATURALEZA DEL YESO	27
3.5	REACTIVIDAD DEL CLINKER	28
3.6	EMPAQUE	29
3.7	ANALISIS GRANULOMETRICO DEL CEMENTO	29
3.8	CONDICIONES AMBIENTALES DE ALMACENAMIENTO	30
4	CONCLUSIONES	31
5	RECOMENDACIONES	33
	BIBLIOGRAFIA	34
	ANEXOS	37

## LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Identificación de las muestras utilizadas para el estudio de grumos	18
Tabla 2. Características químicas del material de partida	21
Tabla 3. Características físicas del material de partida	21
Tabla 4. Contenido de grumos a condiciones normales de almacenamiento (C.N.).	22
Tabla 5. Contenido de grumos a condiciones ambientales agresivas (C.A.)	22
Tabla 6. Ensayos de físicos realizados a cemento expuestos a condiciones normales.	25
Tabla 7. Ensayos de físicos de cemento expuestos a condiciones ambientales agresivas.	25
Tabla 8. Naturaleza del yeso.	27
Tabla 9. Análisis cuantitativo de las fases del clinker.	28
Tabla 10. Características del empaque.	29

## LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Contenido de Grumos vs Tiempo de almacenamiento (cemento Tipo 1)	23
Figura 2. Contenido de Grumos vs tiempo de almacenamiento (cemento tipo 1M)	23
Figura 3. Contenido de Grumos vs tiempo de almacenamiento (Cemento tipo 1 y tipo 1M), bajo condiciones normales de almacenamiento.	24
Figura 4. Resultado fotográfico del cemento aterronado	24
Figura 5. Difractograma del cemento tipo 1 de regencia	26
Figura 6. Microfotografía del yeso	27
Figura 7. Microfotografía del clinker	28
Figura 8. Registro de las condiciones ambientales agresivas a las cuales se almaceno el cemento.	30

## LISTA DE ANEXOS

	pág
Anexo A. Diagrama de flujo del proceso de fabricación de cemento CPR	35
Anexo B. Diagrama de deshidratación del yeso	36
Anexo C. AMEF	37
Anexo D. Estadísticas de presencia de grumos en los últimos años	43
Anexo E. Composición química del cemento diferentes edades de almacenamiento	44
Anexo F. Registro fotográfico de cemento aterronado	51
Anexo G. Registro de difractogramas realizados a muestras de cemento Tipo 1 aterronado con diferente tiempo de almacenamiento	53
Anexo H. Análisis petrográficos del yeso	61
Anexo I. Composición química y cálculo potencial de las fases del clinker.	64
Anexo J. Fotos microscopia del clinker CPR	65
Anexo K. Resultados de análisis granulométrico (CILAS)	66
Anexo L. Registro de condiciones ambientales de la bodega de Sogamoso	70

## RESUMEN

**TITULO:** EVALUACION DEL FENOMENO DE FORMACION DE GRUMOS Y/O ENDURECIMIENTO PREMATURO EN LOS CEMENTOS ENSACADOS EN CEMENTOS PAZ DEL RIO S.A.\*

**AUTOR:** PAOLA RINCON GUTIERREZ

**PALABRAS CLAVES:** grumos, aterronamiento, apelmazamiento, humedad, pre-hidratación, syngenita, etringita, portlandita, tobermorita, hidrogarnet, fraguado en bolsas.

### DESCRIPCIÓN:

La formación de grumos y/o endurecimiento prematuro del cemento, también denominado aterronamiento, es un problema frecuente en cementos ensacados y almacenados en silos, donde el acceso a la humedad es facilitado por diferentes medios.

Contenidos altos de sulfatos alcalinos, elevada temperatura y humedad en la molienda y almacenamiento en silos, humedad en los sacos y malas condiciones de almacenamiento y transporte del cemento ya empacado; son factores que están relacionados con la pre-hidratación del cemento, favoreciendo a su vez el mecanismo de aglomeración.

El fenómeno de pre-hidratación altera el desempeño del cemento, y se manifiesta especialmente a través de la disminución en las resistencias mecánicas y el alargamiento de los tiempos de fraguado.

Este trabajo recopila una serie de ensayos tendientes a esclarecer las causas de la ocurrencia de este fenómeno en Cementos Paz del Río S.A., fundamentalmente se ha tenido en cuenta la influencia que tienen, las materias primas, la mineralogía del clíinker y yeso, los parámetros operativos de la molienda, las condiciones de almacenamiento, las características del empaque, entre otros factores que intervienen en el mecanismo de formación de grumos.

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Ingeniería Química. Director: Dionisio Antonio Laverde Catano, Ingeniero Químico.

## SUMMARY

**TITLE:** EVALUATION OF THE PHENOMENON OF FORMATION OF LUMP AND/OR PREMATURE HARDENING IN THE SACKED CEMENTS IN CEMENTOS PAZ DEL RIO. \*

**AUTHOR:** PAOLA RINCÓN GUTIÉRREZ

**KEY WORDS:** lumping, packsetting, moisture, prehydration, syngenita, etringita, portlandita, tobermorita, hidrogarnet.

### DESCRIPTION:

The formation of clots and/or premature hardening of the cement, also denominated lumping, it is a frequent problem in sacked cements and stored in silos, where the access to the humidity is facilitated by different means.

High contents of sulfates alkaline, high temperature and humidity in the milling and storage in silos, humidity in the sacks and bad storage conditions and transport of the cement already packed; they are factors that are related with the pre-hydrate of the cement, favoring in his turn the mechanism of agglomeration.

The prehydration phenomenon alters the acting of the cement, and it is manifested especially through the decrease in the mechanical resistances and the lengthening of the times of having forged.

This work gathers a series of rehearsals dedicated to clarify the causes of the occurrence of this phenomenon in Cementos Paz del Río S.A., fundamentally it has been kept in mind the influence that you/they have, the matters cousins, the mineralogy of the clinker and gypsum, the operative parameters of the mill, the storage conditions, the characteristics of the packing, among other factors that intervene in the mechanism of formation of clots.

\* Grade project.

\*\* Physic-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering. Director: Dionisio Antonio Laverde Catano, Chemical Engineer.

## INTRODUCCION

El cemento Pórtland es un material con características aglomerantes, el cual al ser mezclado con agua, tiene la propiedad de fraguar tanto en el aire como en el agua y formar una masa endurecida. Esta característica lo hace susceptible a la prehidratación, que son todas aquellas reacciones que se dan entre el agua y el cemento, previamente a su uso final. La fuente del agua puede ser externa (medio ambiente) o interna (la deshidratación del yeso en el molino y silos, el ambiente del molino y el aire de transporte).

Durante la molienda, almacenamiento y transporte del cemento, pueden darse reacciones químicas como la deshidratación del yeso y la prehidratación de algunas fases mineralógicas del clínker, que alteran seriamente las propiedades del cemento, principalmente:

- Formación de grumos.
- Cambios de fluidez
- Formación de bloques en los silos
- Reducción de las resistencias
- Cambios en el desarrollo del fraguado.

En el almacenamiento, se da una clara diferenciación entre los efectos que puede tener el que se haga en un silo o en una bolsa.

El almacenamiento en silos por lo general está caracterizado por:

- Alta temperatura, mayor de 70 °C.
- No hay contacto con el exterior.

Esto significa deshidratación del yeso simultánea con el fenómeno de prehidratación.

El agua proveniente de la deshidratación del yeso migra dentro de silos hacia las áreas de menor presión de vapor, reaccionará en primera instancia con la cal libre,

seguidamente formará la syngenita con el  $K_2SO_4$  si está presente y posteriormente iniciará la hidratación de los minerales del clinker. Debido a estas reacciones se formaran dentro del silo, grumos, costras y quizás bloques.

Cuando el cemento se empaqueta en bolsas y se almacena se dan otras características:

- Temperaturas bajas, inferiores a 70 °C. Estas aseguran que no tendrá lugar la deshidratación del yeso.
- Contacto del cemento con el medio ambiente, portador de agua.

El cemento estará en contacto con la atmósfera circundante, a través de la bolsa de papel, aumentando la posibilidad de su prehidratación con los efectos ya mencionados.

El empaque para el cemento en todo el mundo es normalmente de válvula, encolado, de papel kraf con gramaje entre 70 y 100 gr/cm<sup>2</sup> y en dos y tres pliegos.

El papel debe tener una permeabilidad que permita el rápido desalojo del aire de llenado y al mismo tiempo obstaculice la infiltración del aire húmedo al interior del saco. Dadas las dificultades para establecer simultáneamente estos requerimientos, la industria ha virado hacia la utilización del despacho en sacos sobre pellets recubiertos con un plástico termoencogible o la fabricación de sacos con capa plástica intermedia.

En general existen tres tipos de fraguados relacionados con el almacenamiento.

**Fraguado de silo (silo set):** que se manifiesta con la formación de grumos y costras durante el almacenamiento del cemento caliente a granel, acompañado por la reducción de las resistencias a la compresión a corta edad. No hay ningún incremento en las pérdidas al fuego pero el yeso pierde agua de cristalización.

**Fraguado de empaquetamiento (pack set):** es una condición que a veces se presenta en cementos almacenados a granel impidiendo su flujo, lo que puede superarse por medios mecánicos de pequeña o gran envergadura, llegando en algunos momentos a ser necesario la presencia de explosivos. La fricción estática es más grande que la cinética y es necesario suministrar una cantidad de energía suficiente para superar aquella fuerza que impide el flujo normal, la cual se incrementa en la medida que el tiempo de reposo aumenta.

Normalmente no se encuentra ninguna variación en las pérdidas al fuego o el agua de cristalización.

**Fraguado de bolsa (bag set)**”: se caracteriza por la presencia de grumos en el cemento almacenado bajo condiciones de humedad, la causa es la reacción química entre el cemento y la humedad presente en el aire. Aumentando el contenido de pérdidas al fuego que varía en intensidad de acuerdo a la humedad del aire. El fraguado de bolsa como grumos puede interrumpirse, cuando aún se encuentra en estado flojo, ocurriendo de nuevo solamente en el mismo material bajo una exposición similar. El fraguado de bolsas ocasiona alteraciones en el comportamiento normal de un cemento:

- mayor cantidad de agua para lograr la consistencia normal de la pasta.
- Mayor tiempo de mezclado del concreto.
- Caída de las resistencias.
- Variación en el tiempo de fraguado, en algunos casos fraguado rápido.

Las investigaciones realizadas sobre el desarrollo de este fenómeno en el cemento CPR han permitido precisar los siguientes factores involucrados:

- Agua proveniente de la deshidratación del yeso
- Agua proveniente del medio ambiente.
- Contenido y alto grado de cristalización del alúminato tricalcico (C3A) en el Clinker.

# 1 FUNDAMENTOS BASICOS

## 1.1 FABRICACION DEL CEMENTO EN CPR

El proceso de fabricación del cemento consiste en tomar materiales calcáreos y arcillosos de la naturaleza, transformarlos a polvo con determinada composición química, homogeneizarlos y someterlos a un proceso de cocción a temperaturas del orden de 1500 °C.

Este proceso sigue una secuencia de transformaciones físicas y químicas que aseguran la formación de los minerales requeridos en el Clínter (Producto intermedio obtenido después del proceso de cocción). Estos minerales deben ser adecuados en cantidad, calidad y tamaño, por lo cual, además del proceso de cocción, es importante su enfriamiento.

El cemento como tal es el resultado de la molienda fina de ese clínter con un material que regule su fraguado, como el yeso, y otras adiciones como calizas, puzolanas, escorias, cenizas, etc; que hacen parte de las necesidades del usuario final y de los compromisos de calidad que se adquieran. En el **Anexo A** se presenta el diagrama del proceso de fabricación.

### 1.1.1 Materias primas

Las materias primas más importantes en la fabricación del cemento son, la caliza (aportadora de CaO) y las arcillas (aportadoras de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Ambas deben mezclarse según sus propias composiciones químicas y las composiciones requeridas para la mezcla cruda.

Cuando no es posible alcanzar la composición química deseada para el crudo con los dos componentes, caliza y arcilla, es necesario añadir pequeñas cantidades de otras materias primas de corrección. Estas deben contener concentraciones relativamente altas de los óxidos necesarios (normalmente Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> y de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) para lograr aquellas composiciones.

### 1.1.2 Trituración

Las materias primas obtenidas en las canteras, por voladura, han de reducir su tamaño para efectos de su aplicación posterior. Esta reducción se realiza mediante trituradores y molinos. La trituración es el proceso de reducción (De

unos 80 cm a 20 mm aproximadamente) por el cual el material se rompe hasta un tamaño de partícula conveniente para su admisión en la molienda; moler por el contrario, se refiere a la reducción de los materiales a tamaños de gran finura.

### 1.1.3 Prehomogeneización

Dado que es extremadamente rara la existencia de materias primas naturales que cumplan con la composición química deseada para la fabricación de clinker, es normal en la industria del cemento proceder a la mezcla y prehomogeneización de las materias primas trituradas antes de ir a la molienda de crudo, para tal efecto, los materiales una vez triturados se apilan a lo largo de un eje longitudinal formando capas que posteriormente se recogen en sentido transversal y por último pasan a alimentar los molinos.

### 1.1.4 Dosificación de crudo

La producción continua de clinker de alta calidad solo es posible, si el crudo tiene una composición química óptima, y si esta composición oscila entre límites lo más estrechos posibles. Para cumplir con estas exigencias, es necesario realizar una dosificación con base en la composición química completa de calizas y correctores, tomando como referencia la fijación de parámetros de control tales como el factor de saturación de cal y los módulos de sílice y aluminio, entre otros.

#### 1.1.4.1 Factor de Saturación de Cal. (FSC)

Relaciona al CaO con los demás componentes, indica la cantidad de CaO que puede combinarse con los componentes ácidos durante el quemado.

La cantidad teórica de CaO más elevada corresponde al 100 %, siendo 94 % el valor considerado como razonable en el clinker.

$$\text{FSC} = \frac{\text{CaO}}{2.8 \text{ SiO}_2 + 1.18 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

#### 1.1.4.2 Modulo de Silícico (MS)

Relaciona la sílice con los fundentes. Los límites establecidos son:  $1.8 < MS < 3.6$ . Los valores comprendidos entre 2.4 y 2.7 son los ideales.

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

#### 1.1.4.3 Modulo de alúmina o de fundentes (MA)

Relaciona la alúmina con el oxido de hierro. Los límites establecidos son:  $1 < MA < 3$ ; siendo el ideal entre 1.3 y 1.4

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

#### 1.1.5 Molienda de crudo

La molienda de crudo es la fase de reducción de tamaño de la materia prima, que se efectúa entre los procesos de trituración y cocción, y debe cumplir los siguientes requisitos:

- Producir un crudo cuya finura (tamaño de partícula y granulometría) sea la adecuada para la producción de clinker con la calidad requerida.
- Obtener la mezcla cruda apropiada mediante el suministro de componentes en proporción correcta.
- Mezclar los componentes.
- Secar la materia prima para obtener una buena manipulación del crudo.

El control de dosificación de las materias primas se hace de acuerdo con los resultados de los análisis del equipo de rayos X del laboratorio, sobre muestras acumuladas horarias.

#### 1.1.6 Homogeneización

La homogeneidad de un crudo es condición indispensable para obtener un clinker de composición uniforme y para conseguir una marcha regular del proceso de cocción. En vista de ello, en los últimos años se han desarrollado varios métodos y sistemas por los cuales se puede llegar económicamente a la obtención de un alto grado de homogeneización en la mezcla cruda. Se construyen silos equipados especialmente para el almacenamiento y la homogeneización neumática del crudo. La homogeneización neumática se basa fundamentalmente en la obtención de un estado semifluido del material mediante el efecto del aire comprimido y, algunas veces, incluso, con la intervención de una agitación mecánica.

### **1.1.7 Precalentamiento y Clinkerización**

Para fabricar clinker a partir de material crudo, es preciso calcinar éste hasta una temperatura de 1450°C, alcanzando así la sinterización o clinkerización. Durante el calentamiento del crudo, y particularmente a la temperatura de cocción tienen lugar importantes procesos fisicoquímicos tales como, la deshidratación de los minerales de la arcilla, la descomposición de los carbonatos (descarbonatación o expulsión de CO<sub>2</sub>) reacciones en estado sólido y reacciones con participación de una fase líquida o fundida, así como cristalizaciones. Estos procesos se ven afectados sustancialmente, no sólo por factores químicos del crudo (como su composición química), sino también por factores mineralógicos y factores físicos (finura, tamaño de sus partículas), homogeneidad y otros. El transcurso completo de estas reacciones juega un papel en la calidad del cemento resultante.

El proceso de clinkerización comienza en el sistema intercambiador por suspensión de cinco etapas, dotado con precalcinador, en donde el crudo queda calcinado en un 90% y ya, en ese estado, pasa al horno rotatorio con una temperatura alrededor de 850 °C.

En la actualidad se cuenta con carbón como combustible, el cual es preparado (trituración, moliendo y secado) previamente para su utilización. El carbón es secado y pulverizado en un molino vertical de dos rodillos, ventilado con gases calientes con temperaturas de 100 a 110 °C provenientes del enfriador de clinker.

### **1.1.8 Enfriamiento del Clinker**

El enfriador de clinker representa un elemento imprescindible en un sistema de horno y juega un papel decisivo sobre la eficiencia del proceso, los enfriadores de clinker básicamente deben realizar tres funciones:

- Recuperar la máxima cantidad de calor posible del clinker caliente mediante el calentamiento del aire utilizado para la combustión.
- Enfriar el clinker desde los 1400 °C hasta unas temperaturas adecuadas para facilitar su manipulación y almacenamiento, normalmente hasta 100 – 200°C.
- Conseguir una máxima velocidad de enfriamiento para congelar el equilibrio de las fases del clinker y lograr con ello las mejores características de calidad.

### **1.1.9 Molienda de cemento**

El cemento se obtiene por la molienda conjunta del clinker con un retardador del fraguado (yeso o anhidrita natural), en algunas ocasiones se adicionan otros

materiales dependiendo de las características físico-químicas que se desean obtener, estos materiales pueden ser: caliza, puzolana, escoria de alto horno, entre otros. El objetivo de la molienda es conseguir la superficie específica del cemento (finura), para obtener una reactividad apropiada del mismo, teniendo en cuenta la distribución granulométrica establecida.

### **1.1.10 Almacenamiento del cemento y despacho**

El cemento que sale de los molinos ya listo para su utilización se transporta a silos en los cuales no debe experimentar cambios durante su almacenamiento, en vista de ello, el cemento debe ensilarse a temperaturas lo mas bajas posible.

Se dispone de cuatro silos en concreto, con capacidad de 3000 ton. c/u y dos tolvas metálicas con capacidad de 400 ton. c/u, todas ellas de descarga central.

CEMENTOS PAZ DEL RIO S.A. cuenta con una empacadora rotatoria con capacidad para llenar 3000 sacos por hora, garantizando el peso exacto por unidad. Además cuenta con una paletizadora que dispone los sacos de cemento sobre estibas de madera o hojas plásticas, con 7-8-10 tendidos de 5 bolsas cada uno para despachos en unidades múltiplos de 1.75, 2, 2.5 toneladas. Actualmente es ofrecido en CPR, cemento empacado Tipo 1 o normal (despachado en sacos de 25 y 50 Kg) y Tipo 1M o mejorado (despachado en sacos de 42.5 Kg).

## **1.2 MARCO TEORICO**

El efecto de la aglomeración es un fenómeno relativamente común en los cementos ensacados o almacenados en silos, es por eso que diversas hipótesis han sido planteadas para explicarlo, entre ellas se destaca la prehidratación como el aspecto más relevante, razón por la cual el presente trabajo dedica gran parte de su desarrollo a este mecanismo en particular.

A continuación se describen los diferentes mecanismos que pueden dar origen al aterronamiento prematuro o formación de grumos en el cemento almacenado en silos o ensacado.

### **1.2.1 Prehidratación del cemento**

El proceso de prehidratación del cemento está relacionado con la hidratación parcial del aluminato tricalcico (C3A) y su reacción con los sulfatos alcalinos (langbeinita ( $K_2Ca_2(SO_4)_3$ ). y arcanita ( $K_2SO_4$ )) del clinker y el yeso del cemento.

Los principales productos de esta reacción son: aluminato de calcio hidratado ( $C_4AH_{13}$ ) y pequeños cristales aciculares y prismáticos de etringita ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ) y syngenita ( $K_2SO_4 \cdot CaSO_4 \cdot H_2O$ ) formados en la superficie de los granos de cemento, con una textura entrelazada que favorece la cohesión entre las partículas y el origen de los grumos. Este mecanismo ocurre con mayor intensidad, en la medida en que aumenta el contenido de C3A y álcalis.

El fenómeno de prehidratación se manifiesta en el cemento especialmente a través de la disminución en las resistencias mecánicas y el alargamiento de los tiempos de fraguado. La influencia en las resistencias mecánicas a edades tempranas puede en muchos casos representar una disminución del 30%, dependiendo de la intensidad del fenómeno.

El alargamiento de los tiempos de fraguado se atribuye a que la cinética de reacción de los cristales prehidratados del C3A con el yeso es más lenta, dado que la hidratación que ocurre en la superficie de los cristales de C3A, interfiere en la capacidad de reacción con el yeso.

Las reacciones de prehidratación pueden ocurrir durante los procesos de molienda, almacenamiento y/o transporte. El agua necesaria para esas reacciones puede ser originada de la deshidratación del yeso, durante la molienda o el almacenamiento del cemento o estar presente en el aire, en condiciones de humedad alta (>75%), también puede proceder del agua de refrigeración del molino.

### **1.2.1.1 Deshidratación del yeso**

La deshidratación del yeso es un fenómeno que se origina durante el proceso de molienda (A temperaturas por encima de los 70 °C) y puede proseguir dentro de los silos de almacenamiento si se tiene en cuenta la baja transferencia de calor hacia el exterior. No obstante, el proceso de deshidratación no solo depende de la temperatura de molienda del cemento, sino también de la naturaleza del yeso y el tiempo de exposición a cierta temperatura, por lo cual en la práctica no existe una temperatura debajo de la cual comienza la deshidratación. Por ello es más conveniente representar la deshidratación del yeso como una función de la temperatura y del tiempo de exposición. (Diagrama de deshidratación del yeso ver **Anexo B**)

A la salida del molino el yeso está parcialmente deshidratado, una deshidratación posterior en el silo depende de la temperatura de almacenamiento del cemento.

Es esta la razón por la que el grado de deshidratación del yeso es normalmente desconocido.

#### **1.2.1.1.1 Deshidratación del yeso en molienda del cemento**

En la molienda de cemento se genera calor, subiendo a veces la temperatura por encima de los 120°C. El contenido de agua del yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) se desprende lentamente a partir de unos 40 a 45°C, y rápidamente a 80°, provocando la deshidratación parcial (o total por encima de 110°C) del yeso, el cual se transforma en hemihidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) o en anhidrita III ( $\text{CaSO}_4$ ).

Un factor de menor importancia, pero que influye en la deshidratación del yeso, es el contenido de vapor de agua en la atmósfera del molino. Por tanto es importante conocer la estabilidad del yeso en función de la temperatura y de la tensión de vapor de agua. La temperatura del cemento durante la molienda se halla en el intervalo de 40-130 °C.

Humedades relativas aproximadas para prevenir la disociación del  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

<b>°C</b>	<b>HUMEADAD RELATIVA (%)</b>	
24	35	Los datos presentados, permiten identificar que la humedad relativa de la atmósfera en el molino deberá exceder el 50% para prevenir la descomposición del yeso. Aunque se produce la deshidratación durante la molienda, su velocidad es suficientemente baja como para permitir que los cementos puedan molerse a 93 °C sin deshidratación importante del yeso, siempre y cuando que se mantenga un enfriamiento adecuado del cemento.
38	45	
52	55	
66	65	
79	80	
93	95	
100	100	
121	2.5 atm de presión de vapor de agua	

#### **1.2.1.1.2 Deshidratación del yeso en el ensilado**

El cemento que sale del molino ya listo para su utilización, se transporta a silos en los cuales no debe experimentar cambios subsiguientes durante su ensilado.

Para asegurar la estabilidad del cemento durante su almacenamiento se requiere una temperatura baja y un tiempo de almacenamiento suficientemente corto, para prevenir la deshidratación del yeso. La cantidad de agua en el silo puede limitarse mediante un contenido menor de yeso en el cemento o por sustitución del mismo por anhidrita.

La temperatura del cemento en el silo puede reducirse mediante la instalación de un enfriador del cemento durante la molienda. A temperaturas de 50-60°C la deshidratación del yeso es escasa al cabo de 28 días de ensilado, sin embargo, a 80-90°C es muy considerable o total. Incluso a temperaturas de solo 40°C y para tiempos de ensilado de 28 o más días se puede observar ya un comienzo de deshidratación del yeso.

El agua que se desprende de la deshidratación (así como también de la humedad del aire o de otros orígenes) reacciona en las zonas frías de los silos con el cemento, y en particular con el C3A. Se forma pequeños cristales aciculares y prismáticos de etringita y syngenita y también aluminato hidratado laminar.

Estas nuevas formaciones cristalinas pueden producir una consolidación (con formación de grumos o terrones en el cemento). Dado que en estos procesos de aterronamiento toman parte principal el C3A y los sulfatos alcalinos (junto con la humedad de la deshidratación del yeso y de otras procedencias) los cementos ricos en estos compuestos son los más sensibles a ellos.

La absorción de agua por parte del cemento (sobre todo por los cementos ricos en C3A) da lugar también a retrasos de fraguado (a causa de la disminución de la reactividad del C3A), como a pérdidas de resistencia en relación con la cantidad de agua absorbida (por una hidratación prematura del silicato tricálcico (C3S)).

### **1.2.1.2 Inyección de agua en la molienda de cemento**

La inyección de agua es frecuentemente usada para reducir la temperatura del cemento dentro del molino y así evitar la deshidratación del yeso. En consecuencia los minerales del clinker, en especial el C3A, reaccionan con el vapor de agua provocando la formación de grumos en los silos de cemento, alterando así las propiedades del cemento.

El clinker con un alto contenido de C3A y clinker rico en álcalis es más sensible a la inyección de agua (pérdida de resistencia y fraguado rápido del cemento). En este caso, el cemento debe ser enfriado por medio de enfriamiento externo.

El efecto del vapor de agua sobre las propiedades del cemento depende de su composición química y de su finura. Normalmente los cementos con poco aluminato y álcalis y una finura inferior a 4000 cm<sup>2</sup>/g son poco afectados, su potencial para desarrollar resistencias no cambia.

Al contrario, cementos con mucho aluminato (por encima de 10%), mucho álcalis (1.0 % K<sub>2</sub>O) y una alta finura absorben hasta 1.5 % del agua, resultando en

menores resistencias a 2, 7 y 28 días. El tiempo de fraguado también se ve afectado, especialmente cuando la relación álcali/SO<sub>3</sub> esta por encima de 1,0.

### 1.2.2 Efectos de la finura del cemento

La finura y la energía electrostática superficial son características físicas inherentes de las partículas de cemento Pórtland. Evidentemente una mayor finura del cemento aportará mayor superficie de reacción, favoreciendo el apelmazamiento de éste, desde este punto de vista es recomendable la molienda gruesa.

Algunos autores aseguran que, por lo contrario, un menor tamaño de poros entre las partículas (aumento de la finura del cemento) disminuye la sensibilidad del cemento frente a las condiciones del ensilado. Se explica esto al entender que el radio medio de los poros entre partículas es menor para un cemento fino dificultando la penetración de vapor de agua dentro de los silos.

### 1.2.3 Efectos del empaque

El saco de cemento constituye una unidad adecuada para manipular en obras pequeñas. Es muy importante la cualidad protectora del material de la bolsa: el papel, preferido por su economía.

El papel debe tener una permeabilidad que permita el rápido desalojo del aire de llenado y al mismo tiempo impida la infiltración de aire húmedo al interior del saco. Dadas las dificultades para satisfacer simultáneamente estos requerimientos, la industria ha virado a la utilización del despacho en sacos con capa plástica intermedia. Ultimamente se ha venido experimentando con sacos de tres capas de 70 gramos (papel Cuplak) y protección de polietileno con similar resistencia a una bolsa de 4 capas de papel Kraft de 110 gramos/cm<sup>2</sup>.

Pese a los requisitos de impermeabilidad que debe cumplir, el papel es susceptible a absorber humedad del ambiente. Cuando el almacenamiento ocurre en forma inapropiada y en bodegas mal protegidas, la cualidad protectora del material puede ser insuficiente, en cuyo caso la humedad del aire afectar las propiedades del cemento aun en cortos periodos de almacenamiento.

El cemento estará en contacto con la atmósfera circulante a través de la bolsa de papel, aumentando la posibilidad de su prehidratación.

Este fenómeno de hidratación es llamado normalmente “**Fraguado de bolsa (bag set)**”, este fraguado se caracteriza por la presencia de grumos en el cemento almacenado bajo condiciones de humedad, la causa es la reacción química entre

el cemento y la humedad presente en el aire. Aumentando el contenido de pérdidas al fuego que varía en intensidad de acuerdo a la humedad del aire. El fraguado de bolsa como grumos puede interrumpirse, cuando aún se encuentra en estado flojo, ocurriendo de nuevo solamente en el mismo material bajo una exposición similar

La rotación del empaque tiene un papel muy importante en las características del cemento almacenado, esto se debe al contenido de humedad que presenta el empaque fresco, facilitando la conducción de agua desde el ambiente hasta el interior de los sacos.

#### **1.2.4 Condiciones de almacenamiento del clinker**

La reacción de hidratación se lleva a cabo, en menor medida, durante el almacenamiento del clinker, durante la molienda del clinker con yeso y durante el almacenamiento del cemento. Inclusive esta hidratación de superficie reducida puede causar cambios importantes en las características físicas del cemento.

Una hidratación a gran escala y cambios substanciales en las características físicas del cemento se llevan a cabo durante la reacción del cemento con agua en la mezcla del hormigón.

	<b>Porcentaje de Hidratación</b>
Almacenamiento del clinker	0 – 10 %
Molienda del cemento	0 – 1 %
Almacenamiento del cemento	0 – 4 %
Mezcla de hormigón	0 – 100 %

Durante el almacenamiento, se inicia la meteorización del clinker, bajo la influencia de la atmósfera con la hidratación de CaO libre en  $\text{Ca(OH)}_2$ , combinada con un aumento de volumen y la formación de grietas en los granos de clinker. Pero inclusive bajo condiciones de almacenamiento en silos, se ha comprobado que el clinker almacenado tiene una actividad hidráulica residual con un efecto lento de recocción en los minerales de clinker (las estructuras deficientes de las redes cristalinas se curan lentamente).

Durante la molienda, el clinker profundamente meteorizado se comporta de una manera muy distinta al clinker fresco, la parte hidratada forma durante la molienda rápidamente una gran cantidad de finos reduciendo así la aptitud a la molienda. Este aumento de la superficie específica proviene de los productos hidratados del clinker que se caracteriza por su gran superficie. Como consecuencia, el cemento

que se da como resultado, aunque parezca demasiado fino, consiste en realidad de partículas finas de clinker hidratado y de granos bastante gruesos de clinker. La experiencia demuestra que el clinker después de periodos de almacenamiento al aire libre, tienen características de molienda desfavorables comparadas con clinker fresco.

Bajo condiciones altamente desfavorables, el clinker puede, como consecuencia de la hidratación, compactarse fuertemente presentando problemas de manejo, así como problemas de formación de costras en el molino de cemento, atascamientos, incrustaciones, etc. Otros efectos significativos indican un aumento considerable de las pérdidas al fuego, un incremento en el contenido de cal libre como  $\text{Ca(OH)}_2$  y una disminución en la resistencia a la compresión a edades temprana, esta es una manera de medir el grado de deterioro del clinker debido a la exposición a intemperie.

### **1.2.5 Presencia de componentes secundarios**

La presencia de álcalis y  $\text{SO}_3$  en cantidades significativas en las materias primas y en los combustibles, puede generar un clinker con desenvolvimiento de sulfatos alcalinos como lo son: arcanita ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) y langbenita ( $\text{K}_2\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_3$ ). Estos minerales se hidrataran con el agua (proveniente de alguno de los medios anteriormente mencionados), generando cristales aciculares de syngenita, que culminaran con la generación de grumos en el cemento.

Se ha observado que cementos con algún contenido de cal libre se protegen mejor contra la formación de grumos. Así como un incremento en cantidad de potasio los hace más propensos a la presencia de estos. No obstante lo anterior, en todos ellos se requiere el factor agua. Algunos cementos forman grumos con mayor rapidez que otros debido a diferencias de composición química, finura y actividad superficial.

La formación de grumos durante el almacenamiento se atribuye al desarrollo de un compuesto alcalino: syngenita ( $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), en forma de agujas alargadas que vienen a construir la trama necesaria para la agrupación de las partículas de cemento y el origen de los grumos, su formación tan solo requiere de una mínima cantidad de agua. La formación recibida de diferentes productores de cemento indican una marcada formación de syngenita cuando se tienen unos niveles superiores al 12% de C3A y 1 % de  $\text{K}_2\text{O}$  en el clinker Pórtland y enfriamiento interno con agua en la molienda del cemento.

Es claro que la presencia alcalina confiere a los silicatos y aluminatos del clinker una mayor sensibilidad para reaccionar con el agua.

La reactividad del aluminato esta íntimamente ligada a la forma en que los álcalis se encuentran en el clinker. Estos pueden estar presentes como sulfatos, que cristalizan inmediatamente de la fase líquida, o estar incorporados en la estructura del C3A. Como resultado, tanto la cristalización como la reactividad del aluminato con el agua son alteradas. Investigaciones recientes con cementos hechos con clinker industriales, mostraron que la reactividad del C3A disminuye en la medida que el contenido alcalino decrece por la formación de los respectivos sulfatos, la cantidad de azufre suministrada al horno con las materias primas y el combustible gobierna la naturaleza de la incorporación de los álcalis en el clinker y en consecuencia también regula las propiedades del cemento como: plasticidad, fraguado y desarrollo de resistencias.

La incorporación de yeso (aportante regulador del fraguado) debe manejarse de acuerdo a la reactividad del C3A, se trata de establecer un balance adecuado de anhídrita natural, dihidrato, hemihidrato y/o anhídrita de molienda que disponga la cantidad justa de sulfatos en la solución cementante que pueda reaccionar con los productos de la hidratación del C3A para formar etringita solamente.

### 1.3 ANTECEDENTES

El fenómeno del endurecimiento del cemento empacado, con formación de grumos, es un problema frecuente en las plantas que producen y comercializan cemento en sacos de papel. CPR no ha sido ajeno a el, y la repetición del fenómeno ha obligado a adelantar una serie de estudios tendientes a definir las causas y establecer las correcciones necesarias para evitar con ello los reclamos de los clientes, el deterioro de la imagen del producto y los sobrecostos por reproceso.

Los factores analizados y los avances logrados se condensan en el análisis modal de efecto y falla AMEF, que se puede observaren el **Anexo C**.

Como resultado de los diferentes ensayos, es valido mencionar:

- La ganancia de humedad con respecto a la muestra inicial puso en evidencia la presencia de una fuente de agua en contacto con el cemento, en este caso se trata de la humedad del medio ambiente, pues las contramuestras de los cementos ensayados, guardadas herméticamente en el laboratorio, permanecieron inalteradas mientras que los sacos almacenados en la bodega presentaron grumos, esto permitió deducir inicialmente que es la influencia de la humedad del ambiente la que origina el aterronamiento del cemento.

- De acuerdo con las características físicas, el mayor superficie específica (Blaine) y la menor finura en el cemento Ganacem lo hicieron más susceptible a la formación de grumos por una mayor superficie reactiva,
- La composición química no muestra valores altos de álcalis. (E.A. tipo 1 = 0.51 E.A. Ganacem = 0.49. valores normales), es decir que es poco probable la formación de Syngenita.
- El cemento ensacado en empaque con igual gramaje en sus capas (80/80, 90/90) mostró mayor aptitud a la formación de grumos.
- En cuanto a la química y mineralogía del cemento, es poco probable que la alteración del yeso durante la molienda y los contenidos de  $C_3A$  y  $K_2SO_4$  sean factores que estén contribuyendo con la hidratación prematura del cemento, este es un tema complejo que requiere de análisis especializados, sin embargo los resultados observados han permitido descartar la parte química, es más factible que las características físicas de finura y distribución granulométrica tengan una mayor influencia en la formación de grumos.

En el **Anexo D**, se presenta las estadísticas de las quejas y reclamos, ocasionadas por la presencia de grumos en el cemento.

## **2. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

Para evaluar el fenómeno de formación de grumos en los cementos ensacados tipo 1 y tipo 1M de CPR, se programaron diferentes ensayos tendientes a determinar si dicho fenómeno está asociado con la hidratación del cemento.

Inicialmente se optó por analizar el grado de alteración de tres muestras de cemento a diferentes tiempos de almacenamiento en la bodega de la planta y bajo condiciones ambientales diferentes; previa caracterización físico-química del material de partida.

Posteriormente se efectuaron estudios difractométricos (DRX) a las muestras que presentaron aterronamiento, con el fin de identificar la existencia de minerales producto de las reacciones de hidratación del cemento.

También se tuvieron en cuenta otros factores que favorecen la formación de grumos, tales como: la naturaleza del yeso, reactividad del clinker, características del empaque, distribución granulométrica del cemento, condiciones ambientales durante el almacenamiento.

La información correspondiente a los resultados de los diferentes ensayos y análisis, ha sido procesada en las diferentes tablas teniendo en cuenta la secuencia del método experimental.

### **2.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL MATERIAL DE PARTIDA.**

Se realizaron análisis químicos y físicos completos, incluyendo humedad y pérdidas por calcinación al material de partida (muestras 1,2 y 3).

Las muestras fueron analizadas por espectrometría de Rayos X para la determinación de la composición química. Las propiedades físicas se realizaron tomando como referencia la norma técnica colombiana NTC 121.

### **2.2. ANÁLISIS DE ALTERACIÓN DEL CEMENTO ALMACENADO**

Se considera que hay presencia real de grumos en el cemento, cuando éstos no se deshacen fácilmente con la presión manual o con el movimiento del saco que los contiene. Obviamente esta definición aplica en los siguientes casos:

- Cuando el tiempo de almacenamiento no ha sido superior a 60 días desde el momento en que se ensacó el cemento en la planta.
- Siempre y cuando no haya evidencia de humedad en el empaque.
- Existan buenas condiciones de almacenamiento y transporte.

Teniendo en cuenta estas condiciones, se ha optado por determinar el contenido de grumos en el cemento, midiendo el retenido en la malla ASTM. 16 (1.18 mm).

Habiendo definido el concepto del fenómeno de formación de grumos, se tomaron tres muestras de cemento (ver tabla 1); las cuales se almacenaron por un periodo de 45 días bajo dos condiciones de almacenamiento diferentes (la primera es la condición a la cual se esta almacenando el cemento actualmente, y la segunda es una condición extrema, cargue del cemento a los trenes).

El grado de alteración del cemento con formación de grumos se midió a edades de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 y 45 días.

**TABLA 1. Identificación de las muestras utilizadas para el estudio de grumos**

MUESTRA	TIPO DE CEMENTO Y EMPAQUE
1	Tipo 1, 50 Kg
2	Tipo 1, 25 Kg
3	Tipo 1M, 42.5 Kg

### 2.3. DIFRACTOMETRIA DE RAYOS X (DRX)

La difracción de rayos x, se ha empleado para caracterizar mineralógicamente las muestras de cemento que presentaron grumos y para determinar la existencia de aquellos minerales que se forman por la hidratación del cemento.

Para esta evaluación se usó un difractómetro RIGAKU modelo MINIFLEX, con una lámpara de cobre de longitud de onda de 1.548 Å, las muestras se analizaron con una velocidad de barrido de 2°/minuto hasta 60°.

## **2.4. NATURALEZA DEL YESO.**

Para este análisis en especial se tomaron cuatro muestras de yeso provenientes de la Mesa de los Santos (Santander), con diferente contenido de  $\text{SO}_3$  y se analizaron por petrografía con un microscopio óptico en el laboratorio petrográfico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

El análisis petrográfico nos permite gracias a la microscopía óptica, caracterizar los materiales y con esto conocer la influencia que tiene sobre el producto final.

## **2.5. REACTIVIDAD DEL CLINKER.**

Uno de los responsables, sino el mayor responsable de las propiedades del cemento es el clinker o mas bien su reactividad, es por eso que se hace necesario en este trabajo, identificar el tipo de clinker con el que estamos trabajando.

La microscopía óptica, permite visualizar la historia térmica del clinker: las condiciones de cocción (tiempo y temperatura) y el enfriamiento dentro del horno, en función del desarrollo cristalino y estabilidad de los silicatos, y las condiciones del enfriamiento que se realiza en el enfriador en función del grado de cristalización de la fase intersticial.

Para este análisis en especial, se han analizado microscópicamente dos muestras del Clinker de CPR, en un microscopio óptico de luz transmitida y reflejada, de marca OLIMPUS B-200 (laboratorio de control de calidad de CPR).

## **2.6. EMPAQUE**

Es muy importante la calidad protectora del saco de papel, este debe cumplir condiciones de resistencia, impermeabilidad y homogeneidad. El papel debe tener una permeabilidad que permita el rápido desalojo del aire de llenado y al mismo tiempo obstaculice la infiltración de aire húmedo al interior del saco.

Pese a los requisitos de impermeabilidad que debe cumplir, el papel es susceptible de absorber humedad ambiental, en especial si es almacenado en bodegas mal protegidas y bajo condiciones inadecuadas de almacenamiento, en cuyo caso la humedad del aire afectará las propiedades del cemento aun en cortos periodos de almacenamiento.

Con el fin de saber si el empaque que actualmente se está utilizando en Cementos Paz del Río cuenta con las características adecuadas de un empaque que evite el deterioro del producto, se protegió un saco de cada muestra con plástico, y se almacenó bajo las mismas condiciones de almacenamiento durante un periodo de 45 días. Posteriormente se abrió el saco y se le realizaron los mismos ensayos de aterronamiento.

## **2.7. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL CEMENTO**

Dada la importancia que tiene el tamaño de partícula en la velocidad de reacción, se ha dado gran relevancia al análisis granulométrico (distribución de partículas), el cual se ha realizado en un difractor láser marca CILAS.

## **2.8. CONDICIONES AMBIENTALES DE ALMACENAMIENTO**

Las condiciones ambientales de almacenamiento a las que estuvieron sometidas las muestras, han sido registradas en los gráficos de seguimiento, obtenidos de termo-higrómetros (OAKTON LoggerPlus), instalados en la bodega de la planta, en los puntos en los cuales se ubicó el cemento a analizar.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 3.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL MATERIAL DE PARTIDA.

Los resultados de los análisis del material de partida, se presentan en la tabla 2 y 3, mientras que los resultados de las muestras con los diferentes tiempos de almacenamiento se presentan en el **Anexo E**.

**TABLA 2. Características químicas del material de partida.**

Tipo de cemento	CaO %	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Mg O %	SO <sub>3</sub> %	K <sub>2</sub> O %	Na <sub>2</sub> O %	H <sub>2</sub> O %	PxC %	Cal L. %
Tipo 1, 50 Kg	57.83	20.64	6.23	2.59	0.87	1.71	0.63	0.10	0.15	9.84	1.04
Tipo 1, 25 Kg	57.95	20.55	6.15	2.63	0.89	1.79	0.65	0.10	0.16	9.61	1.06
Tipo 1M	60.13	20.61	6.10	2.93	1.02	1.88	0.72	0.14	0.18	3.13	1.168

**TABLA 3. Características físicas del material de partida**

Tipo de Cemento	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Retenido 45 μm %	Resistencia a la compresión (kgf/cm <sup>2</sup> )				Fraguado (min)	
			1 día	3 días	7 días	28 días	Inicial	Final
Tipo 1, 50 Kg	3940	10.07	104	211	264	356	167	255
Tipo 1, 25 Kg	4101	11.10	101	210	261	354	168	253
Tipo 1M	4140	2.38	180	296	380	470		

Comparando las características químicas del material de partida con las muestras almacenadas por prolongados periodos de tiempo, no se observa una variedad considerable en su composición, portal motivo este análisis no nos permite identificar un factor que contribuya al fenómeno de formación de grumos en el cemento.

### 3.2. DETERMINACION DE LA PRESENCIA DE GRUMOS A DIFERENTES TIEMPOS DE ALMACENAMIENTO

A continuación se presenta el registro de la alteración del cemento almacenado por diferentes periodos de tiempo y bajo condiciones ambientales diferentes, en las tablas 4 y 5 se presenta el retenido en malla 16 (18.8 mm).

**TABLA 4 Contenido de grumos a condiciones normales de almacenamiento (C.N.).**

TIPO DE CEMENTO	TIEMPO DE ALMACENAMIENTO								
	5 días	10 días	15 días	20 días	25 días	30 días	35 días	40 días	45 días
TIPO 1	0.0%	0.04 %	1.21 %	1.37 %	5.39 %	3.06 %	2.64 %	3.36 %	3.46 %
TIPO 1 M	0.0 %	4.91 %	8.87 %	13.09 %	19.75 %	21.87 %	25.54 %	28.9 5 %	----

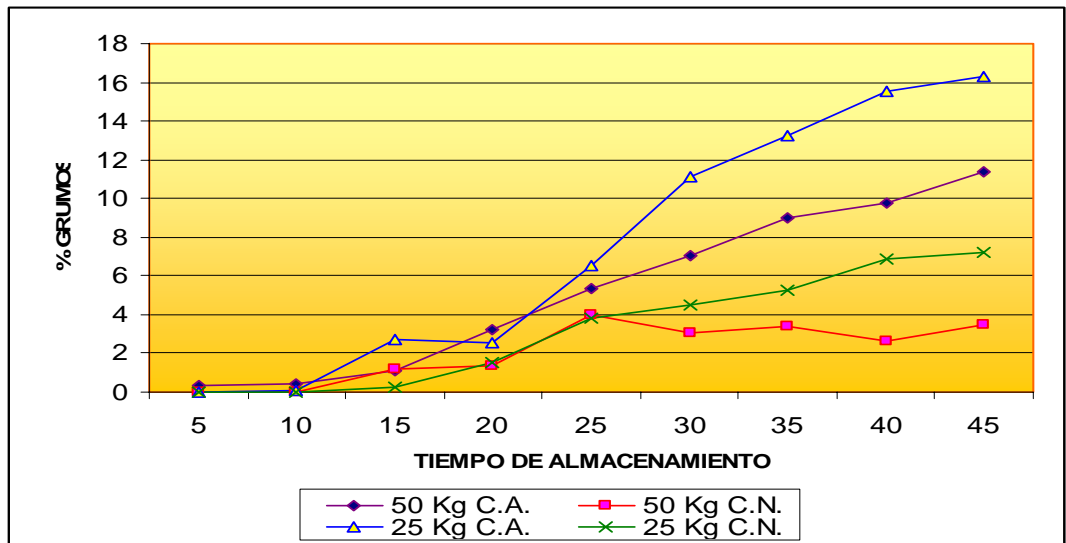
**TABLA 5. Contenido de grumos a condiciones ambientales agresivas (C.A.)**

TIPO DE CEMENTO	TIEMPO DE ALMACENAMIENTO								
	5 días	10 días	15 días	20 días	25 días	30 días	35 días	40 días	45 días
TIPO 1	0.35 %	0.44 %	2.73 %	6.50 %	8.23 %	11.10 %	13.25 %	15.5 0 %	13.74 %
TIPO 1 M	4.91 %	15.4 7 %	20.27 %	24.38 %	26.89 %	28.01 %	29.21 %	32.2 6 %	----

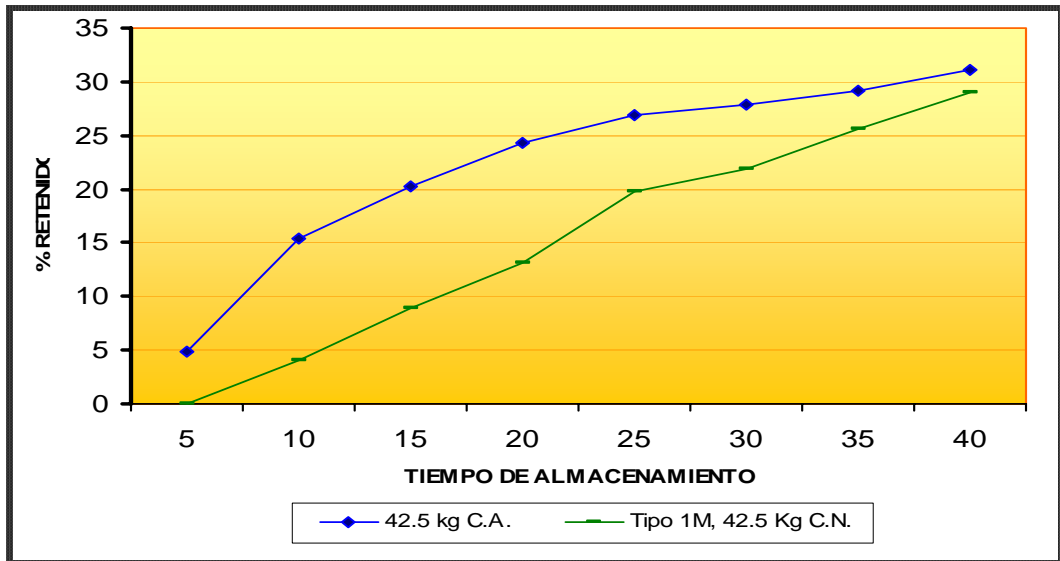
De los resultados obtenidos del análisis de alteración del cemento, podemos concluir que el cemento con mayor superficie específica y menor retenido en 45 micras presenta mayor susceptibilidad a la formación de grumos.

Las tablas anteriores permiten deducir que el cemento expuesto a condiciones agresivas de almacenamiento, es más susceptible a la formación de grumos. Esta apreciación se evidencia mejor en los gráficos 1, 2 y 3.

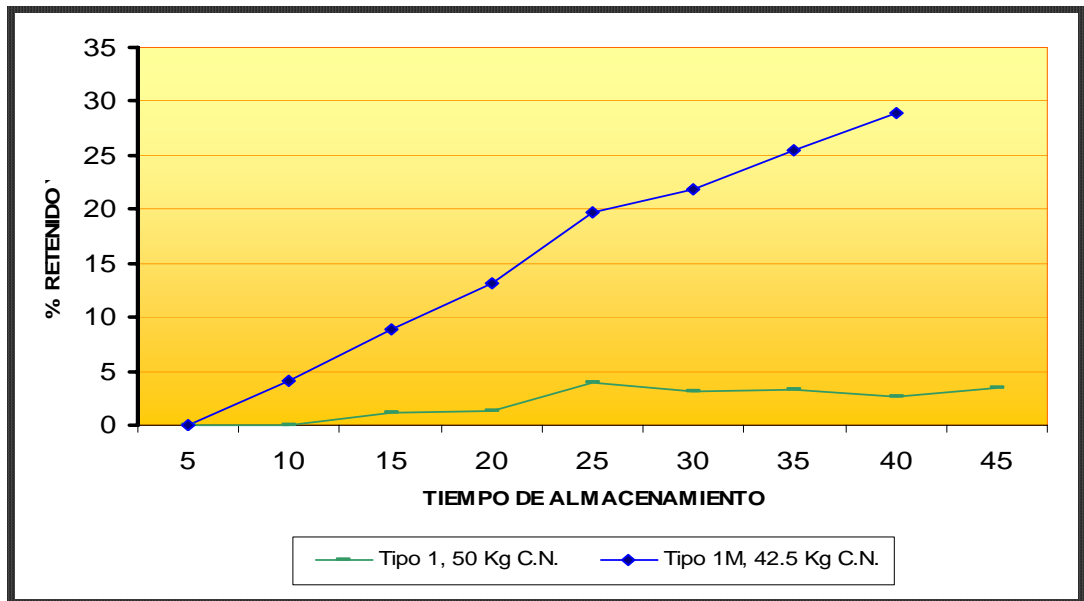
**FIGURA 1. Contenido de Grumos vs Tiempo de almacenamiento (cemento Tipo 1)**



**FIGURA 2. Contenido de Grumos vs tiempo de almacenamiento (cemento tipo 1M)**

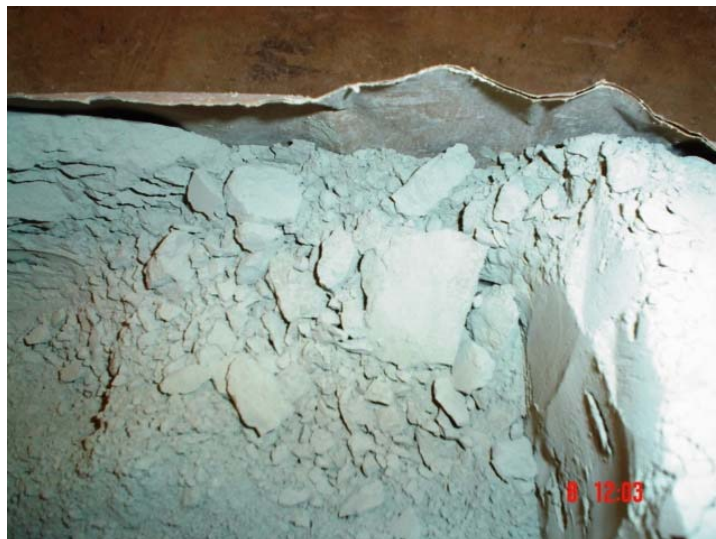


**FIGURA 3. Contenido de Grumos vs tiempo de almacenamiento (cemento tipo 1 y tipo 1M), bajo condiciones normales de almacenamiento.**



La figura 4, permite observar el grado de alteración del cemento almacenado por un periodo de 20 días, bajo condiciones normales de almacenamiento. En el **Anexo F.**, se presenta el registro completo de las fotografías del cemento aterronado.

**FIGURA 4. Resultado fotográfico del cemento aterronado**



Complementariamente se ha evaluado el efecto de la presencia de grumos sobre las resistencias mecánicas del cemento, los resultados se presentan en las tablas 6 y 7.

**TABLA 6. Ensayos físicos realizados a cemento expuestos a condiciones normales.**

Tipo de cemento	Resistencia a la compresión (kgf/cm <sup>2</sup> )				Fraguado (min)	
	1 día	3 días	7 días	28 días	Inicial	Final
Cemento Tipo 1 Referencia	104	211	264	356	167	255
Cemento Tipo 1 con 35 días de almacenamiento	94	201	266	356	168	240
Cemento Tipo 1 con 45 días de almacenamiento	87	189	260	353	170	240

**TABLA 7. Ensayos físicos de cemento expuestos a condiciones ambientales agresivas.**

Tipo de cemento	Resistencia a la compresión (kgf/cm <sup>2</sup> )				Fraguado (min)	
	1 día	3 días	7 días	28 días	Inicial	Final
Cemento Tipo 1 Referencia	104	211	264	356	167	255
Cemento Tipo 1 con 35 días de almacenamiento	89	197	258	348	169	240
Cemento Tipo 1 con 45 días de almacenamiento	82	189	255	348	187	270

La formación de grumos trae como consecuencia un descenso importante en las resistencias del cemento a edades tempranas.

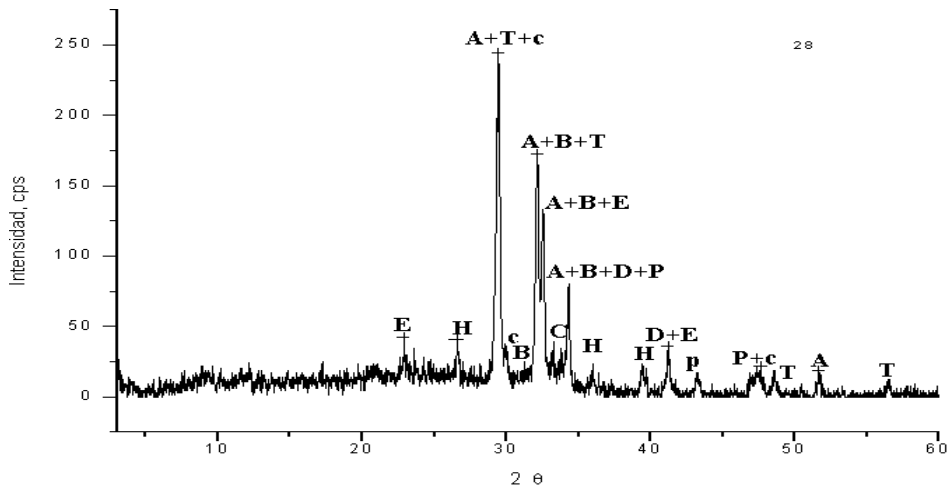
Observando un descenso entre 15 y 22 % en las resistencias a 1 día y entre 7 y 11 % a 3 días, en los cementos expuestos a condiciones ambientales agresivas. Para el caso del cemento almacenado a condiciones normales, el descenso en las resistencias es del orden de 10 a 16 % a un día y del orden de 5 a 11 % a 3 días.

### 3.3. DIFRACTOMETRIA DE RAYOS X (DRX)

El difractograma presentado en la figura 5, muestra los diferentes minerales presentes en el cemento Tipo 1 (muestra de partida) de Cementos Paz del Río,

producto de la reacción de hidratación del cemento. Los picos presentes en el difractograma son: **E**: Ettringita, **H**: Hydrogarnet, **A**: Alita, **T**: Tobermorita, **c**: Calcita, **B**: Belita, **C**: Celita, **D**: Felita, **P**: Portlandita, **p**: periclasa

**FIGURA 5. Difractograma del cemento tipo 1 de referencia.**



Los difractogramas de las demás muestras se presentan en el **Anexo G**.

El análisis de los difractogramas permite deducir lo siguiente:

- Las fases mineralógicas anhidras más abundantes son: alita, belita y calcita, mientras que las fases hidratadas son a su vez tobermorita, ettringita, portlandita e hydrogarnet.
- La muestra de referencia (material de partida), presenta alita como fase mineralógica más abundante; acompañada de algunas fases hidratadas como la tobermorita, portlandita y ettringita aunque en pequeña cantidad. Esta observación pone en evidencia una hidratación incipiente del cemento en las etapas previas al empaque (molienda y ensilado).
- Los cementos con mayor tiempo de almacenamiento presentaron mayor intensidad en los picos correspondientes a las fases hidratadas, al igual que las muestras expuestas a condiciones ambientales agresivas.
- Finalmente, es válido mencionar que la formación de grumos en Cementos Paz del Río, está relacionada directamente con el proceso de hidratación del cemento.

Dado que la naturaleza del yeso y la mineralogía del clinker juegan un papel decisivo en el mecanismo de formación de grumos, se optó por realizar análisis petrográficos de estos materiales.

### 3.4. NATURALEZA DEL YESO

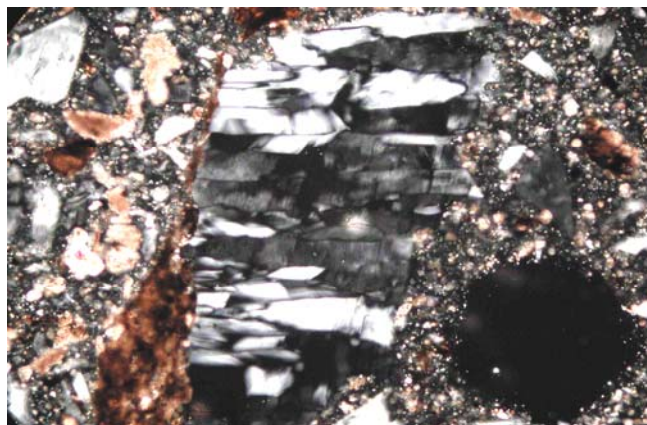
Se observa heterogeneidad en la mineralogía del material recibido en la planta, especialmente en los contenidos de yeso y anhidrita.

**TABLA 8. Naturaleza del yeso.**

COMPOSICION MINERALOGICA	MUESTRA I	MUESTRA II	MUESTRA III	MUESTRA IV
Anhidrita	2 %	3 %	35 %	60 %
Yeso	62 %	15 %	30 %	20 %
Calcita con arcilla	33 %	50 %	22 %	0
Limonita	0	0	1 %	0
Material carbonoso	3 %	32 %	12 %	20 %
Goethita y oxidos	Trazas	0	0	0
Cuarzo	Trazas	0	0	0
Contenido de S <sub>0</sub> <sub>3</sub>	28.58 %	24.48 %	33.77 %	38.69 %

La figura 6, presenta una imagen fotográfica del análisis microscópico del yeso utilizado en Cementos Paz del Río, proveniente de La Mesa de los Santos. El **anexo H**, presenta el registro fotográfico del análisis microscópico de las cuatro muestras de yeso analizadas.

**FIGURA 6. Microfotografía del yeso**



### 3.5. REACTIVIDAD DEL CLINKER

#### Mineralogía del clinker

La composición mineralógica de las muestras se determinó por el conteo microscópico de 2.000 puntos.

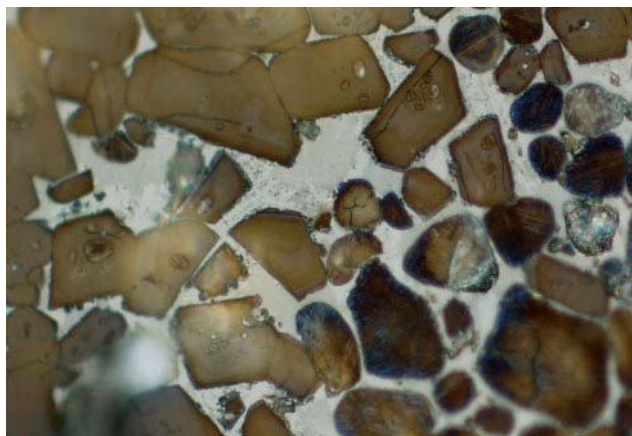
A continuación se presenta el análisis cuantitativo de las fases del clinker:

**TABLA 9. Análisis cuantitativo de las fases del clinker.**

COMPONENTES	Muestra 1	Muestra 2
	%	%
Alita	64.23	69.44
Belita	20.26	14.23
Aluminato	7.51	8.95
Ferrito	6.98	5.84
Cal libre	1.02	1.53
Periclasa	ND	ND

La figura 7, presenta una imagen microscópica del clinker de Cementos Paz del Río, en el cual se puede observar una fase intersticial con predominio del aluminato (C3A) sobre el ferrito (C4AF) con un avanzado grado de cristalización.

**FIGURA 7. Microfotografía del clinker.**



La determinación de la composición mineralógica del clinker por observación microscópica, representa la composición real y reviste gran importancia en la medida que posibilita una mejor previsión del comportamiento del producto final. En este caso se observa en la muestra 2 un contenido importante de C3A, cuya

hidratación parcial y reacción con los sulfatos alcalinos del clinker, representa la reacción más importante en el proceso de pre-hidratación del cemento. (ver composición química y cálculo potencial de fases en el **Anexo I**), (Microscópicas del clinker en el **Anexo J**).

### 3.6. EMPAQUE

La tabla10, presenta las características del empaque que actualmente se esta utilizando en Cementos Paz del Río.

**TABLA 10. Características del empaque.**

TIPO DE CEMENTO	SACO	No DE CAPAS	GRAMAJE DEL PAPEL	TIPO DE PERFORACIONES	Tipo de papel
1 Normal	50 Kg	2	80 gr/m <sup>2</sup> +/-4%	Microperforado en su totalidad	Kraft
1 Normal	25 Kg	2	82 gr/m <sup>2</sup> +/-5%	Microperforado	Kraft
SuperCem	42.5 Kg	2	80 gr/m <sup>2</sup> +/-4%	Microperforado en su totalidad	Kraft

Las características del empaque que actualmente se esta utilizando le permiten al cemento interactuar con la humedad del medio ambiente, presentando deficiencia en la calidad de papel, así lo demuestra la prehidratación del cemento almacenado en este empaque, comparado con los sacos protegidos por plástico.

### 3.7. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL CEMENTO

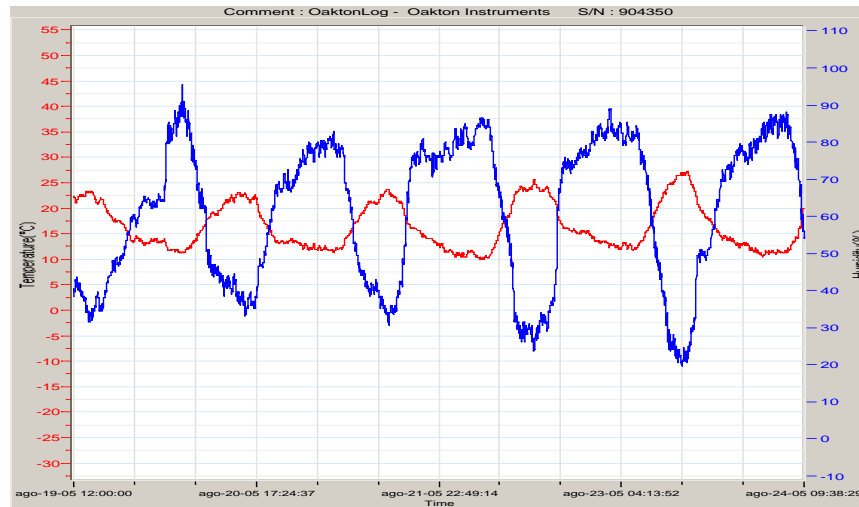
Los resultados obtenidos se presentan en el **Anexo K**.

De este análisis se puede resaltar que los cementos con mayor superficie específica (Blaine), presentan mayor sensibilidad a la formación de grumos, del mismo modo que los cementos con menor retenido en 45 micras.

### 3.8. CONDICIONES AMBIENTALES DE ALMACENAMIENTO

El equipo permite tener un registro de los datos cada segundo, en este caso en especial se tomo un registro cada minuto, arrojando los siguientes resultados: (Ver registros en el **Anexo L**)

**FIGURA 8. Registro de las condiciones ambientales agresivas a las cuales se almaceno el cemento**



Esta grafica presenta las condiciones ambientales agresivas a las cuales fue expuesto el cemento, este registro permite observar la variación de las condiciones ambientales, es valido mencionar que se registraron valores extremos de humedad (100%).

## CONCLUSIONES

- El fenómeno de formación de grumos en Cementos Paz del Rio, definitivamente está asociado con la prehidratación del cemento, así lo demuestra la presencia de minerales hidratados como Tobermorita, Portlandita, Etringita e Hidrogarnet.
- Llama la atención que la muestra de referencia (material de partida), presenta algunas fases hidratadas como la tobermorita, portlandita y etringita aunque en pequeña cantidad. Esta observación pone en evidencia una hidratación incipiente del cemento en las etapas previas al empaque (molienda y ensilado), causada por la deshidratación parcial del yeso en el molino y en el silo, seguido de la hidratación de algunas fases del cemento como el C3A.
- El tenor de C3A y el alto grado de cristalización del mismo favorecen el mecanismo de aterronamiento, pues su mayor sensibilidad para reaccionar permite la formación Hidrogarnet, así lo han demostrado los difractogramas.
- Las características del empaque como son la alta porosidad del papel y número de capas, permiten la interacción del cemento con el medio ambiente.
- Los cementos con mayor superficie específica y menor retenido en 45 micras, presentan mayor sensibilidad a la formación de grumos. En este caso específico, el cemento tipo 1M, es mas susceptible a formar grumos que el tipo 1.
- La formación de grumos trae como consecuencia un descenso importante en las resistencias del cemento a edades tempranas, este asunto es más marcado en la medida que progresa el fenómeno.

Todos estos factores pueden confluir total o parcialmente en el cemento, pero necesariamente se requiere de la presencia de un aporte externo de humedad para que el mecanismo de formación de grumos progrese.

## RECOMENDACIONES

- Se debe mejorar la calidad del empaque, pues las características del actual permiten la infiltración del aire húmedo al interior del saco. Una alternativa válida sería incrementando en uno el número de capas de papel o la utilización de empaque con una capa plástica intermedia. Existen en el mercado sin embargo, calidades de empaque diseñadas para prevenir el deterioro del producto (ver **Anexo L**).

Otra alternativa para la preservación del producto, la constituye el recubrimiento de estibas con plástico termoencogible.

También, se debe llevar un estricto control de las características del empaque. Humedad recomendada del papel y gomas del pegue debidamente curadas

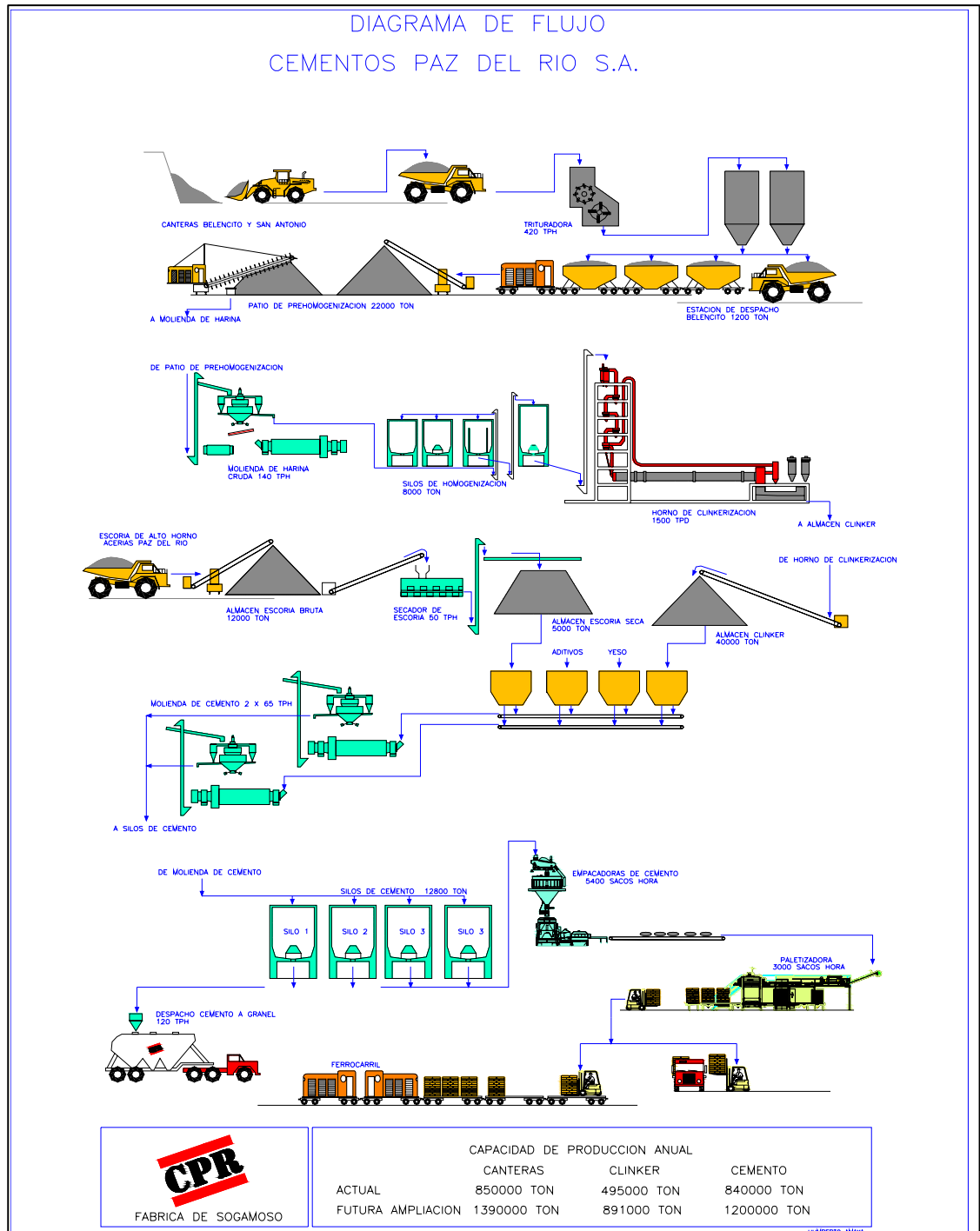
- Los parámetros de operación deben garantizar la obtención de un producto de calidad constante. Fundamentalmente se debe tener en cuenta lo siguiente:
  - La temperatura máxima del cemento a la salida del molino no debe sobrepasar los 80°C.
  - Dosificación permanente y adecuada de los materiales, en especial el yeso.
  - Mantener estricto control sobre la finura Blaine y retenido en malla 325, evitando llegar a valores fuera de las especificaciones establecidas por la división técnica.
  - El aire de transporte del molino a silos, así como el de aireación y extracción de silos debe estar exento de humedad.
- Se debe evaluar la alternativa de utilización de aditivos ayudantes de molienda, que le confieren al cemento características hidrofóbicas.
- Finalmente, se debe tener en cuenta la rotación rápida de inventarios en las bodegas, para evitar tiempos de almacenamiento excesivos.

## BIBLIOGRAFIA

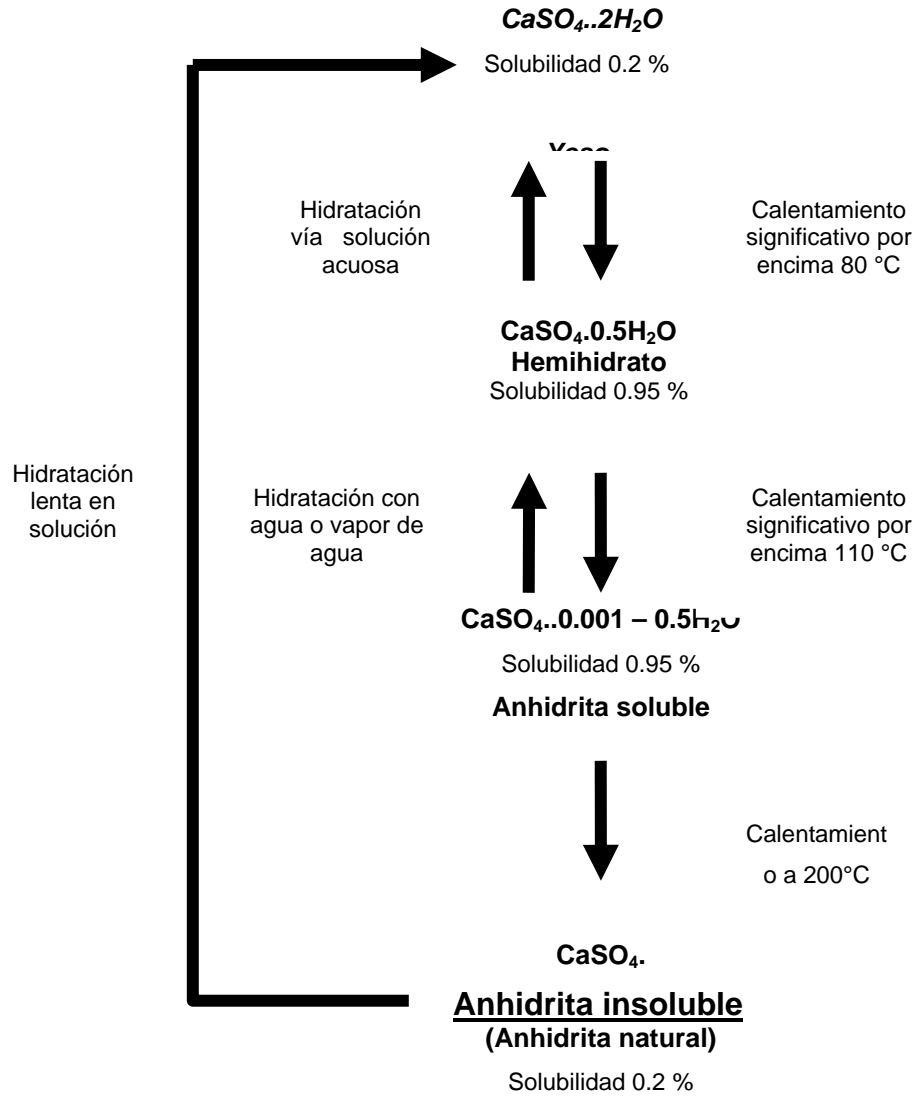
1. MEJLHEDE, O. Clinker mineral hydration at reduced relative humidities. Cement and concrete research 29. 1999.
2. CONG, Xiandong. KIRKPATRICK, Jaimes. Effects of the temperature and relative humidity on the structure of c-s-h gel. ACBM. Center and department of geology. Illinois. 1994
3. KIHARA, Yushiro y MONTEIRO, José B. Mecanismo de empelotamento em cimento Pórtland ensacado. Congresso Brasileiro de Cimento Pórtland 3. Sao Paulo. 1993. p 519-538.
4. CENTURIONE, Sérgio, MARINGOLO, Vagner y MUNHOZ, Flavio A. Identificao das causas da formacaode grumos em cimento ensacados. Congresso Brasileiro de Cimento 4, 1996 p. 187-200.
5. DREIZLER, I. Formation of lumps and accretions in cement silos and measures to prevent and eliminate these phenomena. Cologne. KHD Humboldt wedag. 1986. 32p.
6. MEJLHEDE, O. FREIESLEBEN, P. y LACHOWSKI, E. GLASSER, F. Clinker mineral hydration at reduced relative humidities. Cement and Concrete. Research. Denmark. 1999. p 1505-1512.
7. HOLDERBANK, Management and Consulting Ltad. Memorias Curso de Cimento. Volumen I y II, Melo Horizonte, brasil. 1999.
8. MARINGOLO, V.; CENTURIONE, S.L. Identification of causes of lumps formation in industrial cements. International Congress on the Chemistry of Cement, 10th. 1997. p 531-534.
9. LABAHN, Otto y KOHLHAAS, B. Prontuario del Cemnto. editores técnicos asociados s.a. Barcelona. 1985

10. DUDA, Walter. Manual técnico del cemento. Editores técnicos asociados, s.a. Barcelona. 1977
11. TAYLOR, W. La química de los cementos. Ediciones urmo. Vol.II. España 1978.
12. RODRIGUEZ, Luis. CARACTERIZACIÓN DEL CLINKER DE CEMENTOS PAZ DEL RÍO POR MICROSCOPIA. Tesis de grado. Universidad Pedagógica de Colombia. (1990)
13. MARGARIT, Adrian. Influencias de la presencia de sulfato cálcico sobre el fraguado del cemento. Monografía. Madrit. 1962.
14. OSSA, Mauricio. Influencia de la edad y del tipo de almacenamiento en los cementos chilenos. Revista del IDIEM. Vol. 13. 1974.
15. MAULTZSCH, M. GIERLOFF, M. y SCHIMMELWITZ, P. Aging of cement through long term storage. Berlin. 1985.
16. SPRUNG, S. Effect of storage conditions on the properties of cement. Dusseldorf.
17. SPRUNG, S. Einflub der lagerungsbedingungen auf die zementeigenschaften. Dusseldorf.
18. THEISEN, K., JOHANSEN, V. Prehidration and strength development of Portland cement. Ceramic Bulletin. V. 54.n. 9. pag. 787-791. 1975
19. BARAGAÑO, Juan., VILLAR Victor. CIDE. Formación de grumos en cemento Samper Colombia. Informe No. 2148. 1990.
20. REZOLA, Julian. Influencia de los diferentes tamaños granulométricos en la superficie específica Blaine y resistencias mecánicas del cemento Pórtland. Rezola.

**ANEXO A. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE FABRICACION DE CEMENTO CPR.**



## ANEXO B. DIAGRAMA DE DESHIDRATACION DEL YESO



ANEXO C. AMEF



**CEMENTOS PAZ DEL RIO S.A.**  
**PRESENTACION DE AMEF**  
53FO002

00

**PROCESO : GRUMOS**

ENTIDAD	MODO DE FALLA	CAUSA	EFEECTO	G	F	ND	NPR	ACCIONES CORRECTIVAS	RESPONSABLE	PLAZO	G	F	ND
CLINKER	Clinker de mayor Reactividad	Desbalance entre el alcali y el azufre, a favor del primero.	Grumos en el Cemento por el desarrollo de un compuesto alcalino (Syngenita)	5	3	5	75	Investigar influencia de los Alcalis respecto a otras cementeras	Renán Jaimes	10/10/2000	5	3	1
		Predominio del C3A en la fase intersticial y con un avanzado grado de cristalización como consecuencia de un enfriamiento lento	Grumos en el Cemento por una mayor sensibilidad del C3A para reaccionar.	5	3	1	15						
	Alto contenido de Cal Libre	Alta saturación en la harina.	Grumos en el cemento	5	1	3	15						
		Condiciones de proceso no adecuadas		5	1	3	15						



**CEMENTOS PAZ DEL RIO S.A.**  
**PRESENTACION DE AMEF**  
**53FO002**

**PROCESO : GRUMOS**

ENTIDAD	MODO DE FALLA	CAUSA	EFECTO	INDICADORES				ACCIONES CORRECTIVAS	RESPONSABLE	PLAZO	ESTADO		
				G	F	ND	NPR				G	F	ND
ESCORIA Y SIAL	Alto contenido de humedad	Condiciones inadecuadas de secado	Grumos en el Cemento	5	1	1	5	Investigar influencia de este material en la formación de grumos. Moliendas con diferentes contenidos de Escoria para tiempos de almacenamiento de 20, 30, 45 y 60 días.	Jairo Rueda y Renán Jaimes	27/10/2000			
	Cemento de elevada reactividad	El contenido de los álcalis y el sulfato no adecuado. (desbalance alcali azufre)		5	3	5	75						
PUZOLANA	Alto contenido de humedad	Característica inherente de la materia prima	Grumos en el Cemento	5	5	3	75	Investigar influencia de este material en la formación de grumos. Moliendas con diferentes contenidos de Puzolana para tiempos de almacenamiento de 20, 30, 45 y 60 días.	Jairo Rueda y Renán Jaimes	27/11/2000			
	Cemento de elevada reactividad	El contenido de los álcalis y el sulfato no adecuado.		5	3	5	75						
YESO	Deshidratación	Formación de Hemihidrato, compuesto que puede facilitar la reacción con K <sub>2</sub> O para formar Syngenita	Grumos en el Cemento	5	1	3	15						
		Alta temperatura en el proceso de molienda, que causa la deshidratación parcial del yeso, y este hemidrato es muy propenso a tomar agua.		5	3	1	15						
		Alta temperatura de ensilado, que continúa la deshidratación del yeso e hidratación de otras fracciones del cemento	grumos en el cemento										



**CEMENTOS PAZ DEL RIO S.A.**  
**PRESENTACION DE AMEF**  
**53FO002**

00

**PROCESO : GRUMOS**

ENTIDAD	MODO DE FALLA	CAUSA	EFECTO	PROCESO : GRUMOS				ACCIONES CORRECTIVAS	RESPONSABLE	PLAZO	INDICADORES		
				G	F	ND	NPR				G	F	ND
EMPAQUE	Humedad en el empaque	Utilización de empaque recién fabricado	Grumos en el Cemento	5	3	1	15						
	Interacción con el medio ambiente	Alta porosidad del papel		5	1	3	15	Se harán ensayos con empaque importado para ver el comportamiento.					
		Número de capas no adecuadas		5	1	1	5	Se hizo prueba con empaque lacado y la presencia de grumos es mínima. Ver Acta No. 8 de presencia de grumos					
ESTIBAS	Estibas con humedad	Mal embalaje durante el transporte	Grumos en el Cemento	5	5	3	75	Se hizo el procedimiento de "Control de Estibas 22PR021"	Jefe Empacadora	13/10/2000	5	3	3
		Madera fresca		5	1	3	15						
	Rotura del empaque	Mal estado de la estiba.		5	5	1	25						



**CEMENTOS PAZ DEL RIO S.A.**  
**PRESENTACION DE AMEF**  
53FO002

00

**PROCESO : GRUMOS**

ENTIDAD	MODO DE FALLA	CAUSA	EFECTO	G	F	ND	NPR	ACCIONES CORRECTIVAS	RESPONSABLE	PLAZO	G	F	ND
PROCESO	Alta temperatura en el proceso de molienda	Alta temperatura en el Clinker de consumo	Grumos en el Cemento	5	3	1	15						
		Cantidad de materiales no adecuado		5	1	1	5						
		Aireación dentro del molino deficiente		5	1	3	15						
	Aire de transporte hacia los silos húmedo	Mal funcionamiento de los compresores		5	1	5	25						
	Mala operación del sistema de refrigeración	Aspersión deficiente		5	3	5	75	Instalar boquillas adecuadas	Pablo Moreno	20/10/2000	5	3	3
		Cantidad de agua no suficiente		5	3	5	75	Determinar cantidad de agua necesaria	Pablo Moreno	30/09/2000	5	3	3
	Alta temperatura en el circuito	Aireación en el separador deficiente		5	1	3	15						
	Superficie específica (Blaine) no adecuada			5	1	1	5						
	El % de retenido del cemento no adecuado			5	1	1	5						



**CEMENTOS PAZ DEL RÍO S.A.**  
**PRESENTACION DE AMEF**  
53FO002

00

**PROCESO : GRUMOS**

ENTIDAD	MODO DE FALLA	CAUSA	EFECTO	EFECTOS CUANTITATIVOS				ACCIONES CORRECTIVAS	RESPONSABLE	PLAZO	EFECTOS CUALITATIVOS		
				G	F	ND	NPR				G	F	ND
ALMACENAMIENTO EN SILOS Y BODEGA, ENSACADO Y PALETIZADO	Mal estado de impermeabilización de los silos	Mantenimiento Civil deficiente	Grumos en el Cemento	5	3	5	75	Programa de impermeabilización de los Silos de almacenamiento de cemento. <b>Incluir en el programa la revision de la Bodega de Bogotá.</b>	Jefe Empacadora e Ingeniero Obras Civiles.	20/12/2000			
	Mal estado de las extracciones de los silos	Mantenimiento deficiente		5	3	1	15						
	Aire de transporte de los silos a la Empacadora: húmedo	Mal funcionamiento de los sopladores		5	3	1	15						
	Aire de fluidización de los silos: húmedo	Mal funcionamiento de los compresores		5	3	1	15						
	Mala rotacion de la bodega	No aplicación del FIFO		5	3	3	45	Programa de rotación Inventario	Jefe Empacadora	08/10/2000	5	3	1
	Mal estado de la bodega de almacenamiento	Mantenimiento Civil deficiente.		5	1	1	5						
	Tiempo excesivo de almacenamiento	Mal manejo de inventarios.		5	1	1	5						
	Excesiva altura del arrume	No aplicación de las disposiciones del procedimiento		5	3	1	15						



**CEMENTOS PAZ DEL RIO S.A.**  
**PRESENTACION DE AMEF**  
**53FO002**

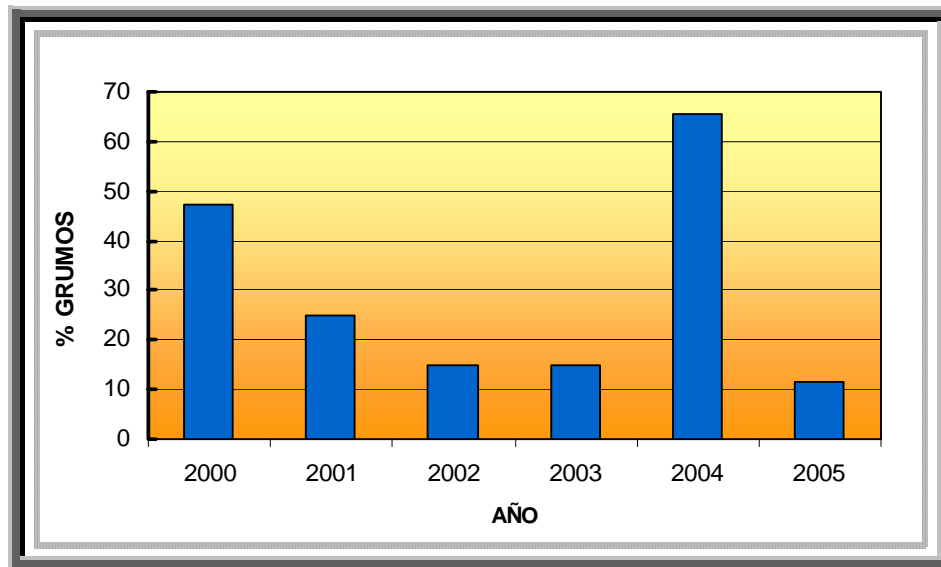
00

**PROCESO : GRUMOS**

ENTIDAD	MODO DE FALLA	CAUSA	EFECTO	PROCESO : GRUMOS				ACCIONES CORRECTIVAS	RESPONSABLE	PLAZO	INDICADORES		
				G	F	ND	NPR				G	F	ND
TRANSPORTE AL CENTRO DE SERVICIO Y/O CLIENTE	Mal estado de las carpas	Inspección no adecuada	Grumos en el Cemento	5	3	3	45	Seguimiento a estado de carpas	Jefe Empacadora y Técnico Empaque	06/10/2000	5	3	1
	Mal estado del planchon			5	3	3	45	Seguimiento a estado de planchón		06/10/2000	5	3	1
	Planchón húmedo			5	3	3	45	Revisión permanente		Permanente	5	3	1
	Vehículo mal carpado			5	3	3	45	Revisión permanente		Permanente	5	3	1
	Vehículo sin carpar (en momentos de Llovizna)			5	3	3	45	Revisión permanente		Permanente	5	3	1
CENTRO DE SERVICIO BOGOTA	Mala rotación	No aplicación del FIFO	Grumos en el Cemento	5	3	3	45	Programa de rotación Inventario	Director Logística y Auxiliar Bodega	08/10/2000	5	3	1
	Humedad adquirida en el mometo del cargue o descargue.	No hay zona de protección para el descargue de los vehículos		5	5	3	75	Válido antigua bodega. Se cambio de bodega y se carga bajo techo	Director Logística y Auxiliar Bodega	30/08/2000	5	1	1
	Mal estado de la bodega de almacenamiento	Mantenimiento Civil deficiente.		5	5	3	75		Director Logística y Auxiliar Bodega	31/10/2000	5	3	3
	Excesiva altura del arrume	No aplicación de las disposiciones del procedimiento		5	1	1	5						
CLIENTE	Mal estado de la bodega de almacenamiento	Mantenimiento Civil deficiente.	Grumos en el Cemento	5	3	3	45	Seguimiento permanente Asesor	Carlos Fiallo	Permanente			
	Mala rotación	No aplicación del FIFO		5	3	5	75	Seguimiento permanente Asesor	Carlos Fiallo	Permanente			
	Excesiva altura del arrume	No aplicación de las disposiciones		5	5	3	75	Seguimiento permanente Asesor	Carlos Fiallo	Permanente			
	Humedad adquirida en el mometo del cargue o descargue.	No hay zona de protección para el descargue.		5	3	3	45	Concientizar Clientes y transportadores	Logística y Asesores Comerciales	Permanente			

**ANEXO D. ESTADÍSTICAS DE PRESENCIA DE GRUMOS EN LOS ÚLTIMOS AÑOS.  
RESULTADOS DE QUEJAS Y RECLAMOS**

<b>AÑO</b>	<b>TOTAL QUEJAS-RECLAMOS</b>	<b>GRUMOS</b>	<b>INCIDENCIA GRUMOS (%)</b>
2000	19	9	47.4
2001	16	4	25.0
2002	20	3	15.0
2003	13	2	15.0
2004	32	21	65.5
2005	93	11	11.4



**ANEXO E. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO A DIFERENTES EDADES DE ALMACENAMIENTO**

1. Inspección de formación de grumos a los 5 días  
Fecha: 4 de agosto 2005.

→ Características ; **Cemento Tipo 1 Normal expuesto a condiciones normales**

Muestra	<u>CaO</u> %	<u>SiO<sub>2</sub></u> %	<u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>MgO</u> %	<u>SO<sub>3</sub></u> %	<u>K<sub>2</sub>O</u> %	<u>Na<sub>2</sub>O</u> %	<u>H<sub>2</sub>O</u> %	<u>PxC</u> %	<u>Cal</u> L. %	<u>Grumos</u> %
50 Kg	57.81	20.72	6.05	2.63	0.88	1.69	0.64	0.10	0.19	9.89	1.05	0.0
25 Kg	57.67	20.55	6.19	2.58	0.86	1.91	0.63	0.09	0.26	9.34	1.05	0.0

→ Características ; **Cemento Tipo 1 Normal expuesto a condiciones agresivas**

Muestra	<u>CaO</u> %	<u>SiO<sub>2</sub></u> %	<u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>MgO</u> %	<u>SO<sub>3</sub></u> %	<u>K<sub>2</sub>O</u> %	<u>Na<sub>2</sub>O</u> %	<u>H<sub>2</sub>O</u> %	<u>PxC</u> %	<u>Cal</u> L. %	<u>Grumos</u> %
50 Kg	57.8 3	20.5 0	6.11	2.62	0.88	1.81	0.64	0.09	0.18	9.77	1.06	0.35
25 Kg	57.8 0	20.6 4	6.21	2.59	0.87	1.89	0.63	0.09	0.20	9.81	1.05	0.0

2. Inspección de formación de grumos a los 10 días  
Fecha: 9 de agosto 2005

→ Características Químicas ; **Cemento Tipo 1 Normal expuesto a condiciones normales**

Muestra	<u>CaO</u> %	<u>SiO<sub>2</sub></u> %	<u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>MgO</u> %	<u>SO<sub>3</sub></u> %	<u>K<sub>2</sub>O</u> %	<u>Na<sub>2</sub>O</u> %	<u>H<sub>2</sub>O</u> %	<u>PxC</u> %	<u>Cal</u> L. %	<u>Grumos</u> %
50 Kg	57.72	20.8 0	6.24	2.59	0.90	1.92	0.63	0.09	0.28	9.83	1.02	0.04
25 Kg	57.85	20.4 3	6.16	2.61	0.91	2.04	0.64	0.09	0.37	9.57	1.06	0.00

→ Características Químicas ; **Cemento Tipo 1 Normal expuesto a condiciones agresivas**

Muestra	<u>CaO</u> %	<u>SiO<sub>2</sub></u> %	<u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>MgO</u> %	<u>SO<sub>3</sub></u> %	<u>K<sub>2</sub>O</u> %	<u>Na<sub>2</sub>O</u> %	<u>H<sub>2</sub>O</u> %	<u>PxC</u> %	<u>Cal</u> L. %	<u>Grumos</u> %
50 Kg	57.80	20.70	6.24	2.58	0.90	1.92	0.63	0.09	0.38	10.22	1.04	0.44
25 Kg	57.90	20.38	6.10	2.61	0.91	2.04	0.64	0.09	0.35	9.89	1.03	0.09

3. Inspección de formación de grumos a los 15 días  
Fecha: 14 de agosto 2005

→ Características Químicas ; Cemento Tipo 1 Normal expuesto a condiciones normales

Muestra	<u>CaO</u> %	<u>SiO<sub>2</sub></u> z. %	<u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>MgO</u> O %	<u>SO<sub>3</sub></u> %	<u>K<sub>2</sub>O</u> %	<u>Na<sub>2</sub>O</u> %	<u>H<sub>2</sub>O</u> %	<u>PxC</u> %	<u>Cal</u> L. %	<u>Grumos</u> %
50 Kg	57.71	20.58	6.22	2.58	0.89	1.98	0.63	0.09	0.26	9.79	0.99	1.21
25 Kg	57.59	20.03	6.03	2.60	0.90	2.17	0.64	0.09	0.23	9.72	1.01	0.26
Grumos 50 Kg	57.68	20.25	6.16	2.58	0.90	1.94	0.63	0.08	0.37	10.22	1.00	
Grumos 25 Kg									0.35	---	--	

→ Características Químicas ; Cemento Tipo 1 Normal expuesto a corrientes de aire

Muestra	<u>CaO</u> %	<u>SiO<sub>2</sub></u> %	<u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>MgO</u> %	<u>SO<sub>3</sub></u> %	<u>K<sub>2</sub>O</u> %	<u>Na<sub>2</sub>O</u> %	<u>H<sub>2</sub>O</u> %	<u>PxC</u> %	<u>Cal</u> L. %	<u>Grumos</u> %
50 Kg	57.75	20.61	6.20	2.58	0.90	2.06	0.63	0.10	0.28	9.80	1.02	1.11
25 Kg	57.88	6.10	6.10	2.62	0.91	2.26	0.64	0.10	0.22	9.62	1.00	2.73
Grumos 50 Kg	20.53	6.12	6.12	2.63	0.90	2.14	0.65	0.09	0.41	10.06	1.05	
Grumos 25 Kg	20.22	6.03	6.03	2.61	0.91	2.08	0.65	0.09	0.37	10.47	0.99	

4. Inspección de formación de grumos a los 20 días  
Fecha: 19 de agosto 2005

→ Características Químicas ; Cemento Tipo 1 Normal expuesto a condiciones normales

Muestra	<u>CaO</u> %	<u>SiO<sub>2</sub></u> %	<u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>MgO</u> %	<u>SO<sub>3</sub></u> %	<u>K<sub>2</sub>O</u> %	<u>Na<sub>2</sub>O</u> %	<u>H<sub>2</sub>O</u> %	<u>PxC</u> %	<u>Cal</u> <u>L.</u> %	<u>Grumo</u> <u>S</u> %
50 Kg	57.62	20.22	6.22	2.58	0.88	2.07	0.63	0.09	0.39	10.23	1.00	1.35
25 Kg	57.29	19.56	6.02	2.60	0.88	2.21	0.64	0.09	0.30	10.25	1.01	1.50
Grumos 50 Kg	57.05	19.52	6.08	2.56	0.86	2.01	0.63	0.09	0.45	10.59	1.01	
Grumos 25 Kg	56.90	19.06	5.87	2.62	0.87	2.05	0.65	0.09	0.41	10.45	1.07	

→ Características Químicas ; Cemento Tipo 1 Normal expuesto a corrientes de aire

Muestra	<u>CaO</u> %	<u>SiO<sub>2</sub></u> %	<u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>MgO</u> %	<u>SO<sub>3</sub></u> %	<u>K<sub>2</sub>O</u> %	<u>Na<sub>2</sub>O</u> %	<u>H<sub>2</sub>O</u> %	<u>PxC</u> %	<u>Cal</u> <u>L.</u> %	<u>Grumo</u> <u>S</u> %
50 Kg	57.57	20.30	6.22	2.58	0.87	2.3	0.63	0.08	0.37	10.54	0.99	3.19
25 Kg	57.78	20.20	6.12	2.61	0.89	2.11	0.64	0.09	0.37	10.56	1.00	2.55
Grumos 50 Kg	57.47	20.12	6.18	2.58	0.87	2.03	0.63	0.09	0.55	10.68	0.98	
Grumos 25 Kg	56.86	19.11	5.94	2.59	0.87	2.15	0.64	0.09	0.53	10.70	1.00	

5. Inspección de formación de grumos a los 25 días  
Fecha: 24 de agosto 2005

→ Características Químicas ; Cemento Tipo 1 Normal expuesto a condiciones normales

Muestra	<u>CaO</u> %	<u>SiO<sub>2</sub></u> %	<u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>MgO</u> %	<u>SO<sub>3</sub></u> %	<u>K<sub>2</sub>O</u> %	<u>Na<sub>2</sub>O</u> %	<u>H<sub>2</sub>O</u> %	<u>PxC</u> %	<u>Cal</u> <u>L.</u> %	<u>Grumos</u> %
50 Kg	57.61	20.08	6.23	2.58	0.88	2.05	0.63	0.09	0.28	10.52	0.99	5.39
25 Kg	57.93	20.33	6.18	2.60	0.90	2.14	0.64	0.10	0.25	10.51	0.98	3.80
Grumos 50 Kg	57.76	20.18	6.25	2.58	0.89	2.10	0.64	0.09	0.39	10.63	0.98	
Grumos 25 Kg	57.80	20.01	6.16	2.61	0.90	2.09	0.64	0.09	0.26	10.67	0.97	

→ Características Químicas ; Cemento Tipo 1 Normal expuesto a corrientes de aire

Muestra	<u>CaO</u> %	<u>SiO<sub>2</sub></u> %	<u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>MgO</u> %	<u>SO<sub>3</sub></u> %	<u>K<sub>2</sub>O</u> %	<u>Na<sub>2</sub>O</u> %	<u>H<sub>2</sub>O</u> %	<u>PxC</u> %	<u>Cal</u> L. %	<u>Grumos</u> %
<b>50 Kg</b>	57.77	20.32	6.26	2.58	0.89	2.03	0.64	0.10	0.27	10.53	0.98	5.32
<b>25 Kg</b>	57.97	20.01	6.12	2.61	0.90	2.05	0.65	0.10	0.32	10.52	0.97	6.50
<b>Grumos 50 Kg</b>	57.70	19.98	6.22	2.58	0.88	2.14	0.64	0.09	0.38	10.72	0.98	
<b>Grumos 25 Kg</b>	57.11	20.53	6.55	2.55	0.91	2.21	0.63	0.10	0.33	10.69	0.99	

6. Inspección de formación de grumos a los 30 días

Fecha: 29 de agosto 2005

→ Características Químicas ; Cemento Tipo 1 Normal expuesto a condiciones normales

Tipo de Empaque	<u>CaO</u> %	<u>SiO<sub>2</sub></u> %	<u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>MgO</u> %	<u>SO<sub>3</sub></u> %	<u>K<sub>2</sub>O</u> %	<u>Na<sub>2</sub>O</u> %	<u>H<sub>2</sub>O</u> %	<u>PxC</u> %	<u>Cal</u> L. %	<u>Grumos</u> %
<b>50 Kg</b>	57.58	20.15	6.20	2.58	0.88	2.20	0.63	0.09	0.48	10.51	0.99	3.06
<b>25 Kg</b>	57.80	19.99	6.08	2.61	0.89	2.01	0.64	0.09	0.35	10.50	0.99	2.27
<b>Grumos 50 Kg</b>	57.10	20.53	6.58	2.52	0.89	2.08	0.62	0.09	0.44	10.73	0.99	
<b>Grumos 25 Kg</b>	57.69	19.29	6.01	2.60	0.90	2.12	0.65	0.09	0.52	10.76	0.98	

→ Características Químicas; Cemento Tipo 1 Normal expuesto a condiciones agresivas

Tipo de Empaque	<u>CaO</u> %	<u>SiO<sub>2</sub></u> %	<u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %	<u>MgO</u> %	<u>SO<sub>3</sub></u> %	<u>K<sub>2</sub>O</u> %	<u>Na<sub>2</sub>O</u> %	<u>H<sub>2</sub>O</u> %	<u>PxC</u> %	<u>Cal</u> L. %	<u>Grumos</u> %
<b>50 Kg</b>	57.80	19.94	6.17	2.58	0.89	2.05	0.64	0.09	0.40	10.56	0.98	7.02
<b>25 Kg</b>	57.68	19.35	6.01	2.60	0.90	2.09	0.65	0.09	0.39	10.61	0.99	11.10
<b>Grumos 50 Kg</b>	57.55	19.70	6.15	2.57	0.87	2.12	0.64	0.09	0.60	10.78	0.96	
<b>Grumos 25 Kg</b>	57.64	19.49	6.05	2.59	0.89	2.04	0.65	0.09	0.63	10.72	0.97	

7. Inspección de formación de grumos a los 35 días Fecha: 3 de septiembre 2005

→ Características Químicas ; **Cemento Tipo 1 Normal expuesto a condiciones normales**

Muestra	CaO %	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MgO %	SO <sub>3</sub> %	K <sub>2</sub> O %	Na <sub>2</sub> O %	H <sub>2</sub> O %	PxC %	Cal L. %	Grumos %
50 Kg	57.50	20.08	6.19	2.59	0.88	06	0.63	0.08	0.24	10.62	0.99	3.36
25 Kg	57.64	19.91	6.05	2.61	0.89	2.05	0.64	0.08	0.27	10.52	0.98	5.26
Grumos 50 Kg	57.26	19.80	6.12	2.57	0.87	2.15	0.63	0.08	0.20	10.75	0.99	
Grumos 25 Kg	57.51	19.77	6.02	2.60	0.89	2.13	0.64	0.08	0.23	10.65	0.99	

→ Características Químicas ; **Cemento Tipo 1 Normal expuesto a corrientes de aire**

Tipo de Empaque	CaO %	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MgO %	SO <sub>3</sub> %	K <sub>2</sub> O %	Na <sub>2</sub> O %	H <sub>2</sub> O %	PxC %	Cal L. %	Grumos %
50 Kg	57.76	20.33	6.11	2.65	0.88	2.06	0.65	0.09	0.30	10.40	1.05	9.02
25 Kg	57.39	19.69	6.02	2.61	0.89	2.08	0.64	0.08	0.32	10.48	0.97	13.25
Grumos 50 Kg	57.00	19.28	6.03	2.56	0.86	2.07	0.64	0.08	0.41	10.64	0.98	
Grumos 25 Kg	57.31	19.44	5.98	2.60	0.88	2.15	0.65	0.08	0.38	10.68	0.99	

8. Inspección de formación de grumos a los 40 días  
Fecha: 8 de septiembre 2005

→ Características Químicas ; **Cemento Tipo 1 Normal expuesto a condiciones normales**

Tipo de Empaque	CaO %	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MgO %	SO <sub>3</sub> %	K <sub>2</sub> O %	Na <sub>2</sub> O %	H <sub>2</sub> O %	PxC %	Cal L. %	Grumos %
50 Kg	57.71	20.03	6.24	2.59	0.88	2.07	0.63	0.09	0.35	10.42	0.98	2.64
25 Kg	57.46	19.33	6.03	2.61	0.88	2.13	0.64	0.10	0.27	10.58	0.99	6.86
Grumos 50 Kg	56.75	18.81	5.99	2.55	0.86	2.10	0.63	0.09	0.50	10.69	1.03	
Grumos 25 Kg	57.46	19.35	6.01	2.60	0.89	2.14	0.64	0.08	0.39	10.69	1.00	

→ Características Químicas ; Cemento Tipo 1 Normal expuesto a corrientes de aire

Tipo de Empaque	CaO %	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MgO %	SO <sub>3</sub> %	K <sub>2</sub> O %	Na <sub>2</sub> O %	H <sub>2</sub> O %	PxC %	Cal L. %	Grumos %
50 Kg	57.53	19.73	6.18	2.57	0.87	.06	0.64	0.09	0.32	10.65	0.98	9.75
25 Kg	57.71	19.79	6.13	2.61	0.89	2.03	0.65	0.09	0.33	10.58	0.98	15.50
Grumos 50 Kg	57.32	19.36	6.09	2.57	0.87	2.05	0.64	0.08	0.34	11.69	0.98	
Grumos 25 Kg	57.11	18.91	5.93	2.60	0.88	2.15	0.65	0.08	0.33	11.02	1.00	

9. Inspección de formación de grumos a los 4 días  
Fecha: 13 de septiembre 2005

→ Características Químicas ; Cemento Tipo 1 Normal expuesto a condiciones normales

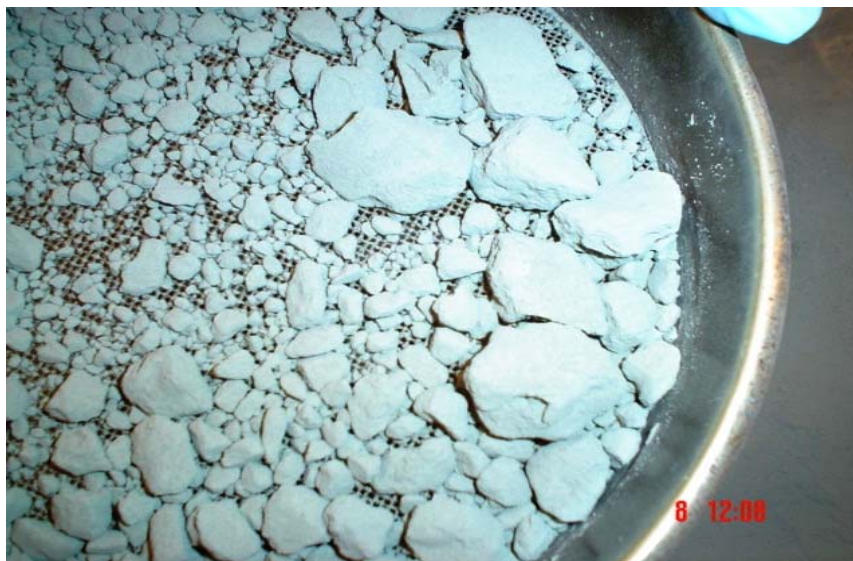
Tipo de Empaque	CaO %	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MgO %	SO <sub>3</sub> %	K <sub>2</sub> O %	Na <sub>2</sub> O %	H <sub>2</sub> O %	PxC %	Cal L. %	Grumos %
50 Kg	57.70	19.90	6.18	2.58	0.99	2.05	0.64	0.08	0.31	0.56	0.98	3.46
25 Kg	57.94	19.56	6.05	2.62	0.90	2.04	0.65	0.09	0.23	10.52	0.99	7.23
Grumos 50 Kg	57.57	19.68	6.17	2.58	0.88	2.09	0.64	0.09	0.38	10.63	0.96	
Grumos 25 Kg	57.44	19.27	6.01	2.61	0.89	2.08	0.65	0.09	0.36	10.69	1.02	

→ Características Químicas ; Cemento Tipo 1 Normal expuesto a corrientes de aire

<b>Tipo de Empaque</b>	<b><u>CaO</u> %</b>	<b><u>SiO<sub>2</sub></u> %</b>	<b><u>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %</b>	<b><u>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></u> %</b>	<b><u>MgO</u> %</b>	<b><u>SO<sub>3</sub></u> %</b>	<b><u>K<sub>2</sub>O</u> %</b>	<b><u>Na<sub>2</sub>O</u> %</b>	<b><u>H<sub>2</sub>O</u> %</b>	<b><u>PxC</u> %</b>	<b><u>Cal</u> <u>L</u> %</b>	<b><u>Grumos</u> %</b>
<b>50 Kg</b>	57.92	19.66	6.06	2.66	0.88	2.08	0.65	0.09	0.32	10.36	1.04	11.35
<b>25 Kg</b>	57.87	19.39	6.00	2.61	0.90	2.07	0.65	0.09	0.39	10.52	0.97	16.28
<b>Grumos 50 Kg</b>	56.93	20.12	6.55	2.52	0.89	2.06	0.63	0.09	0.46	10.65	1.00	
<b>Grumos 25 Kg</b>	57.65	19.21	5.99	2.61	0.89	2.15	0.65	0.09	0.45	10.74	0.98	

## ANEXO F. REGISTRO FOTOGRAFICO DE CEMENTO ATERRONADO

**Foto 1.** Cemento aterronado retenido en malla 16 (1.18 mm), antes de ser tamizado.



**Foto 2.** Cemento aterronado retenido en malla 16 (1.18 mm), despues de ser tamizado.



**Foto 3.** Estado del cemento aterronado en el momento de destapar el saco.



Foto 4. Cemento aterronado en las esquinas de los sacos

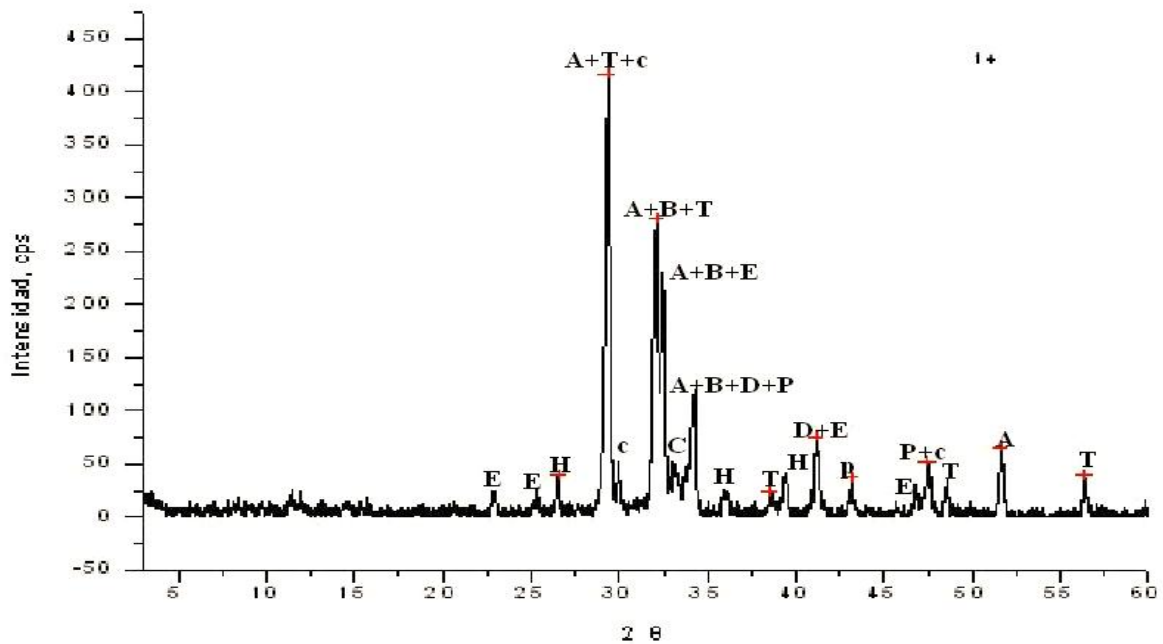


## ANEXO G. REGISTRO DE DIFRACTÓGRAMAS REALIZADOS A MUESTRAS DE CEMENTO TIPO 1 ATERRONADO CON DIFERENTE TIEMPO DE ALMACENAMIENTO

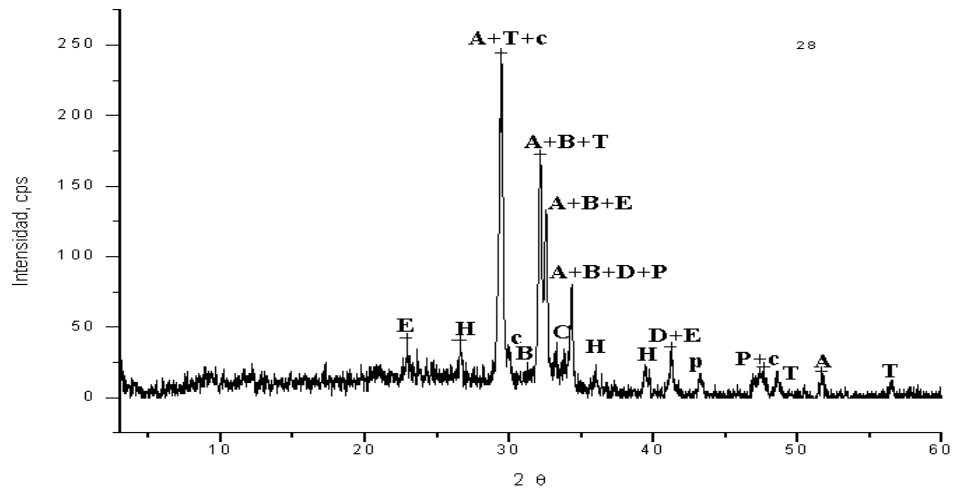
Los siguientes difractogramas muestran los diferentes minerales del cemento tipo 1 CPR, producto de la hidratación del cemento.

El significado de las letras de los difractogramas son: **E**: Ettringita, **H**: Hydrogarnet, **A**: Alita, **T**: Tobermorita, **c**: Calcita, **B**: Belita, **C**: Celita, **D**: Felita, **P**: Portlandita, **p**: periclasa

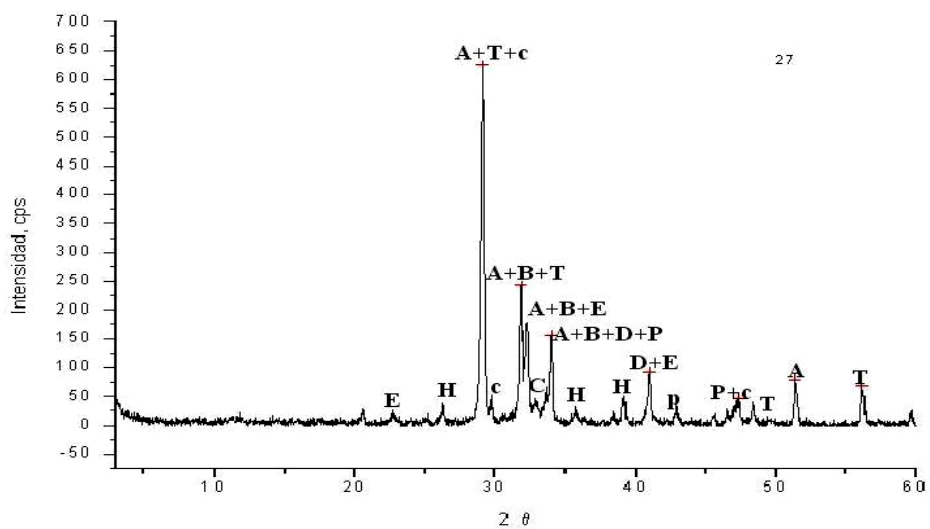
**FIGURA 1.** Cemento de referencia.



**FIGURA 2.** Difractograma del cemento con 15 días de almacenamiento, empacado en sacos de 25 Kg.

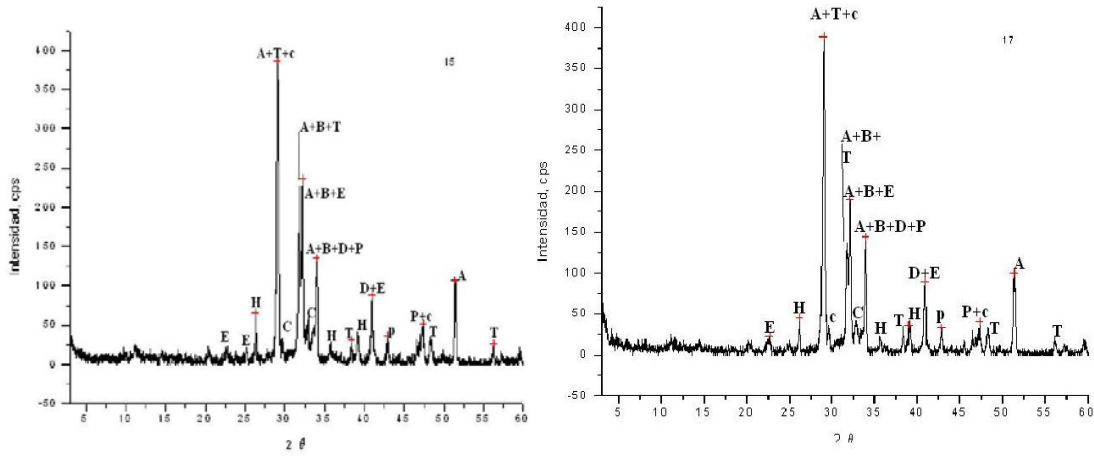


**FIGURA 3.** Difractograma del cemento con 15 días de almacenamiento, empacado en sacos de 50 Kg.

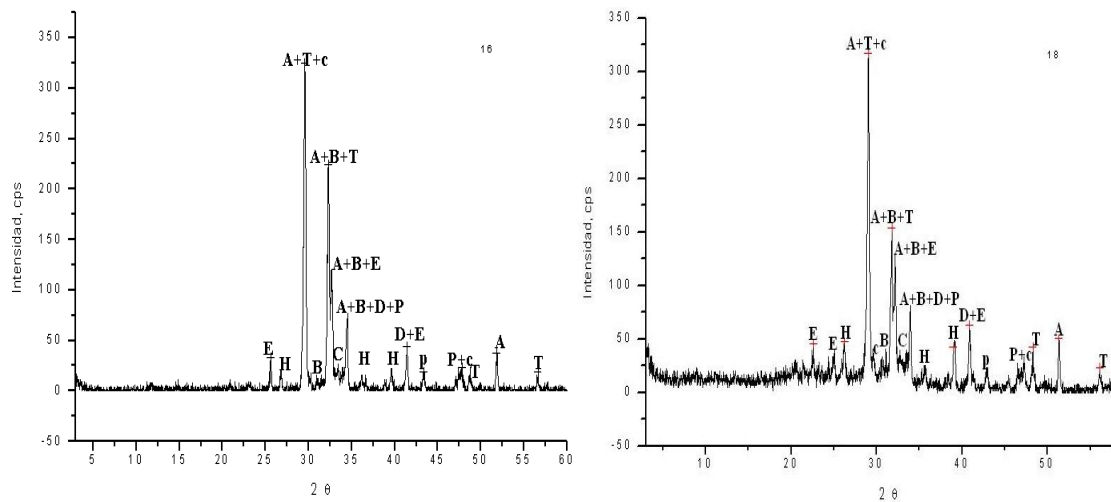


**FIGURA 4.** Difractogramas del cemento con 20 días de almacenamiento.

Condiciones normales de almacenamiento en sacos de 25 y 50 Kg respectivamente.

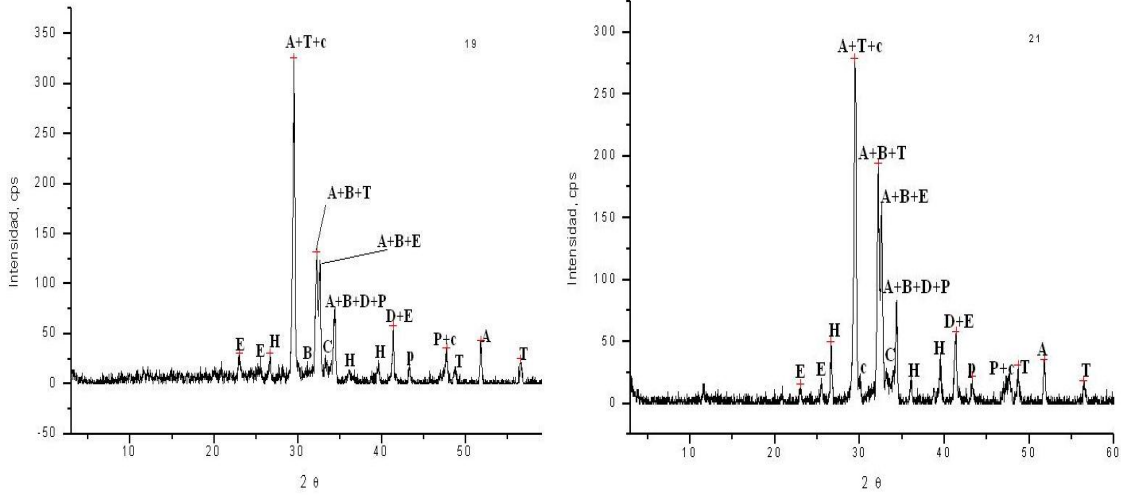


Condiciones ambientales agresivas de almacenamiento en sacos de 25 y 50 Kg respectivamente.

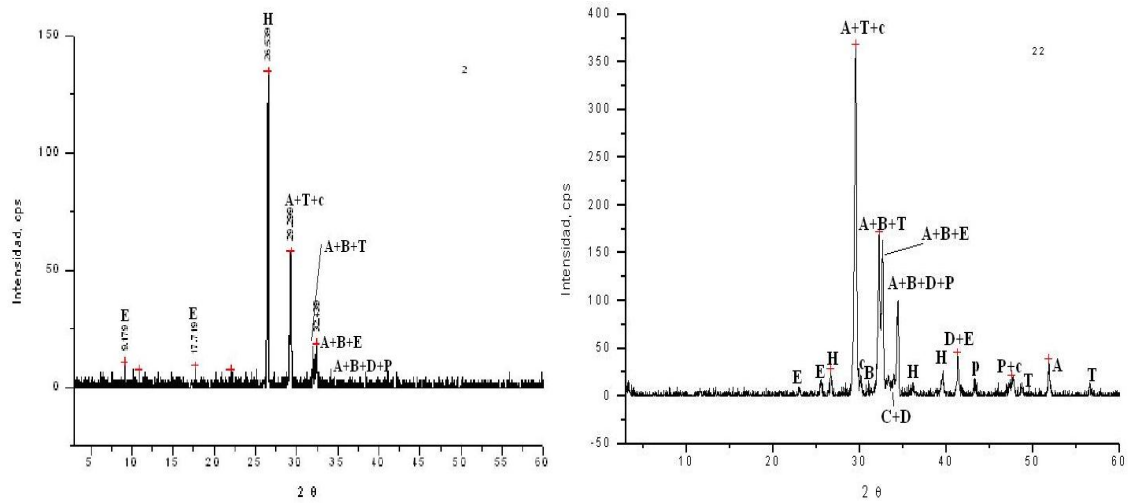


**FIGURA 5.** Difractogramas del cemento con 25 días de almacenamiento.

Condiciones normales de almacenamiento en sacos de 25 y 50 Kg respectivamente.

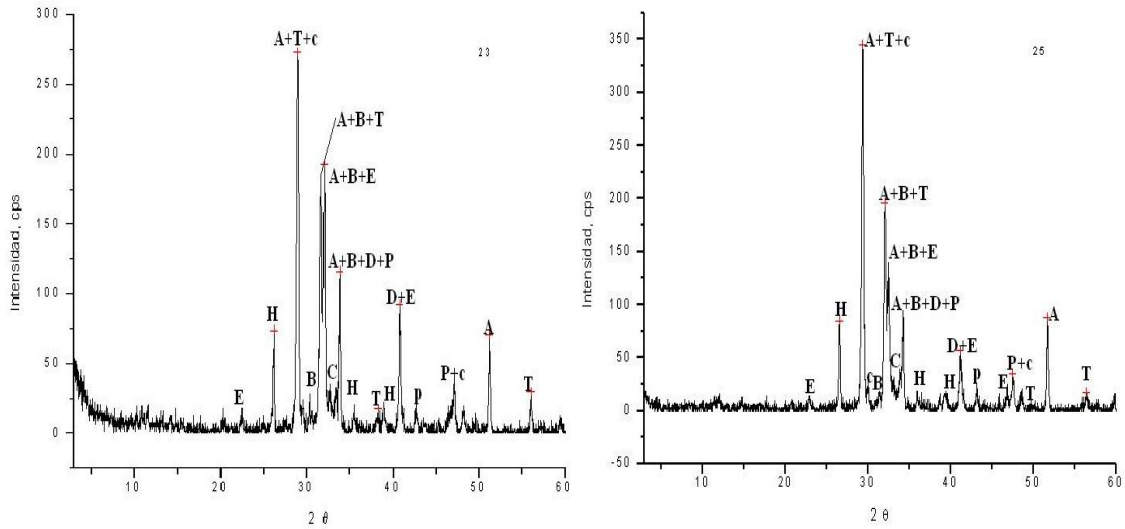


Condiciones ambientales agresivas de almacenamiento en sacos de 25 y 50 Kg respectivamente.

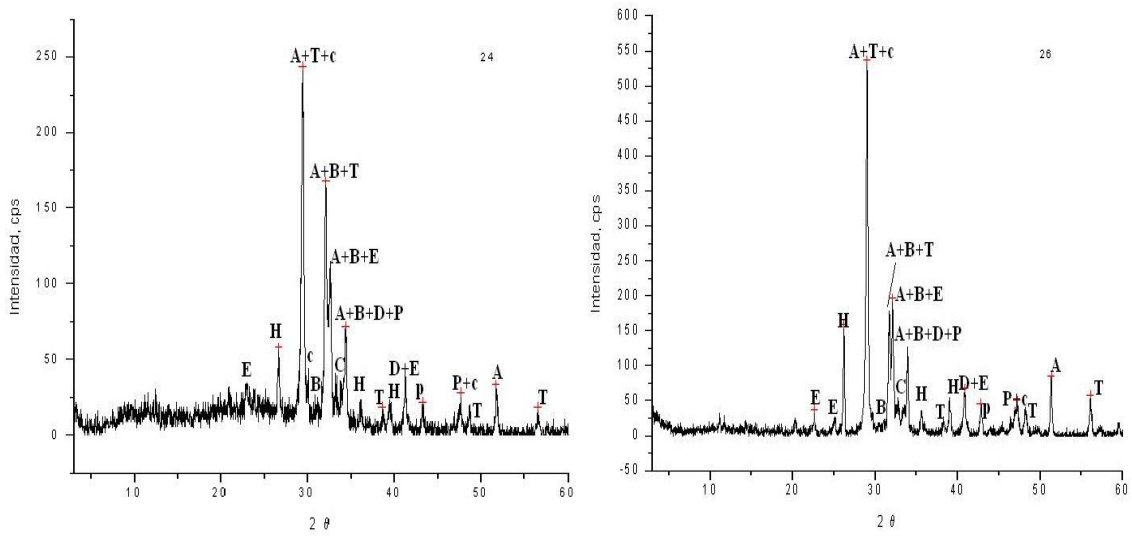


**FIGURA 6.** Difractogramas del cemento con 30 días de almacenamiento.

Condiciones normales de almacenamiento en sacos de 25 y 50 Kg respectivamente.

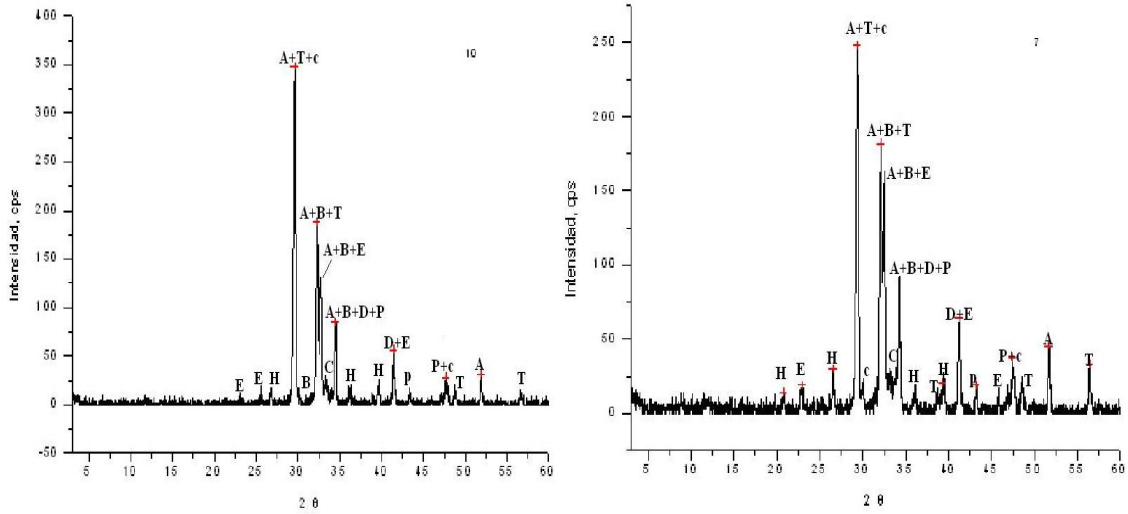


Condiciones ambientales agresivas de almacenamiento en sacos de 25 y 50 Kg respectivamente.

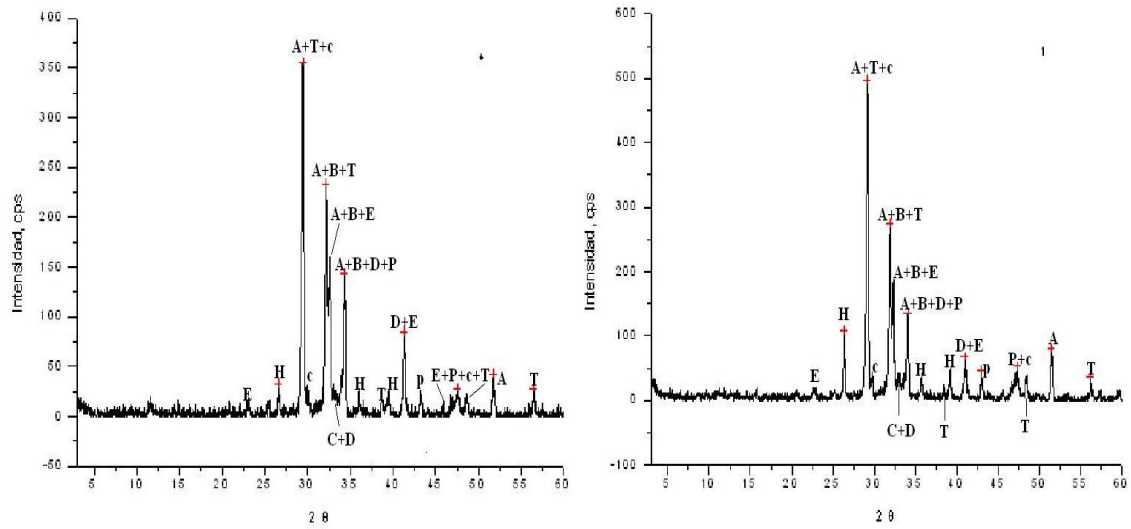


**FIGURA 7.** Difractogramas del cemento con 35 días de almacenamiento.

Condiciones normales de almacenamiento en sacos de 25 y 50 Kg respectivamente.

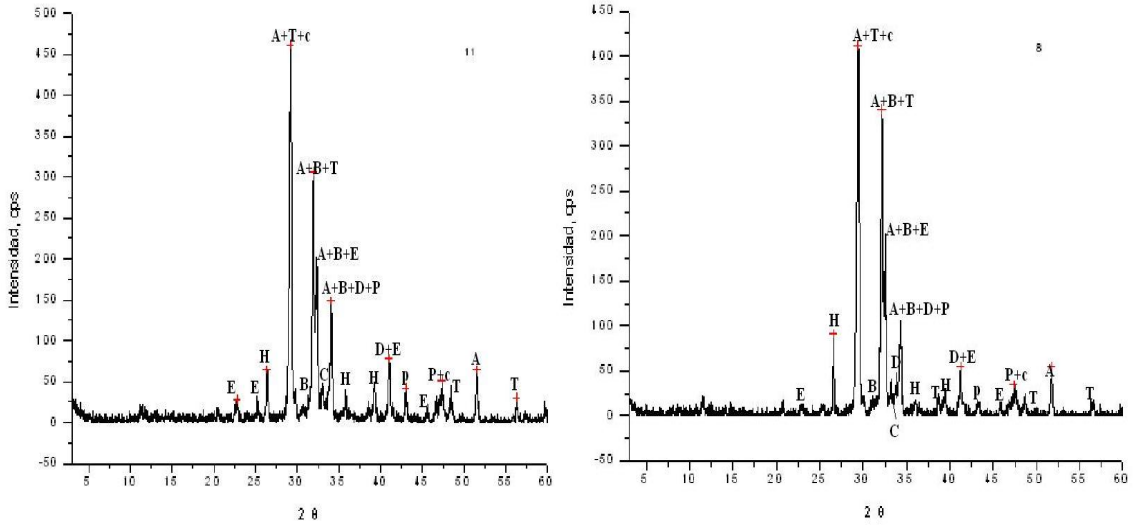


Condiciones ambientales agresivas de almacenamiento en sacos de 25 y 50 Kg respectivamente.

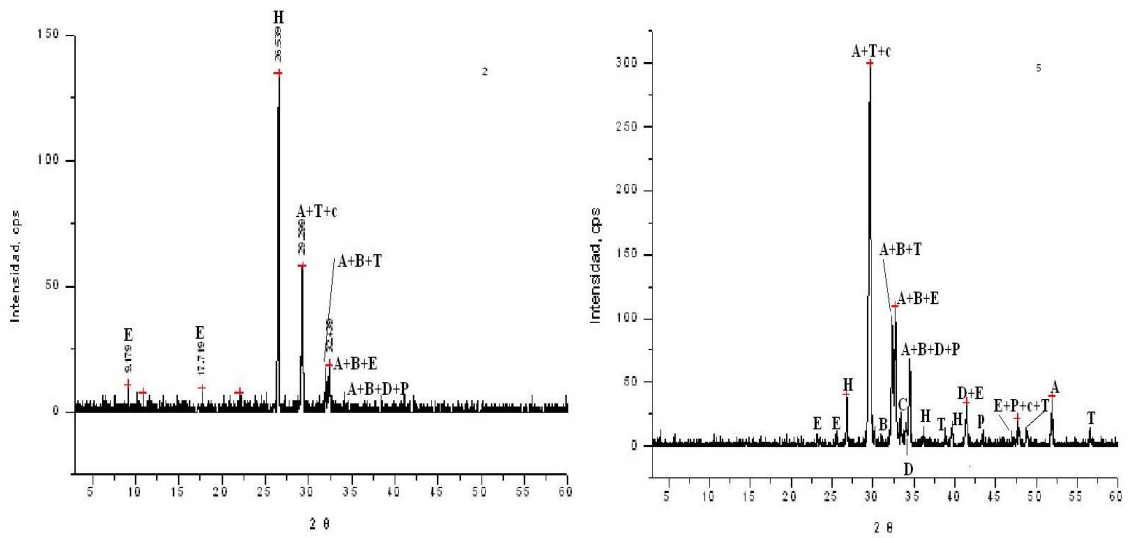


**FIGURA 8.** Difractogramas del cemento con 40 días de almacenamiento.

Condiciones normales de almacenamiento en sacos de 25 y 50 Kg respectivamente.

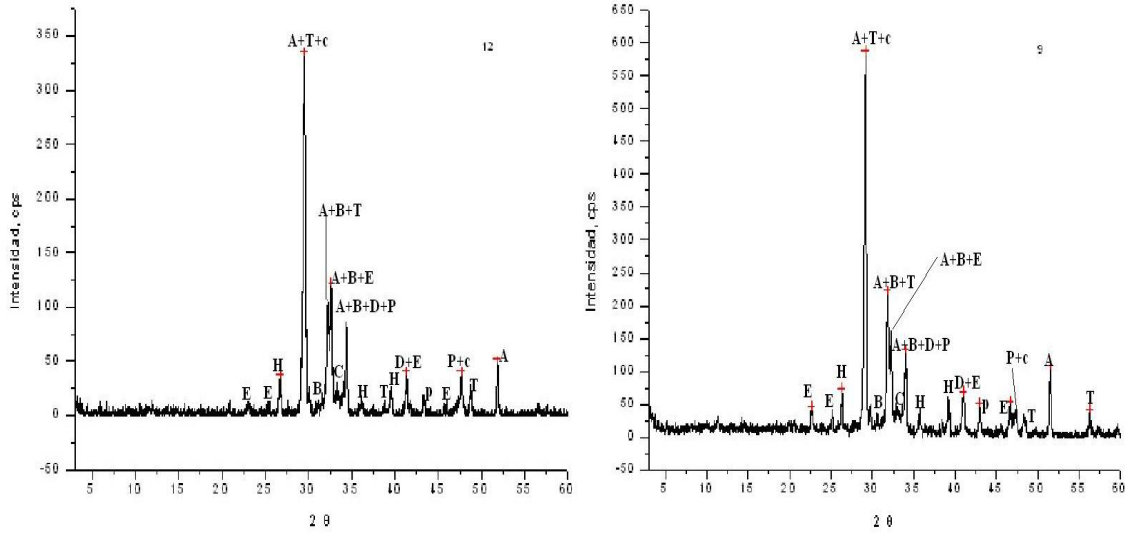


Condiciones ambientales agresivas de almacenamiento en sacos de 25 y 50 Kg respectivamente.

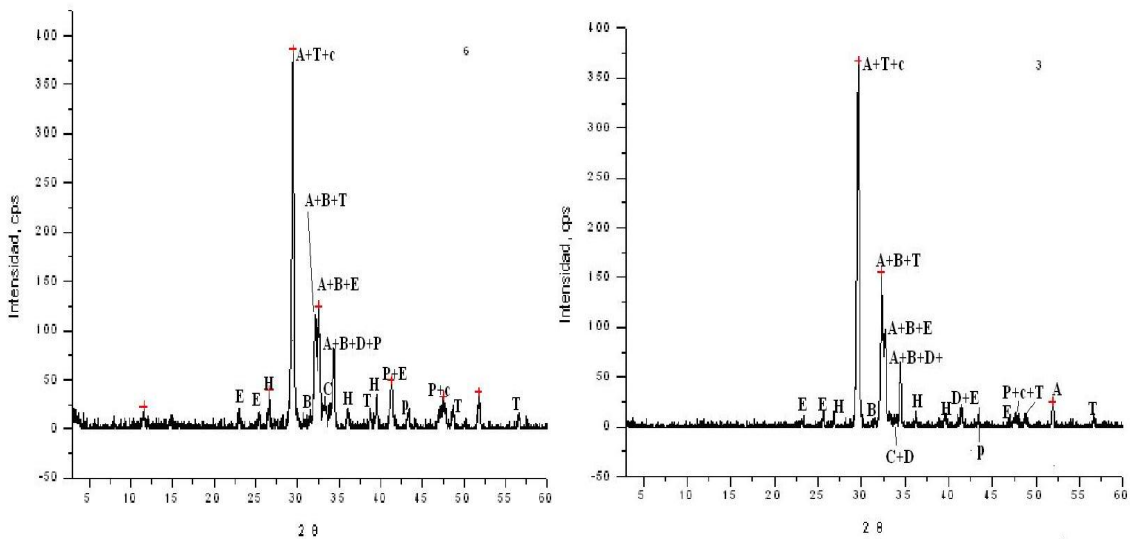


**FIGURA 9.** Difractogramas del cemento con 45 días de almacenamiento.

Condiciones normales de almacenamiento en sacos de 25 y 50 Kg respectivamente.

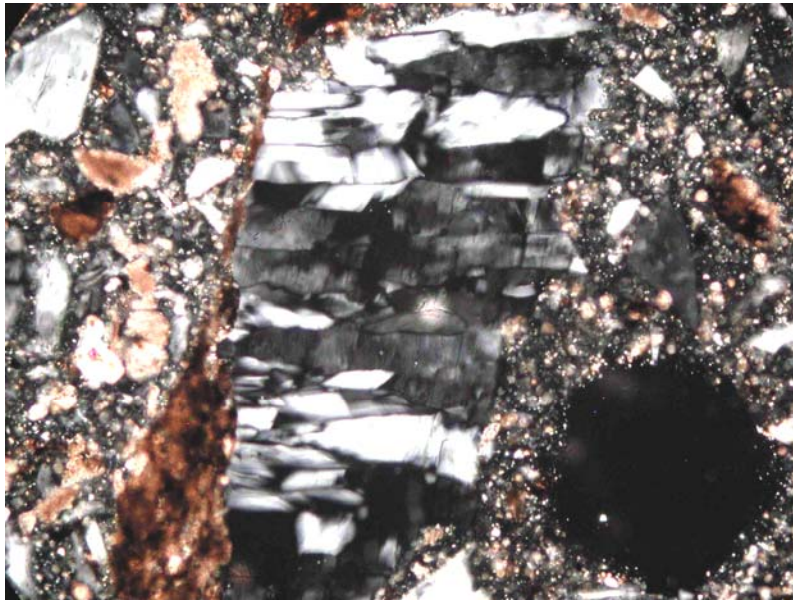


Condiciones ambientales agresivas de almacenamiento en sacos de 25 y 50 Kg respectivamente.

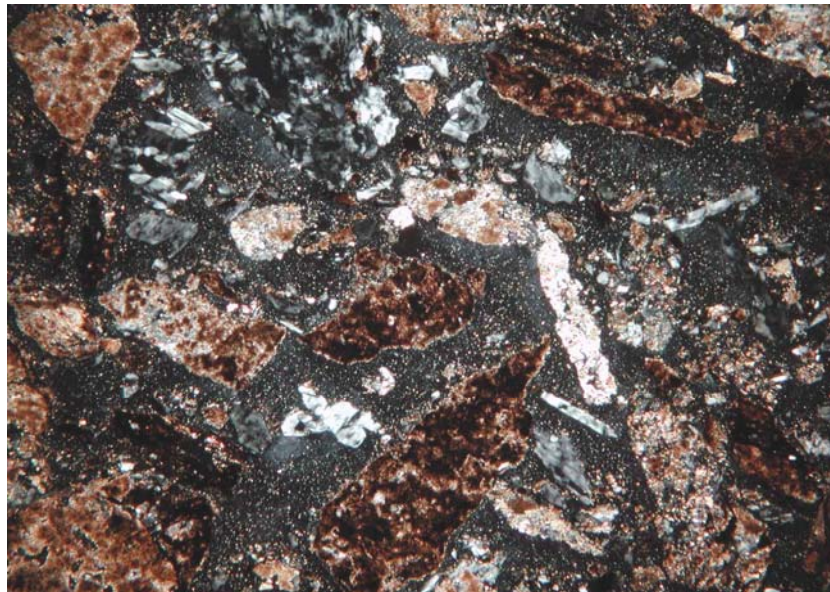


## ANEXO H. ANALISIS PETROGRAFICO DEL YESO (Mesa de los Santos)

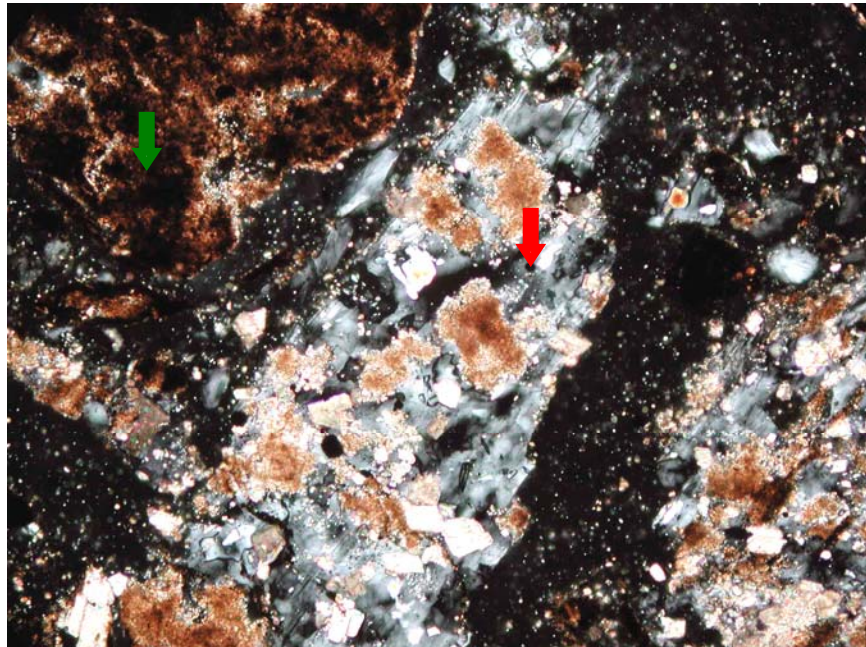
**FOTO 1.** Muestra I. Estructura granular fibrosa del yeso, sección delgada, polarizadores cruzados, luz transmitida 200 x aumentos.



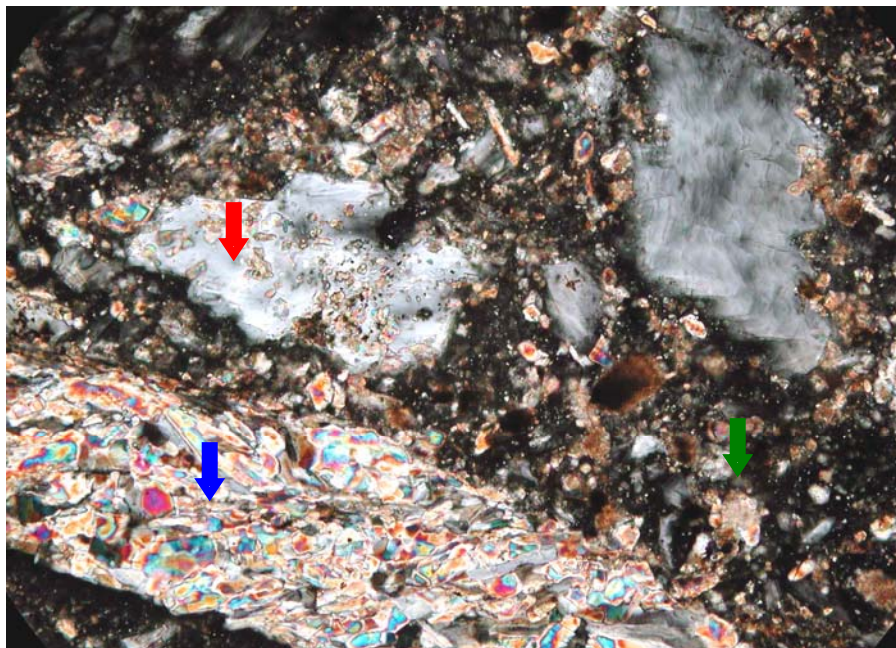
**FOTO 2.** Muestra II. Yeso, asociado con material arcilloso y calcita. Sección delgada, polarizadores cruzados, luz transmitida 40x aumentos



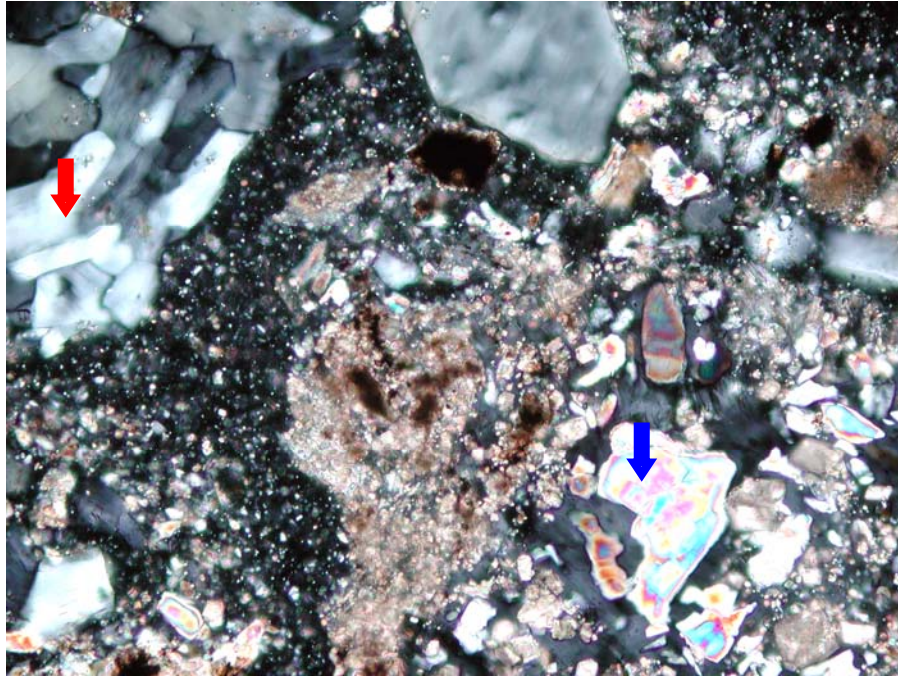
**FOTO 3.** Muestra II. Estructuras de yeso con anhidrita cúbica y calcita romboédrica. Sección delgada, polarizadores cruzados, luz transmitida. 200x aumentos.



**FOTO 4.** Muestra III. Clivaje cúbico de la anhidrita. Sección delgada, polarizadores cruzados, luz transmitida, 200x aumentos.



**FOTO 5.** Muestra IV. Sección delgada, polarizadores cruzados, luz transmitida, 200x aumentos.

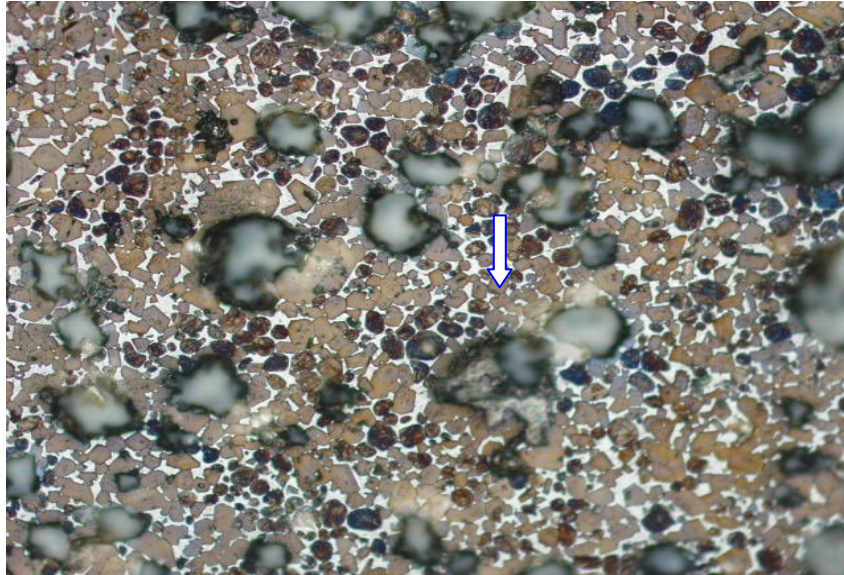


**ANEXO I. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y CÁLCULO POTENCIAL DE LAS FASES DEL CLINKER.**

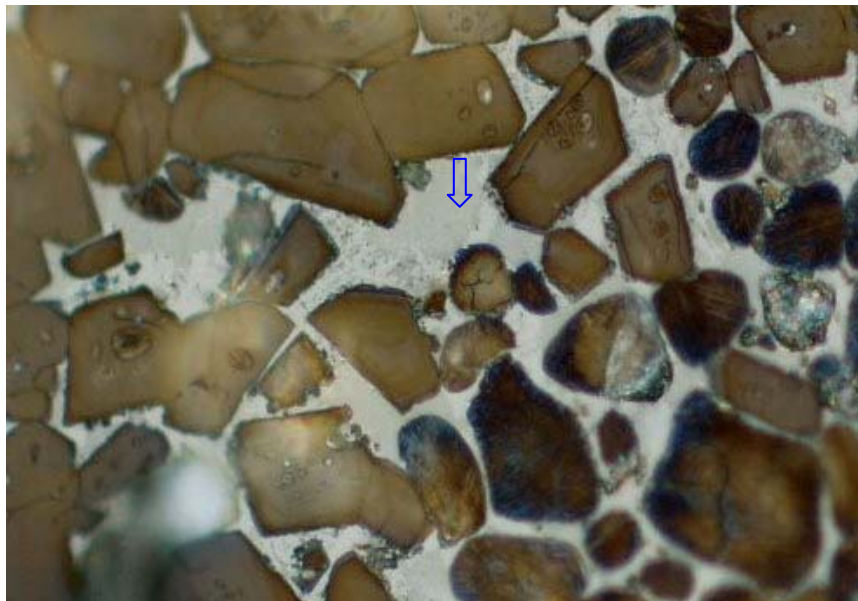
	<b>MUESTRA 1</b>	<b>MUESTRA 2</b>
<b>CaO</b>	65.50	65.97
<b>SiO<sub>2</sub></b>	21.56	21.54
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5.45	5.30
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3.63	3.53
<b>MgO</b>	1.10	1.11
<b>SO<sub>3</sub></b>	0.58	0.48
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.13	0.13
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.67	0.58
<b>Cal lib</b>	0.95	1.05
<b>FSC</b>	93.26	94.33
<b>MS</b>	2.37	2.44
<b>MA</b>	1.50	1.50
<b>C<sub>3</sub>A</b>	8.30	8.07
<b>C<sub>3</sub>S</b>	57.05	59.86
<b>C<sub>4</sub>AF</b>	11.05	10.74
<b>C<sub>2</sub>S</b>	18.78	16.60
<b>FL</b>	26.82	26.07
<b>AW</b>	30.36	29.19

**ANEXO J. REGISTRO FOTOGRAFICO MICROSCOPIA DEL CLINKER CPR.**

**FOTOS 1.** Distribución homogénea de las fases. Desarrollo cristalino adecuado de los silicatos (30 micras)



**FOTO 2.** Fase intersticial con un avanzado grado de cristalización del C3A.



ANEXO K. RESULTADOS DE ANALISIS GRANULOMETRICO (CILAS)



PARTICLE SIZE DISTRIBUTION  
CILAS 1064 Liquid



Range : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Sample Ref	: TIPO-1 BOLSA 50 Kg	Ultrasound	: 0	s
Type produit	: CEMENTOS PAOLA RINC	Concentration	: 206	
Client	: PAOLA RINCON- UIS	Diameter at 10%	: 1.29	mu
Comments	: 3 AGOSTO-05	Diameter at 50%	: 11.39	mu
Liquid	: Isopropyl alcohol	Diameter at 90%	: 37.52	mu
Dispersing agent	: No	Mean diameter	: 15.95	mu
Operator	: JORGEMONTAÑA	Fraunhofer		
Company	: CEMENTOS PAZ DEL RIO	Density/Factor	_____	
Location	: Planta Sogamoso	Specific surface	_____	
Date	: 04/08/2005	Automatic dilution	: No / No	
Time	: 02:11:07AM	Meas./Rinse No.	: 60/60/3	
Index meas.	: 2245	SOP	: CEMENTO T-1NORMAL	

Customer defined classes

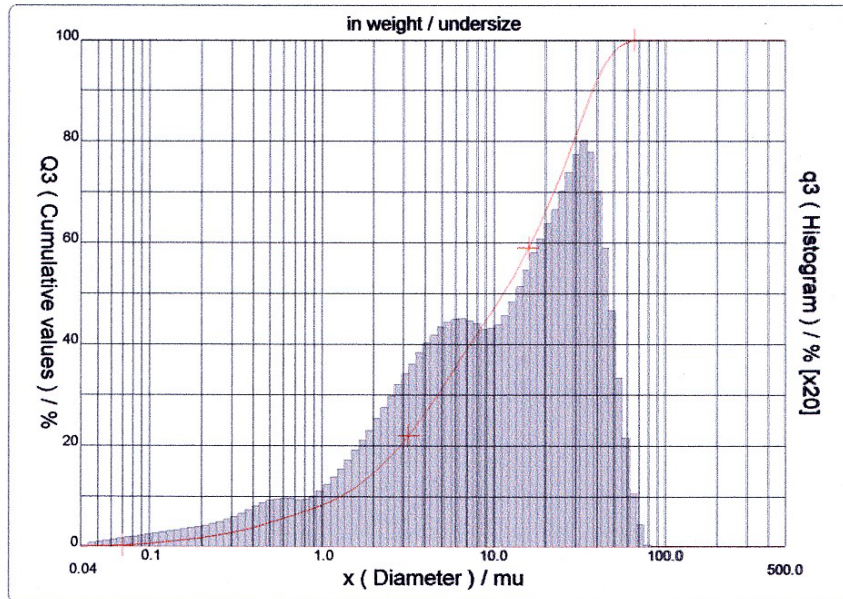
x	3.00	30.00	45.00
Q3	20.84	81.13	95.50

in weight / undersize

x : Diameter / mu    Q3 : Cumulative Value / %    q3 : Population Density / %

User percentages

%	80.00
Q3	29.17



Serial No. : 772    Ref : 2.r115.m112.66A1818/3.30/2245/m53.12.5.10.1Fh.20.5.10.Bh/Q-.0.0.0./300.0.15.g60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.0/V.3.10/830



# PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid



Range : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Sample Ref	: TIPO-1 BOLSA 50 Kg	Ultrasound	: 0	s
Type produit	: CEMENTOS PAOLA RINC	Concentration	: 206	
Client	: PAOLA RINCON- UIS	Diameter at 10%	: 1.29	mu
Comments	: 3 AGOSTO-05	Diameter at 50%	: 11.39	mu
Liquid	: Isopropyl alcohol	Diameter at 90%	: 37.52	mu
Dispersing agent	: No	Mean diameter	: 15.95	mu
Operator	: JORGEMONTAÑA	Fraunhofer		
Company	: CEMENTOS PAZ DEL RIO	Density/Factor	_____	
Location	: Planta Sogamoso	Specific surface	_____	
Date	: 04/08/2005	Time	: 02:11:07AM	
Index meas.	: 2245	Automatic dilution	: No / No	
		Meas./Rinse No.	: 60/60/3	
		SOP	: CEMENTO T-1NORMAL	

Standard classes in weight / undersize

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.28	0.65	1.78	2.77	3.77	4.76	5.64	6.39	7.02
q3	0.00	0.04	0.08	0.12	0.18	0.25	0.32	0.35	0.35	0.34
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	7.62	8.22	8.83	9.45	10.08	10.72	12.01	13.31	14.60	15.89
q3	0.37	0.41	0.46	0.52	0.57	0.63	0.70	0.80	0.89	0.98
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	17.16	18.41	19.64	20.84	22.01	23.15	24.27	25.36	26.42	27.95
q3	1.06	1.13	1.20	1.26	1.32	1.37	1.42	1.46	1.50	1.54
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	29.42	31.29	32.61	33.88	35.47	37.32	39.02	40.59	42.04	43.37
q3	1.58	1.63	1.64	1.67	1.67	1.68	1.67	1.65	1.63	1.59
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	44.63	46.97	49.15	51.25	53.28	55.26	57.19	59.08	60.92	62.70
q3	1.60	1.61	1.66	1.75	1.84	1.94	2.03	2.13	2.20	2.26
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	64.43	66.12	67.76	69.36	70.93	73.98	78.35	81.13	83.79	86.26
q3	2.32	2.39	2.44	2.50	2.56	2.66	2.80	2.93	2.99	2.96
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	88.49	90.47	92.19	94.33	95.50	97.63	98.48	99.09	99.57	99.78
q3	2.83	2.66	2.43	2.15	1.87	1.47	1.06	0.80	0.51	0.31
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	99.91	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.20	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : Diameter / mu    Q3 : Cumulative Value / %    q3 : Population Density / %



## PARTICLE SIZE DISTRIBUTION CILAS 1064 Liquid



Range : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Sample Ref</td><td>: MP-022</td></tr> <tr><td>Type produit</td><td>: CEMENTO CONCRETERA</td></tr> <tr><td>Client</td><td>: T1 M SUPERCEM 2005</td></tr> <tr><td>Comments</td><td>: 8:00 A.M.</td></tr> <tr><td>Liquid</td><td>: Isopropyl alcohol</td></tr> <tr><td>Dispersing agent</td><td>: No</td></tr> <tr><td>Operator</td><td>: JORGEMONTAÑA</td></tr> <tr><td>Company</td><td>: CEMENTOS PAZ DEL RIO</td></tr> <tr><td>Location</td><td>: Planta Sogamoso</td></tr> <tr><td>Date</td><td>: 24/06/2005</td></tr> <tr><td>Time</td><td>: 09:19:55PM</td></tr> <tr><td>Index meas.</td><td>: 2188</td></tr> </table>	Sample Ref	: MP-022	Type produit	: CEMENTO CONCRETERA	Client	: T1 M SUPERCEM 2005	Comments	: 8:00 A.M.	Liquid	: Isopropyl alcohol	Dispersing agent	: No	Operator	: JORGEMONTAÑA	Company	: CEMENTOS PAZ DEL RIO	Location	: Planta Sogamoso	Date	: 24/06/2005	Time	: 09:19:55PM	Index meas.	: 2188	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Ultrasound</td><td>: 0</td><td>s</td></tr> <tr><td>Concentration</td><td>: 206</td><td></td></tr> <tr><td>Diameter at 10%</td><td>: 1.06</td><td>mu</td></tr> <tr><td>Diameter at 50%</td><td>: 10.46</td><td>mu</td></tr> <tr><td>Diameter at 90%</td><td>: 29.50</td><td>mu</td></tr> <tr><td>Mean diameter</td><td>: 13.27</td><td>mu</td></tr> <tr><td>Fraunhofer</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Density/Factor</td><td>_____</td><td></td></tr> <tr><td>Specific surface</td><td>_____</td><td></td></tr> <tr><td>Automatic dilution</td><td>: No / No</td><td></td></tr> <tr><td>Meas./Rinse No.</td><td>: 60/60/4</td><td></td></tr> <tr><td>SOP</td><td>: CEMENTO CONCRETERAS</td><td></td></tr> </table>	Ultrasound	: 0	s	Concentration	: 206		Diameter at 10%	: 1.06	mu	Diameter at 50%	: 10.46	mu	Diameter at 90%	: 29.50	mu	Mean diameter	: 13.27	mu	Fraunhofer			Density/Factor	_____		Specific surface	_____		Automatic dilution	: No / No		Meas./Rinse No.	: 60/60/4		SOP	: CEMENTO CONCRETERAS	
Sample Ref	: MP-022																																																												
Type produit	: CEMENTO CONCRETERA																																																												
Client	: T1 M SUPERCEM 2005																																																												
Comments	: 8:00 A.M.																																																												
Liquid	: Isopropyl alcohol																																																												
Dispersing agent	: No																																																												
Operator	: JORGEMONTAÑA																																																												
Company	: CEMENTOS PAZ DEL RIO																																																												
Location	: Planta Sogamoso																																																												
Date	: 24/06/2005																																																												
Time	: 09:19:55PM																																																												
Index meas.	: 2188																																																												
Ultrasound	: 0	s																																																											
Concentration	: 206																																																												
Diameter at 10%	: 1.06	mu																																																											
Diameter at 50%	: 10.46	mu																																																											
Diameter at 90%	: 29.50	mu																																																											
Mean diameter	: 13.27	mu																																																											
Fraunhofer																																																													
Density/Factor	_____																																																												
Specific surface	_____																																																												
Automatic dilution	: No / No																																																												
Meas./Rinse No.	: 60/60/4																																																												
SOP	: CEMENTO CONCRETERAS																																																												

Customer defined classes

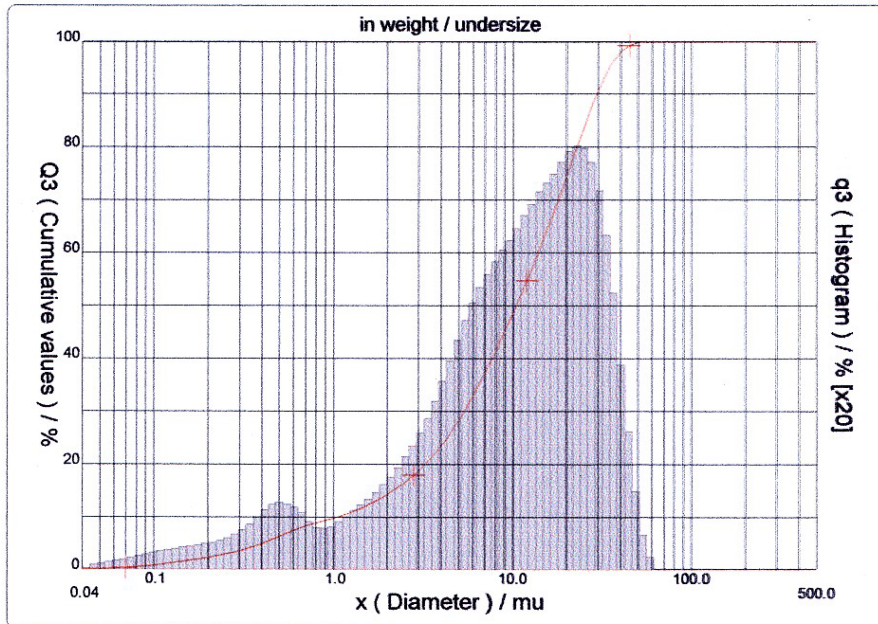
in weight / undersize

x	3.00	30.00	45.00
Q3	18.83	90.61	99.26

x : Diameter / mu    Q3 : Cumulative Value / %    q3 : Population Density / %

User percentages

%	80.00
Q3	22.84



Serial No. : 772      Ref : 2.r115.m112.66A1818/3.30/2188/m41.12.5.10.1Fh.20.5.10.BhQ-0.0.0.0/300.0.15.g60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.Q/V 3.10/630



# PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1064 Liquid



Range : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Sample Ref	: MP-022	Ultrasound	: 0	s
Type produit	: CEMENTO CONCRETERA	Concentration	: 206	
Client	: T1 M SUPERCEM 2005	Diameter at 10%	: 1.06	mu
Comments	: 8:00 A.M.	Diameter at 50%	: 10.46	mu
Liquid	: Isopropyl alcohol	Diameter at 90%	: 29.50	mu
Dispersing agent	: No	Mean diameter	: 13.27	mu
Operator	: JORGEMONTAÑA	Fraunhofer		
Company	: CEMENTOS PAZ DEL RIO	Density/Factor	_____	
Location	: Planta Sogamoso	Specific surface		
Date : 24/06/2005	Time : 09:19:55PM	Automatic dilution	: No / No	
Index meas.	: 2188	Meas./Rinse No.	: 60/60/4	
		SOP	: CEMENTO CONCRETERAS	

Standard classes

in weight / undersize

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.34	0.82	2.28	3.50	4.85	6.26	7.41	8.26	8.83
q3	0.00	0.04	0.10	0.16	0.22	0.35	0.47	0.47	0.41	0.32
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	9.30	9.74	10.19	10.64	11.10	11.56	12.47	13.38	14.29	15.19
q3	0.29	0.31	0.35	0.38	0.42	0.46	0.50	0.57	0.64	0.70
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	16.10	17.01	17.92	18.83	19.75	20.67	21.60	22.54	23.49	24.92
q3	0.77	0.84	0.91	0.97	1.05	1.12	1.20	1.28	1.37	1.46
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	26.36	28.27	29.69	31.09	32.92	35.14	37.27	39.32	41.29	43.19
q3	1.58	1.69	1.80	1.88	1.96	2.05	2.12	2.19	2.25	2.31
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	45.01	48.47	51.72	54.79	57.69	60.45	63.06	65.54	67.91	70.19
q3	2.35	2.42	2.52	2.61	2.68	2.75	2.79	2.84	2.89	2.95
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	72.38	74.49	76.51	78.44	80.28	83.70	88.13	90.61	92.72	94.49
q3	2.99	3.04	3.06	3.06	3.06	3.03	2.89	2.65	2.41	2.16
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	95.92	97.04	97.91	98.84	99.26	99.79	99.93	100.00	100.00	100.00
q3	1.85	1.53	1.25	0.95	0.68	0.37	0.18	0.09	0.00	0.00
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : Diameter / mu    Q3 : Cumulative Value / %    q3 : Population Density / %

## ANEXO L. REGISTRO DE CONDICIONES AMBIENTALES DE LA BODEGA DE SOGAMOSO

FOTO 1. Condiciones tren

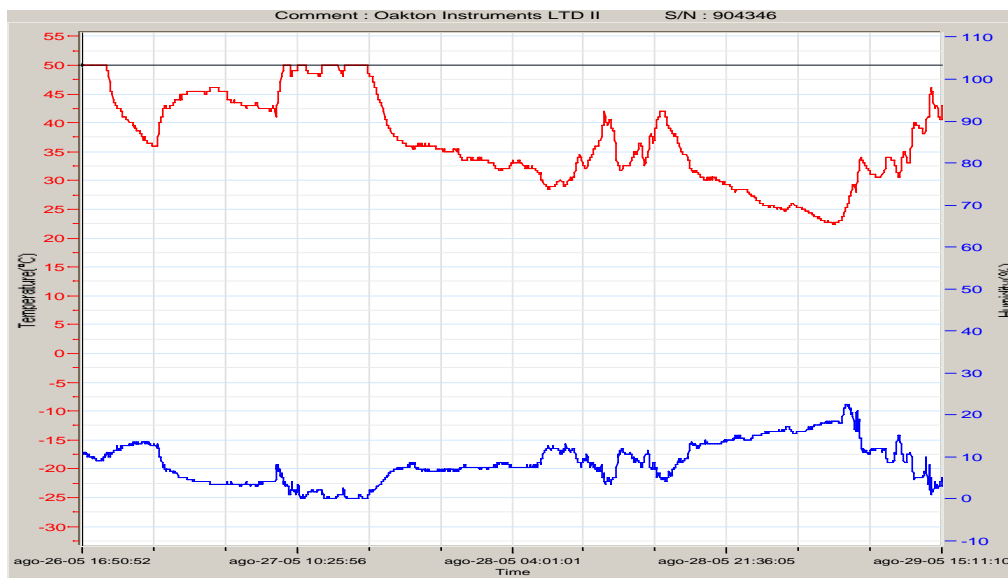


FOTO 2. Condiciones bodega Bogota

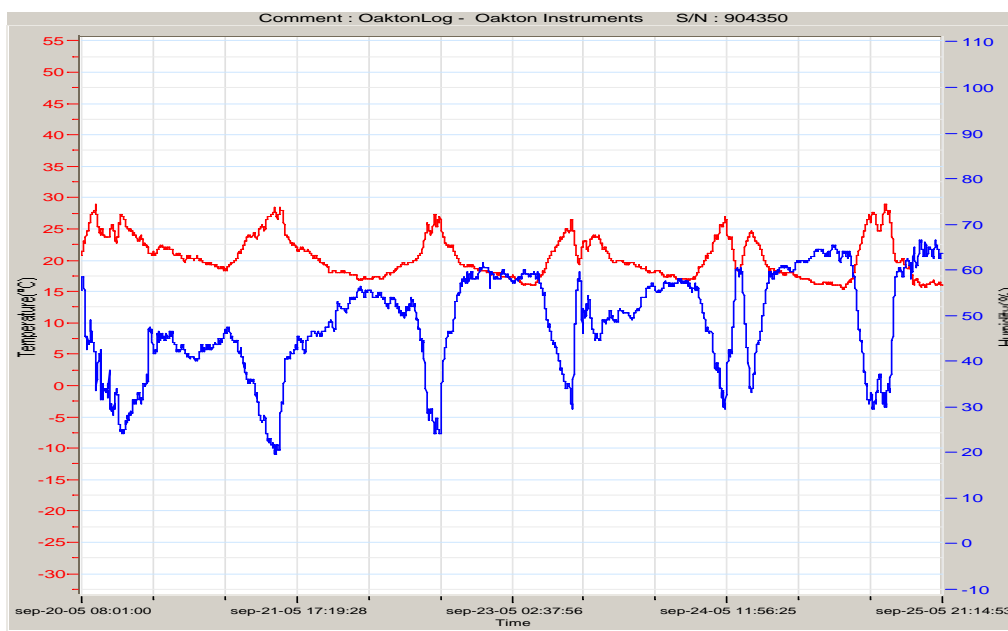


FOTO3 y 4. Condiciones agresivas bodega Sogamoso

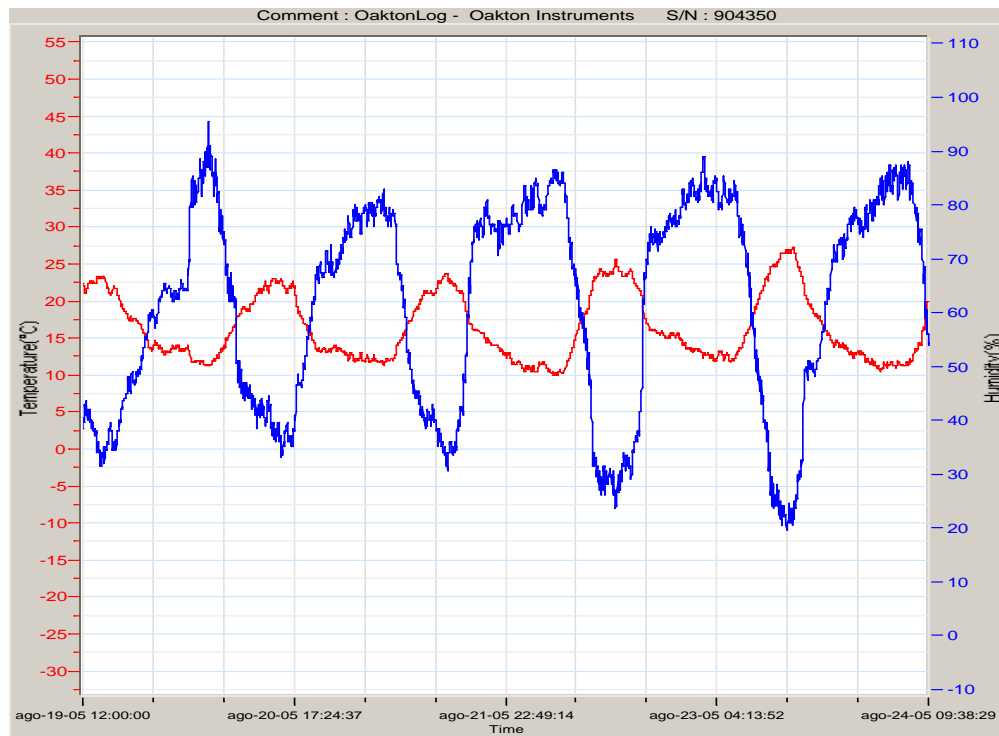
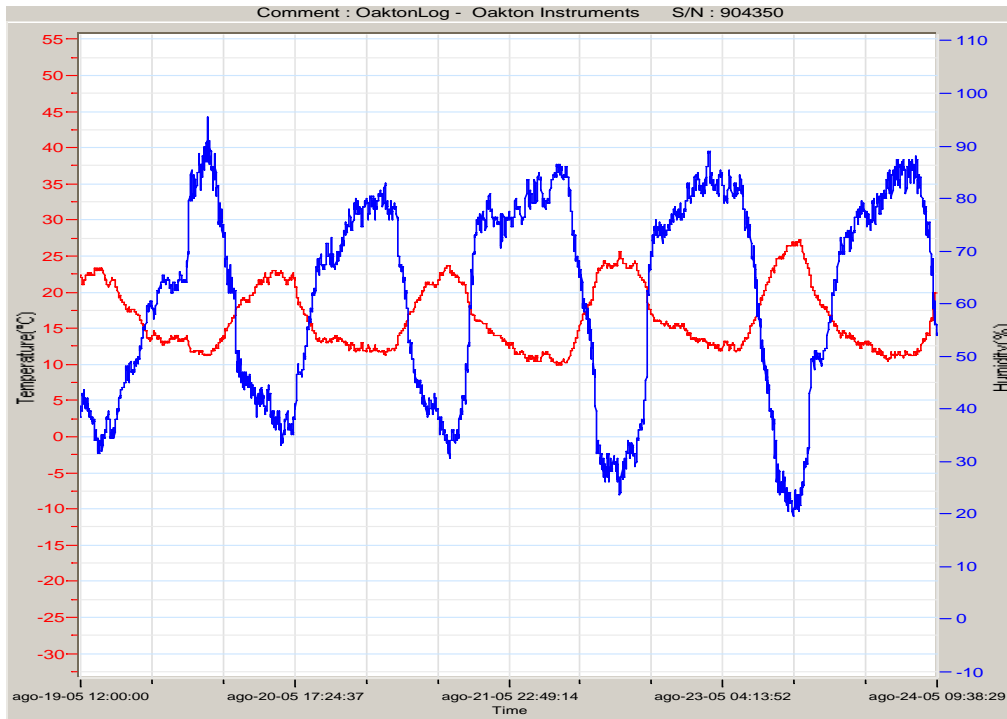


FOTO 5 y 6. Condiciones normales bodega Sogamoso

