



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL EFECTO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO
TIPO USO GENERAL, POR LA ADICIÓN DE PUZOLANA, FLY ASH Y CALIZA, A
DIFERENTE TAMAÑO DE PARTÍCULA**

Katherine Julissa Marroquín Moscoso

Asesorado por el Ing. Emmanuel de Jesús Montufar Cárdenas

Guatemala, octubre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL EFECTO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO
TIPO USO GENERAL, POR LA ADICIÓN DE PUZOLANA, FLY ASH Y CALIZA, A
DIFERENTE TAMAÑO DE PARTÍCULA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

KATHERINE JULISSA MARROQUÍN MOSCOSO
ASESORADO POR EL ING. EMMANUEL DE JESÚS MONTUFAR CÁRDENAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. Alejandro Alejandro Recinos
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**EVALUACIÓN DEL EFECTO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO
TIPO USO GENERAL, POR LA ADICIÓN DE PUZOLANA, FLY ASH Y CALIZA, A
DIFERENTE TAMAÑO DE PARTÍCULA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 23 de febrero de 2015.

Katherine Julissa Marroquín Moscoso

Guatemala, 03 de agosto de 2018

Ing. Qco. Carlos Salvador Wong Davi
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de ingeniería
USAC

Estimado ingeniero Wong Davi:

Por este medio atentamente le informo que como asesor, de la estudiante universitaria **Katherine Julissa Marroquín Moscoso** de la carrera de ingeniería química, que se identifica con el DPI 2860 51583 0207 y con registro estudiantil No. **201314110**; procedí a revisar el informe final de EPS, cuyo título es: **"EVALUACIÓN DEL EFECTO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO TIPO USO GENERAL, POR LA ADICIÓN DE PUZOLANA, FLY ASH Y CALIZA, A DIFERENTE TAMAÑO DE PARTÍCULA"**.

En tal virtud, **LO DOY APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular me suscribo de usted,

Atentamente,



Ing. Emmanuel De Jesús Montufar Cárdenas

Colegiado No. 1986

Asesor de trabajo de graduación

Cementos Progreso, S.A

Emmanuel J. Montufar C.
Ingeniero Químico
Col. 1986



Guatemala, 10 de julio de 2018.
Ref.EPS.DOC.497.07.18.

Inga. Christa del Rosario Classon de Pinto
Directora Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Usac.

Inga. Classon de Pinto:

Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), de la estudiante universitaria **Katherine Julissa Marroquín Moscoso** de la Carrera de Ingeniería Química, con carné No. **201314110**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **“EVALUACIÓN DEL EFECTO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO TIPO USO GENERAL, POR LA ADICIÓN DE PUZOLANA, FLY ASH Y CALIZA, A DIFERENTE TAMAÑO DE PARTICULA”**.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Ing. Sergio Alejandro Recinos
Asesor-Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Química



c.c. Archivo
SAR/ra



Guatemala, 10 de julio de 2018.
Ref.EPS.D.236.07.18.

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

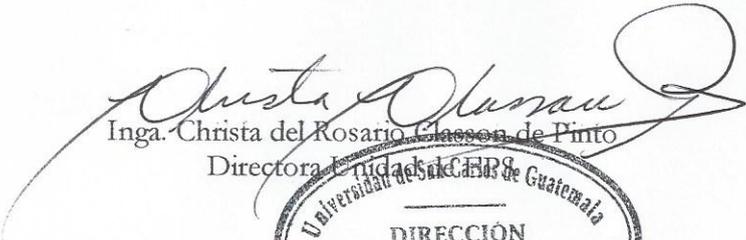
Estimado Ingeniero Wong Davi.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"EVALUACIÓN DEL EFECTO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO TIPO USO GENERAL, POR LA ADICIÓN DE PUZOLANA, FLY ASH Y CALIZA, A DIFERENTE TAMAÑO DE PARTICULA"** que fue desarrollado por la estudiante universitaria Katherine Julissa Marroquín Moscoso, quien fue debidamente asesorada por el Ing. Emmanuel Montufar y supervisada por el Ingeniero Sergio Alejandro Recinos.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor y del Supervisor de EPS, en mi calidad de Directora apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"


Inga. Christa del Rosario Glasen de Pinto
Directora Unidad de EPS



CdRCdP/ra



Guatemala, 20 de agosto de 2018.
Ref. EIQ.TG-IF.030.2018.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **075-2017** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Ejercicio Profesional Supervisado con Seminario de Investigación-

Solicitado por la estudiante universitaria: **Katherine Julissa Marroquín Moscoso**.
Identificada con número de carné: **2860 51583 0207**.
Identificada con registro académico: **2013-14110**.
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DEL EFECTO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO TIPO USO GENERAL, POR LA ADICIÓN DE PUZOLANA, FLY ASH Y CALIZA, A DIFERENTE TAMAÑO DE PARTÍCULA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Emmanuel De Jesús Montufar Cárdenas**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Inga. Marlene Susana Arrechea Alvarado
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Agencia Centroamericana de Acreditación de
Sistemas de Arquitectura y de Ingeniería





Ref.EIQ.TG.032.2018

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del **Ejercicio Profesional Supervisado (EPS final) de la carrera de Ingeniería Química** del (la) estudiante, **KATHERINE JULISSA MARROQUÍN MOSCOSO** titulado: **"EVALUACIÓN DEL EFECTO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO TIPO USO GENERAL, POR LA ADICIÓN DE PUZOLANA, FLY ASH Y CALIZA, A DIFERENTE TAMAÑO DE PARTÍCULA"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director

Escuela de Ingeniería Química

FACULTAD DE INGENIERIA USAC
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
DIRECTOR

Guatemala, octubre de 2018

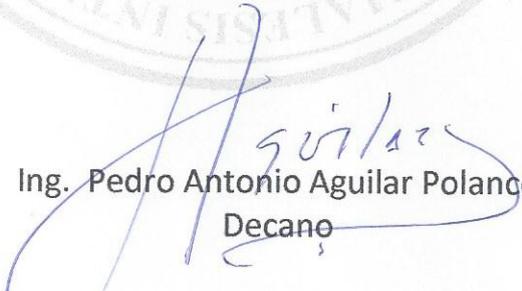
Cc: Archivo
CSWD/ale



DTG.406.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL EFECTO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO TIPO USO GENERAL, POR LA ADICIÓN DE PUZOLANA, FLY ASH Y CALIZA, A DIFERENTE TAMAÑO DE PARTÍCULA**, presentado por la estudiante universitaria: **Katherine Julissa Marroquín Moscoso**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, octubre de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por iluminar mi vida, por bendecirme, guiarme y permitirme lograr esta meta.
- Mis padres** Julio Marroquín y Sandra Moscoso, por su apoyo incondicional, comprensión y sobre todo por su amor a lo largo de mi vida. Son mi inspiración para seguir adelante. Los amo.
- Mis hermanos** Eduardo Marroquín y Diego Marroquín, por apoyarme, darme ánimos en todo momento y por su cariño. Los quiero mucho hermanitos.
- Demás familia** Por todo su cariño mostrado y por estar presente en mi vida. A mis abuelos paternos y maternos por sus consejos de vida, en especial a mi abuelita Alicia Ruiz que está en el cielo.
- Mis amigos** Por compartir mi carrera universitaria, por influir en mi vida, por su paciencia, apoyo y tolerancia a lo largo de estos años.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser mi centro de estudios y por todos los conocimientos brindados que son la base para desarrollarme profesionalmente.

**Facultad de Ingeniería,
Escuela de Ingeniería
Química**

Gracias a todos los catedráticos por transferirme sus valiosas enseñanzas.

Dios

Por permitirme llegar a este momento tan importante en mi vida. Por cuidarme a lo largo de los años.

Mis padres

Por darme la oportunidad de tener una carrera universitaria, por todos sus esfuerzos y sacrificios para que sus hijos tengan lo mejor. Por mi educación moral y ética.

Mis hermanos

Por su paciencia y apoyo incondicional. Por estar siempre unidos en familia.

Cementos Progreso S,A

Por permitirme realizar mi EPS en el centro de investigación y desarrollo y por brindarme la oportunidad de iniciar a desarrollarme profesionalmente.

Mi asesor

Emmanuel Montufar, por compartirme sus conocimientos y por su apoyo en la ejecución de este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Cemento.....	7
2.1.1. Proceso de producción	7
2.1.2. Cemento hidráulico adicionado.....	8
2.1.3. Propiedades fundamentales del cemento.....	10
2.2. Materias utilizadas como adiciones	11
2.2.1. Ceniza volante (<i>flay ash</i>)	11
2.2.2. Puzolana natural.....	12
2.2.3. Caliza.....	13
2.3. Reacción puzolánica	14
2.3.1. Calor de hidratación.....	15
2.4. Molienda	16
2.4.1. Principios	17
2.4.2. Molienda del cemento.....	17
2.5. Empaquetamiento de partículas	18

2.5.1.	Teoría del empaquetamiento de partículas	19
2.6.	Partículas finas.....	19
2.7.	Hidratación de cemento portland con rellenos	20
2.8.	Norma ASTM C 186, Método de prueba de la determinación del calor de hidratación del cemento hidráulico.....	23
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	25
3.1.	Variables	25
3.2.	Delimitación de campo de estudio	25
3.3.	Recursos humanos disponibles	26
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	27
3.4.1.	Material y equipo	27
3.4.2.	Reactivos.....	28
3.5.	Técnica cuantitativa.....	29
3.5.1.	Análisis de materia prima	29
3.5.2.	Preparación premolienda	29
3.5.3.	Molienda.....	30
3.5.4.	Mezcla de cemento	31
3.5.5.	Ensayo de resistencia a la compresión	31
3.5.5.1.	Espécimen mezcla testigo (material de relleno) Según la norma Coguanor 41003 h4 (2012)	31
3.5.5.2.	Determinación de flujo en morteros Norma Coguanor 41003 h13 (2013).....	32
3.5.5.3.	Almacenamiento de especímenes	33
3.5.6.	Prueba de resistencia a la compresión (Norma Coguanor 41003 h4 , 2012).....	34
3.5.7.	Ensayo calor de hidratación	35

3.5.8.	Ensayo calor de hidratación en 24 horas (cal-Metrix).....	36
3.5.9.	Ensayo tamaño y distribución de partícula	36
3.5.10.	Ensayo químico	37
3.5.11.	Ensayo de avance de hidratación del cemento	38
	3.5.11.1. Difracción de rayos X.....	38
	3.5.11.2. Análisis termo gravimétrico.....	38
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	39
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	42
3.8.	Análisis estadístico	46
4.	RESULTADOS	51
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	59
	CONCLUSIONES	67
	RECOMENDACIONES	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	71
	APÉNDICES	77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Proceso de fabricación del cemento.....	9
2.	Calor de hidratación.....	16
3.	Diagrama de flujo del procedimiento	40
4.	Formato del tamaño de la partícula versus porcentaje acumulado de la partícula	45
5.	Formato de porcentaje de alita y belita versus días de hidratación del cemento	45
6.	Formato del análisis termogravimétrico	46
7.	Desarrollo de la resistencia a la compresión del cemento formulado.....	52
8.	Potencia liberada por gramo de cemento	53
9.	Calor de hidratación del cemento a 24 horas	54
10.	Curva granulométrica acumulada de los cementos.....	55
11.	Porcentaje de alita versus la edad de hidratación a distinto tamaño de partícula.....	55
12.	Porcentaje de belita versus la edad de hidratación a distinto tamaño de partícula	56
13.	TGA del cemento de referencia.....	56
14.	TGA cemento, prueba 1	57
15.	TGA cemento, prueba 2	57
16.	TGA cemento, prueba 3.....	58

TABLAS

I.	Composición del cemento en general.....	10
II.	Clasificación del tamaño de las partículas	20
III.	Lista de variables manipuladas.....	25
IV.	Descripción de pruebas realizadas.....	26
V.	Prueba de resistencia	34
VI.	Formato del tiempo de molienda hasta alcanzar ≥ 80 % de fineza	43
VII.	Formato de fineza alcanzada.....	43
VIII.	Formato de resistencia a la compresión del cemento tipo uso general ...	43
IX.	Formato de calor de hidratación	44
X.	Formato del análisis de fluorescencia por rayos X.....	44
XI.	Formato del análisis químico por difracción de rayos x	44
XII.	Tiempo de molienda (minutos) hasta alcanzar ≥ 80 % de fineza	51
XIII.	Fineza alcanzada por las adiciones	51
XIV.	Resistencia a la compresión del cemento tipo uso general formulado [PSI].....	51
XV.	Calor de hidratación.....	53

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
C₃S	Alita
C₃A	Aluminato tricálcico [3CaO Al ₂ O ₃]
TGA	Análisis Termogravimétrico (<i>thermal gravimetric analysis</i>)
C₂S	Belita
DRX	Difracción de rayos X
PSD	Distribución de tamaño de partícula
CH	Hidróxido de calcio
h	Horas
Lb/s	Libras por segundo
\bar{x}	Media de los datos
μm	Micrómetros
ml	Mililitros
N/S	Newton por segundo
N	Normalidad (equivalentes-gramo/litro solución)
N	Número de datos
C-S-H	Silicato cálcico hidratado
$\sum X_i$	Sumatoria de los datos
cm²/g	Unidad de blaine (centímetro cuadrado dividido en gramos)
m²/Kg	Unidad de blaine (metro cuadrado dividido en kilogramos)

MPa

Unidad de medida de presión, Es la fuerza que se aplica en una determinada superficie (megapascal, Kg/m s^2)

KJ/Kg

Unidad de calos específico (kilojulio dividido en kilogramo)

GLOSARIO

Alita	Silicato tricálcico [$3\text{CaOSiO}_2, \text{C}_3\text{S}$].
ASTM	Por sus siglas en inglés, American Society for Testing and Materials, organismo de normalización sobre las características y comportamiento de materiales en distintas industrias.
Belita	Silicato bicálcico [$2\text{CaOSiO}_2, \text{C}_2\text{S}$].
Blaine	Es el tamaño de partícula o la finura de un cemento en cm^2/g o m^2/kg .
Caliza	Tipo de roca formada por sedimentación que se encuentra integrada en su mayoría por carbonato de calcio entre los que destaca la calcita.
Cantera	Explotaciones de la minería que se llevan a cabo a cielo abierto, por ejemplo, piedra caliza.
Cemento Portland	Es un cemento hidráulico producido por la pulverización del clinker, que contiene agua, sulfatos de calcio, hasta 5 % de caliza y otros componentes minerales minoritarios y aditivos del proceso.

Cemento hidráulico adicionado	Es un cemento consistente de dos o más ingredientes inorgánicos que contribuyen a las propiedades de desarrollo o ganancia a la resistencia de la compresión.
Cemento de uso general (TIPO GU)	Debe utilizarse en toda clase de obras, donde no se requieran otros tipos de cementos con propiedades especiales. A 28 días debe tener una resistencia a la compresión de 4 060 PSI.
Cenosfera	Es una esfera hueca, inerte y ligera llena de aire inerte o gas que se genera normalmente como subproducto de la combustión de carbón.
CETEC	Centro tecnológico
Cizallamiento	Fuerza entre dos o más superficies sólidas moviéndose en direcciones opuestas.
COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas.
Corte	Fuerza entre dos o más superficies, al menos uno fijo y el otro en movimiento.
Difracción de rayos X (DRX)	Es una técnica de análisis de la estructura atómica basada en la interacción de los rayos X con la materia. Sirve para determinar elementos nuevos y desconocidos.

Etringita	Es un mineral sulfato, específicamente sulfoaluminato de cálcico hidratado.
Factor clinker	Es un indicador que mide la proporción de clinker en el cemento. El clinker es una mezcla mineralógica (caliza y esquistos) sometida a altas temperaturas.
Finura	La finura del cemento es una propiedad física muy importante para el cemento, se mide por sus residuos en los tamices.
<i>Fly ash</i>	Ceniza volante procedentes de los residuos de la combustión de carbón.
Flexotracción	Aplicación de dos cargas iguales y simétricas sobre un elemento estructural o probeta.
Fraguado	Es el proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad del cemento, producido por la desecación y recristalización de los hidróxidos metálicos, procedentes de la reacción química del agua de amasado con los óxidos metálicos presentes en el clinker que compone el cemento.
Fricción	Fuerza entre dos superficies sólidas, causada por la presión vertical de una superficie y el movimiento simultáneo.

Gel	Es el principal producto de la hidratación de los silicatos del cemento y que además confiere al producto final sus propiedades adherentes y mecánico-resistentes.
Índice de molturabilidad	Molturabilidad relativa de minerales y menas en comparación con carbón normalizado, elegido como molturabilidad 100, determinada mediante un pulverizador miniatura de anillo de bolas.
Presión	Fuerza que se aplica entre dos superficies sólidas.
Puzolana natural	Son materiales silíceo - amorfos o aluminio - silíceos quienes por sí solos poseen poco o ningún valor cementante.
Tamiz	Instrumento formado por un aro y una red tensada muy tupida que sirve para hacer pasar por el material.
TIPO GU	Cemento uso general

RESUMEN

En el presente proyecto de investigación se consideró como objetivo evaluar el efecto de la resistencia a la compresión a 1, 3, 7, 28 56 días para el cemento tipo uso general adicionado con puzolana, caliza y ceniza volante a diferente tamaño de partícula para vincular su comportamiento del proceso de hidratación y de la distribución del tamaño.

Para obtener las adiciones finas se molieron con un molino de bolas; se realizaron cambios en la distribución del tamaño de bola hasta llegar a la fineza requerida. Posteriormente, se realizó una mezcla con el cemento tipo I, para desarrollar el cemento tipo uso general. Se procedió a realizar los ensayos químicos y la caracterización de las muestras por medio de difracción de rayos X (DRX), residuo insoluble, calorimetría y colorimetría y físicos (finura, Blaine y resistencia a la compresión).

Se confirmó que al aumentar 5 % la fineza de las adiciones al cemento tipo GU aumenta 5 % la resistencia a la compresión sin afectar sus propiedades químicas, silicato cálcico, aluminatos ferratos; que genera una disminución del factor clinker y, por ende, las emisiones al ambiente.

OBJETIVOS

General

Evaluar el efecto en la resistencia a la compresión en un cemento tipo uso general; con el uso de adiciones finas de puzolana natural, caliza y ceniza volante, con la variación del tamaño de partícula.

Específicos

1. Determinar el tiempo de molienda separada de caliza, puzolana natural y ceniza volante para alcanzar mayor o igual a 80 % de tamaño de partícula de 30, 35, 40 y 45 micrómetros para cada molienda.
2. Analizar el tamaño óptimo de la partícula de las adiciones (puzolana natural, caliza y ceniza volante) que producen el mejor desarrollo de la resistencia a la compresión a distintas edades (1, 3, 7, 28 y 56 días).
3. Determinar el calor de hidratación con base en la norma ASTM C 186 a 7 y 28 días y con el equipo Cal-Metrix del cemento formulado para cada tamaño de la partícula de las adiciones, puzolana natural, caliza y ceniza volante.
4. Monitorear el avance de hidratación del cemento formulado para cada tamaño de la partícula de las adiciones, puzolana natural, caliza y ceniza volante, a las edades de 1, 3, 7, 28 y 56 días con un análisis termogravimétrico y difracción de rayos X.

HIPÓTESIS

Hipótesis de investigación nula (Ho)

No existe diferencia significativa entre los valores de resistencia a la compresión para las muestras a diferentes edades del cemento tipo uso general a diferente tamaño de la partícula.

$$R_{Dp11}=R_{Dp12}=R_{Dp13}=R_{Dp14}$$

Hipótesis de investigación alternativa (Hi)

Existe diferencia significativa entre los valores de la resistencia a la compresión para las muestras a diferentes edades del cemento tipo uso general a diferente tamaño de la partícula.

$$R_{Dp11}\neq R_{Dp12}\neq R_{Dp13}\neq R_{Dp14}$$

INTRODUCCIÓN

El cemento se obtiene de la molienda de clinker junto con yeso y otros materiales que funcionan como adiciones para brindarle mejores propiedades mecánicas.

Los materiales adicionales o de relleno que se utilizan son los que poseen propiedades mineralógicas y químicas silico-aluminatos para que reaccionen con el hidróxido de calcio que posee el clinker durante el fraguado, para que se de en una mayor proporción la reacción puzolánica y así se mejore la resistencia a la compresión temprana y tardía.

Sin embargo, esta reacción puzolánica depende de varios factores: finura de la partícula, distribución y propiedades químicas del material adicional. Por lo anterior, es sumamente importante la teoría de empaquetamiento de partículas ya que brinda información sobre una buena distribución de partículas durante el fraguado; ya que lo que se pretende es que el material adicional sirva como relleno para que al entrar en contacto con agua todo el material logre reaccionar.

Previamente, se han realizado estudios sobre el efecto del tamaño de la partícula; cabe mencionar, uno de los resultados más alentadores se realizó utilizando *fly ash* con tamaño de la partícula menores a 16 micrómetros con la variación de la dosificación de las adiciones en el cemento alcanzó una mejora la resistencia a la compresión a 3 días 12,6 %, 6,6 % y 6,6 %.

El propósito de este estudio fue evaluar el efecto de la resistencia a la compresión a diferentes edades de un cemento tipo uso general variando el tamaño de partícula fina (30, 35, 40 y 45 micrómetros) de los materiales utilizados como adiciones, para fines del presente puzolana natural, caliza y ceniza volante. Para mejorar la resistencia a la compresión a edades tempranas y tardías.

Se formuló un cemento adicionado con partículas finas para que su producción a nivel industrial sea beneficiosa para la empresa, económicamente, bajando el factor clinker y aumentando la satisfacción del cliente con mayores resistencias en sus obras.

Para medir dicho efecto del tamaño de partículas, primeramente, se molió por separado la materia prima (puzolana, caliza y ceniza volante) en un molino de bolas, realizando cambios a la relación del tamaño de bolas hasta alcanzar mínimo 80 % de fineza pasante deseada. Seguidamente, se realizó la mezcla de las adiciones para formular un cemento tipo uso general y luego realizar morteros y ensayarlos con la prueba de resistencia a la compresión a las edades de 1, 3, 7, 28 y 56 días; así mismo, se realizó la prueba de calor de hidratación a 7 y 28 días con base en la norma ASTM C 186 y con el equipo CALMETRIX (24 horas).

Esta investigación es novedosa para la empresa cementera nacional ya que actualmente no se produce ningún tipo de cemento con dicho tamaño de partícula de las adiciones.

1. ANTECEDENTES

En el campo de investigación del estudio de partículas finas y ultrafinas de materiales de adición al cemento se han realizado diversas pruebas las cuales se describen a continuación:

En el año 1994, James F., Heathman; Oklahoma, Oakview Drive Duncan; Ronald J. Crook; Oklahoma, Canary Duncan. Realizaron una investigación sobre el tema publicado en Europa Tamaño de partícula fina de la composición del cemento identificado con la patente 0 611 081 A 2.

En una zona subterránea penetrada por un pozo, cuya composición comprende un sistema hidráulico de granulometría fina del cemento donde que las partículas son de un tamaño no superior a 30 micras y tienen una fina blaine no menos que 6 000 centímetros cuadrados por gramo. Un material puzolánico de tamaño de partícula fina que, en presencia del agua, se combina con hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) liberado por la hidratación del cemento hidráulico, donde las partículas son de un tamaño no superior a 30 micras y tienen una fineza Blaine no menor de 5 000 centímetros cuadrados por gramo; estando presente el material puzolánico en la composición en una cantidad de 20 % a 90 % en peso del cemento en el mismo y suficiente agua para formar una suspensión bombeable.

En el año 2010 Carsten Vogt de la universidad de Architecture and the Built Environment de la Division of Concrete Structures del Royal Institute of Technology desarrolló una tesis doctoral sobre las partículas ultrafinas en

concreto y cemento, Influencia de las partículas ultrafinas en las propiedades del hormigón y aplicación al diseño de mezcla de hormigón.

En dicha investigación se realizó un concreto con agregados ultrafinos en la cual se logró determinar que la resistencia a la compresión y la cantidad de agua requerida aumentaron y disminuyeron, respectivamente.

En 2013 en Ucrania; SANYTSKY, Myroslav; BOHDAN, Rusyn HALBINIAK, Jacek y SZYMÁNSKA, Joanna estudiaron el efecto de la activación mecánica de molienda del *fly ash* de su manipulación y control como adiciones en materiales cementosos.

Realizaron molienda con tamaños menores de 45 micrómetros determinando que el 30 % de adición de *fly ash* es aún aceptable para no afectar la resistencia a la compresión y que su activación de la propiedad cementante es mejor activarla de manera mecánica que química.

En el mismo año 2013 en China, el Instituto de investigación en Ciencia de la Construcción Jiangsu presentó estudio Optimización de relleno de piedra caliza ultra-fino en la composición de grano de cemento estudió la distribución de la piedra caliza como relleno; llegó a la conclusión de que entre mejor tenga una distribución mejor será la resistencia a la compresión ya que todos los espacios vacíos son rellenos con partículas ultrafinas, con más resistencia al flujo y más viscosidad plástica desde el punto de vista geológico.

En el año 2015 en China, en la Universidad de Minería y Tecnología en Begin, Jihui Zhao, Dongmin Wang, Xueguang Wang, Shucong Liao, Hui Lin, realizaron una investigación sobre El impacto de las partículas características

de las cenizas volantes ultrafinas y propiedades del cemento mezclado conteniendo ceniza volante ultrafina.

El estudio consistió en preparar cemento con diferentes tamaños de partícula, así como con distintas dosificaciones de ceniza volante; 20 % en peso, 30 % en peso y 40 % en peso de cenizas volantes mejorando la resistencia a la compresión a 3 días en un 12,6 %, un 6,6 % y un 6,6 %, respectivamente; 28 días se incrementó en un 6,5 %, un 9,3 % y un 10,5 %, respectivamente. También, que el contenido de partículas de menos de 16 μm incrementa la fluidez y el grado de hidratación.

En 2016 Dung Ta Ngoc, Mai Pham Thanh, y Duong Tran Hong de la universidad Science and Technology No. 1, Dai Co Viet, Hai Ba Trung, Hanoi en Vietnam estudiaron el efecto de la partícula ultrafina de caliza en las propiedades del cemento portland. Utilizaron tamaños de partícula de 2 a 3 μm de caliza como relleno; la investigación demostró que al utilizar polvo de caliza ultrafina con una cantidad razonable, la resistencia temprana del cemento aumenta 20 %.

Por su parte, en Guatemala, para Cementos Progreso en 2016, Claudia Denise Galindo realizó un estudio sobre la comparación de la forma de partícula de diversos materiales (esferas de látex, mármol molido, cloruro de sodio (NaCl) y puzolana); se analizó por medio de una técnica de orientación aleatoria, utilizando el equipo Micromeritics Particle Insight Dynamic Image Analyzer y un microscopio electrónico, con el uso de luz transmitida sin polarización.

En dicha investigación logró expresar la forma de las partículas de los materiales en términos de circularidad, elíptica, rectangular. Así mismo,

encontró que el tipo de molino donde se realice la molienda influye en la forma que presentarán los materiales.

En el año 2017 Liu Jun, Wu Kewei, Wang Yufei y Yang Yuanquan de las universidades School of Materials Science y Dalian University of Technology, de China estudiaron los Efectos de la mezcla fly ash / diatomite con variable tamaños de partículas en las propiedades mecánicas y porosidad del cemento.

En dicho experimento se estudió la mezcla de ceniza volante y diatomita con tamaños de partícula variables. Los efectos de las distribuciones del tamaño de la partícula de las adiciones sobre las propiedades mecánicas y la porosidad del concreto. La relación entre la distribución de tamaño de la mezcla y la porosidad del hormigón se obtuvo con base en el análisis de regresión de los datos. Los resultados mostraron que las resistencias a la compresión y a la flexión del concreto a 3 y 7 días aumentan con la disminución del tamaño de la partícula de la mezcla. Con respecto al concreto en 14 días, disminuye el tamaño de partícula.

En el año 2018 Shaolong Liua, Tongsheng Zhangabc, Yiqun Guoa, Jiangxiong Weiab, Qijun Yuab estudiaron el Efecto de las partículas los materiales con propiedades cementicias sobre la resistencia a la compresión de la pasta de cemento diseñada microestructuralmente: efecto característico inherente, efecto de refinamiento del tamaño de la partícula y efecto de hidratación.

En dicha investigación se experimentó con la variación del tamaño de la partícula de la escoria granulada de alto horno, la ceniza volante y la arena de cuarzo; se realizaron ensayos cuantitativos para observar el comportamiento de la resistencia a la compresión. Se determinó que la resistencia a la compresión

relacionada con el efecto de refinamiento del tamaño de partícula aumentó a 4,2 MPa cuando el diámetro del 50 % de las partículas de los materiales con propiedades cementicias estudiados disminuyó a 2,4 μm . Las resistencias a la compresión relacionadas con el efecto de hidratación del clinker, la escoria granulada y la ceniza volante pueden ser tan altas como 30,8 MPa, 22,5 MPa y 9,1 MPa, respectivamente.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Cemento

El cemento portland es la escoria o clinker (es decir, se parece al vidrio), que se obtiene como resultado de la calcinación de una mezcla de arcilla o silicatos dihidratados y piedra caliza, cuyo componente principal es el carbonato de calcio (CaCO_3) o bien de una mezcla de materiales semejantes.

Este clinker al pulverizarse y agregársele algunos materiales adicionales como: sulfato de calcio (CaSO_4 ; yeso), caliza y puzolana natural se transforma en un material que fragua.

2.1.1. Proceso de producción

El proceso de fabricación puede ser dividido en tres etapas principales: la preparación de las materias primas, su calcinación en hornos especiales y el molido del clinker para obtener el cemento en polvo.

La primera etapa en la fabricación del cemento la constituye la extracción, de las canteras, de las materias primas y su mezclado con agua para asegurar su mezcla íntima.

La piedra caliza, una vez sacada de la cantera, es molida finamente y mezclada con arcilla y agua, y el barro resultante pasado por un molino de bolas que vuelve a molerlo. El barro resultante lo transfiere a un largo horno rotativo donde sufrirá varios cambios químicos y el resultado será el clinker.

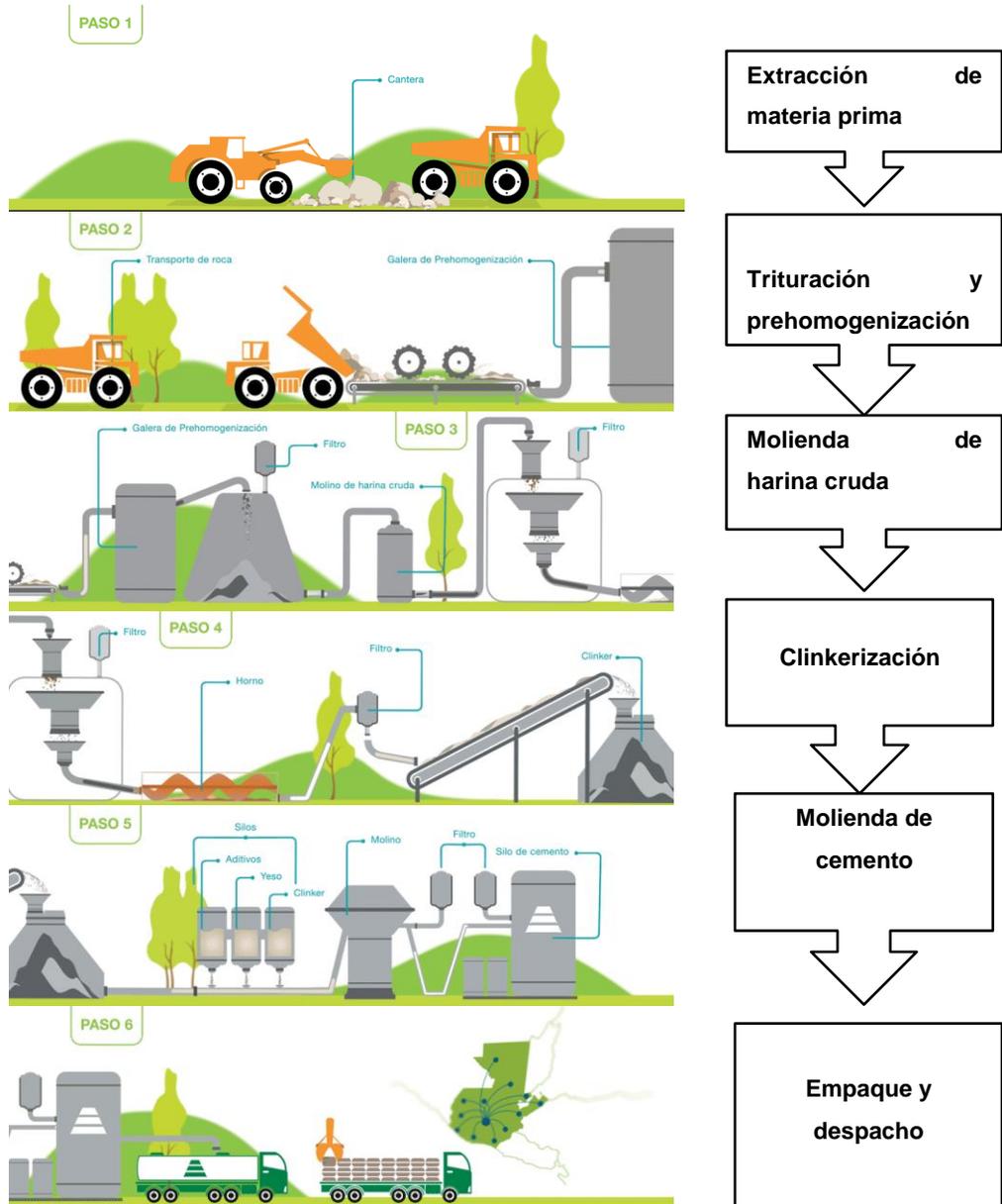
A continuación, este clinker es almacenado hasta que se lo necesite para molerlo. Antes y durante la molienda se agrega una determinada cantidad de yeso (sulfato de calcio; CaSO_4), el cual sirve para ajustar la velocidad de fraguado del cemento después que se le agrega agua.

En los molinos, las piedras de clinker son finamente pulverizadas. En esta etapa puede agregársele adiciones para mejorar sus propiedades. Luego, el polvo es llevado mediante bombas neumáticas a grandes silos, listo para ser retirado.

2.1.2. Cemento hidráulico adicionado

Según la norma Coguanor NTG-41095, el cemento hidráulico adicionado consiste en la mezcla de dos o más constituyentes inorgánicas (al menos uno de los cuales no es cemento portland o clinker portland) que separadamente o combinados contribuyen a las propiedades de desarrollo o de ganancia de resistencia del cemento, con o sin otros ingredientes, aditivos de proceso o aditivos funcionales. Los cementos hidráulicos adicionados pueden ser producidos por molienda conjunta o por otros procesos de mezclado.

Figura 1. **Proceso de fabricación del cemento**



Fuente: *Proceso de fabricación del cemento*. <http://www.cempro.com/index.php/quienes-somos/procesos-de-produccion/proceso-de-produccion-de-cemento>. Consulta: 14 de abril de 2018.

2.1.3. Propiedades fundamentales del cemento

La calidad del cemento depende del comportamiento y las propiedades de la pasta cementante, estas se derivan fundamentalmente de la composición química del clinker y de la finura del cemento de molienda.

El cemento al ser amasado con agua se solidifica. Se dice entonces que el cemento fragua. El fraguado dura alrededor de una hora, dependiendo del tipo de cemento; una vez terminado, la resistencia del cemento aumenta en forma lenta y progresiva.

El proceso de endurecimiento dura meses y años, pero al cabo de los 28 días de terminado el fraguado, el material alcanza un 70 por ciento de la máxima resistencia que adquiere durante su vida útil.

El cemento se compone de la siguiente forma:

Tabla I. **Composición del cemento en general**

Fórmula	Nombre	Notación abreviada
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato dicálcico	C_2S
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato tricálcico	C_3S
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato tricálcico	C_3A
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	Alumino ferrito tetracálcico	C_4AF
MgO	Óxido de magnesio	M

Fuente: elaboración propia.

2.2. Materias utilizadas como adiciones

En el proceso de molienda para la elaboración del cemento hidráulico adicionado, el clinker puede ser mezclado o pulverizado con materiales que le ayuden a mejorar sus propiedades; en general se buscan materias que formen silicato cálcico hidratado (C-S-H), el responsable de la resistencia mecánica del cemento. La utilización de las adiciones al clinker en los cementos tienen tres razones principales: tecnológico, económico y ecológico.

De orden tecnológico, por cuanto que los cementos con adiciones hablando, en general, carecen de algunas deficiencias de los cementos portland ordinarios en determinados aspectos; aporta en cambio otras ventajas, por ello, más recomendables que los propios cementos portland para multitud de usos específicos bien definidos.

De orden ecológico, ya que la utilización de escorias siderúrgicas y de cenizas volantes de centrales termoeléctricas ayudando en este sentido al medio ambiente.

De orden económico, puesto que dicha utilización, por una parte, aprovecha subproductos desechados que aún contienen masa y energía potencial recuperables y de menor costo; por otra parte, por cuanto que ahorra materias primas y energía térmica para la fabricación del clinker. De esta manera, reduce los costos de la fabricación del cemento.

2.2.1. Ceniza volante (*flay ash*)

Llamadas así primero (traducción del inglés *fly-ash* o *fiying-ash*), procedentes de la combustión de carbones antracíticos, bituminosos, subbituminosos o ligníticos; por orden de mayor a menor poder calorífico y de

menor a mayor contenido de volátiles. Las cenizas constituyen un tipo de adición activa en el que aportan de forma simultánea los dos tipos de acción: química (puzolánica) y física (dispersante), a más de una acción sustitutiva o complementaria de finos en el cemento.

Al empleo de las cenizas le es atribuible también una finalidad económica de doble vertiente: ahorro de clinker y, por consiguiente, de energía de combustibles, electricidad y de materias primas en la fabricación de cemento, cuando se utilizan molidas y/o mezcladas con el clinker en fábrica. La composición de las cenizas suele ser bastante constante en las de una misma central térmica, procedentes de carbones análogos, pero no en cuanto a su contenido de carbón pérdida al fuego, ya que este depende de las condiciones de la combustión, las cuales pueden variar incluso dentro de una misma central termoeléctrica.

En el presente trabajo se utilizará entre un 4 % y 6 % de adición de ceniza volante al cemento tipo I; ya que, al sobrepasar cierto porcentaje de adición, en la realización de la mezcla (cemento-agua-agregados para preparar concreto) se observa una nata negra; de la cual el cliente suele pensar que se le vendió producto de mala calidad, cuestión que es por la ceniza volante, pero con excelentes resistencias.

2.2.2. Puzolana natural

Las puzolanas llamadas naturales, pueden ser rocas volcánicas de naturaleza diversa: traquítica alcalina, pumacítica, tobácea, etc.; también, rocas de origen orgánico: tierras de diatomeas (algas) o de infusorios (protozoos radiolarios) de carácter fósil, con naturaleza y composición a base de sílice activa.

La composición química y mineralógica de las puzolanas en general es muy variable, según su origen y naturaleza. La actividad puzolánica se puede medir mediante ensayos adecuados, de naturaleza química unos: fijación de cal a partir de disoluciones, variación del residuo insoluble, etc.; y de naturaleza mecánica desarrollo de resistencias a lo largo del tiempo de pastas comparándola con un cemento patrón (ensayo de reactividad hidráulica). Para fines del presente estudio se agregará entre un 20 % a 40 % de puzolana natural para que sus propiedades cementantes ayuden al desarrollo de la resistencia del cemento y ese ahorre en el factor clinker.

2.2.3. Caliza

Adición que en pequeñas proporciones se añade al clinker con objeto de aumentar y/o abaratar en parte la producción de cemento y de contribuir al ahorro energético en cocción y en molienda de dicha producción, sin olvidar los efectos benéficos dispersantes y aceleradores de la hidratación del cemento que ayuda a que sea más fácil de transportar y se puedan ejercer en los hormigones.

Añadidas al clinker y molidas conjuntamente con él, proporcionan cementos con mejor plasticidad y comportamiento reológico en hormigones que los que no las contienen, con menor retracción y tendencia a la fisuración.

La adición de materiales calcáreos al cemento puede tener diversas funciones: completar la curva granulométrica de los cementos con deficiencia de finos, obstruir los poros capilares e interactuar en el proceso de hidratación. Teniendo en cuenta que este material no presenta actividad puzolánica por lo que no involucra la formación de silicato de calcio hidratado, el efecto es

mayoritariamente físico. Actúa como relleno entre los granos del clinker y aceleran la hidratación del C_3S y la fase aluminato.

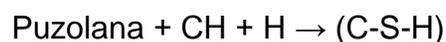
Con un máximo admisible de 10 % de filler calizo (adición 'no nociva'), para fines del presente se adicionará entre un 4 % a 6 % de caliza (un valor promedio) ya que no afectará la salud del cliente y beneficiará la resistencia y fraguado del producto.

2.3. Reacción puzolánica

Bajo el nombre de puzolanas se incluyen productos que son bastante diferentes en cuanto a su origen, estructura, composición química y mineralógica que tienen en común lo que se denomina actividad puzolánica.

Cuando una puzolana se usa en combinación con el cemento portland; este durante su hidratación, es la fuente de hidróxido cálcico ($Ca(OH)_2$) que reacciona con los aluminosilicatos presentes en la puzolana para formar compuestos cementantes.

La reacción puzolánica puede representarse mediante:



Por su parte, la reacción de hidratación del cemento puede representarse por:



Fernanda Carrasco en 2014 en su trabajo de investigación de materiales cementicios indica que las propiedades químicas de los materiales con adiciones puzolánicas, se derivan principalmente de tres características de la reacción puzolánica:

- Es una reacción lenta, al contrario de la reacción de hidratación del cemento que es rápida; por tanto, la velocidad de liberación de calor y el desarrollo de resistencias serán procesos más lentos.
- Es una reacción que consume hidróxido de calcio (Ca(OH)₂), en vez de generarlo lo que es importante para la durabilidad de las pastas hidratadas en ambientes ácidos.
- Al producirse en un tiempo posterior los productos de reacción rellenan, de forma muy eficiente los espacios capilares que quedan después de la hidratación de los componentes del cemento. Así se mejora la impermeabilidad y la resistencia mecánica del sistema (menor porosidad). Es por ello que es de suma importancia la parte de la molienda, porque de ella se definirá el tamaño y distribución de partícula.

2.3.1. Calor de hidratación

El cemento al entrar en contacto con agua reacciona de forma exotérmica, como se describe a continuación:

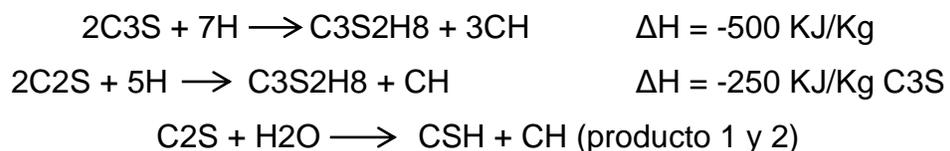
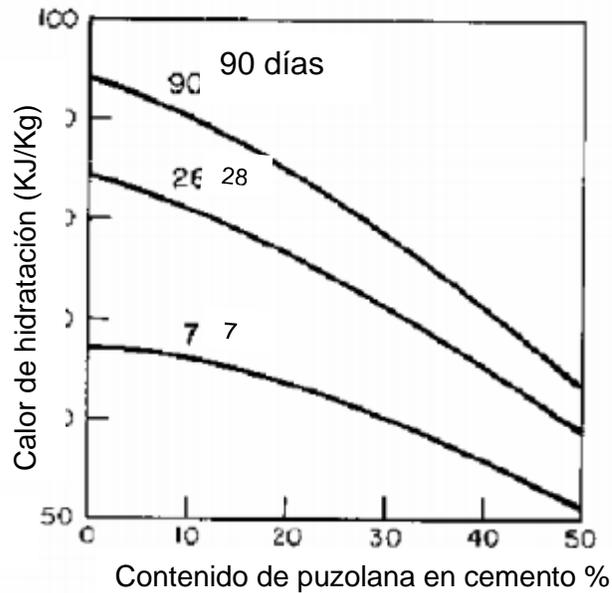


Figura 2. **Calor de hidratación**



Fuente: *Calor de hidratación.*

<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion4.Reaccion.PUZOLANICA.pdf>. Consulta: 30 de junio de 2017.

2.4. **Molienda**

La reducción del tamaño de partícula de sólidos o materiales a granel se requiere cuando las partículas son demasiado gruesas o la muestra es demasiado heterogénea para procesos posteriores tales como análisis, división, mezcla o procesamiento posterior. La desviación estándar de cualquier análisis puede minimizarse drásticamente mediante la reducción del tamaño de partícula y la homogeneización, así como mejoras al proceso.

2.4.1. Principios

Los molinos se basan en diversos principios de reducción de tamaño, desglosándose a continuación:

- Presión: fuerza que se aplica en una determinada superficie. Ejemplo: trituradoras de mandíbula y de palanca.
- Efectos de impacto: la fuerza en una superficie sólida. Ejemplo: mezcladores, molinos de impacto a chorro y molinos de tambor.
- Fricción: fuerza entre dos superficies sólidas. Ejemplo: molinos de mortero, molinos de discos, morteros de mano, molinos de barras.
- Cizallamiento: ejemplos: molinos de batidor del rotor, molinos cruzados del batidor, molinos ultra centrífugos.
- Corte: ejemplos: trituradoras, molinos de corte, molinos de cuchillos.

2.4.2. Molienda del cemento

La tecnología de molienda del cemento se basa en los conocimientos siguientes.

La fracción granulométrica de 3-30 μm es decisiva para el desarrollo de resistencias mecánicas del cemento. La fracción menor de 3 μm solo contribuye a las resistencias iniciales; esa fracción se hidrata rápidamente y después de un día suministra las resistencias más altas a compresión y a flexotracción. La

fracción por encima de 60 μm se hidrata muy lentamente y solo representa un papel secundario en la resistencia del cemento.

En los cementos, la fracción granulométrica de 3-30 μm ha de estar presente en las siguientes proporciones:

- Cemento uso general 40 % - 50 %
- Cemento alta resistencia 55 % - 65 %
- Cementos de resistencia más alta > 70 %

Además, para el desarrollo de resistencias, también, depende la composición mineralógica de las adiciones y de la materia prima con la cual se elaboró el clinker. También, de las condiciones del proceso de la fabricación del cemento.

2.5. Empaquetamiento de partículas

Para mejorar el desarrollo de la resistencia del cemento es necesario tener una fracción granulométrica amplia para asegurarse que cada espacio en la mezcla del cemento quede ocupado.

Por ello, la introducción de grandes cantidades de partículas finas puede resolver este problema. Entonces, la distribución del tamaño de partícula de la composición de mezcla entera, incluyendo cemento, puzolanas y / o rellenos, deben ser calculadas por la densidad de empaque.

2.5.1. Teoría del empaquetamiento de partículas

Las propiedades más importantes de un sistema de partículas son.

- Su densidad de embalaje
- El porcentaje de volumen de sólidos para cada unidad de volumen
- Distribución del tamaño
- Forma de las partículas
- Superficie de las partículas

Diversos métodos son utilizados para determinar la distribución del tamaño de las partículas, los más sencillos y de menor precisión, el tamizado y la sedimentación, hasta más sofisticados y de mayor precisión, el de difracción laser.

2.6. Partículas finas

Las partículas ultrafinas tienen una dispersión expresada a través del tamiz de residuo de 45 μm es 1 % a 2 %, y el contenido de las fracciones menores o iguales a 20 μm es más del 90 % y gran cantidad de partículas más pequeñas que 1 μm . Son las partículas finas aquellas que predominan en un rango de 20 a 45 micrómetros en un cemento.

Tabla II. **Clasificación del tamaño de las partículas**

Tamaño de partícula	Rango
Finas	20-45 μm
Ultrafinas	0,1 a 20 μm
Nanopartículas	Menores a 0,1 μm

Fuente: elaboración propia.

2.7. Hidratación de cemento portland con rellenos

Los minerales sin propiedades hidráulicas puzolánicas pueden influir en la hidratación del cemento portland. Estas adiciones inertes influyen en la hidratación del cemento debido a efectos físicos. Estos efectos físicos se resumen a menudo como efecto de relleno. La gran superficie de los materiales de relleno actúa como sitios de nucleación para productos de hidratación, velocidad de hidratación.

Como resultado, los materiales de relleno de grano fino terminan cubiertos con hidratación y convertirse en parte integrante de la pasta de cemento. En caso de caliza, también, se producen reacciones químicas entre la solución de poro y la adición, al menos en la superficie de los granos.

Según Hochella, la reactividad de una superficie de minerales depende de su composición química, estructura atómica y morfología a nivel micro. Las superficies fracturadas pueden proporcionar minerales con enlaces, esos átomos pueden contribuir activamente a la formación de nuevos enlaces.

Básicamente, la velocidad de hidratación del cemento se controla por nucleación y precipitación de fases hidratadas, interacción y difusión a través de fases ya hidratadas.

Los minerales de grano fino proporcionan sitios de nucleación para productos de hidratación, por lo tanto, la hidratación del cemento se puede acelerar añadiendo cargas. Tres son los factores que se pueden considerar como fundamentales en cuanto a la influencia de las adiciones en la hidratación de los cementos:

- Su contenido de SO_4^{2-} ($\text{SO}_3 = \checkmark$).
- La reacción puzolánica entre las partículas de la adición y los iones OH^- de la pasta cementicia.
- La cantidad de álcalis (N, K) liberados por la adición y la velocidad con que se liberan.

En cuanto a i) el contenido de sulfatos de las adiciones es, en general, menor que el del clinker, y ambos pasan a disolución antes del fraguado, con lo cual no crean problemas de expansión a largo plazo. Los sulfatos influyen favorablemente, en las resistencias tempranas de los cementos, aunque desfavoreciendo a resistencias tardías.

En cuanto a ii) y iii), parece existir una relación experimental entre la velocidad de paso a la disolución y la cantidad de N y K traspasada a esta desde la ceniza tratada con cal, por una parte, y la velocidad de reacción de las partículas de ceniza con liberación iónica de silicatos y aluminatos, por otra. Ello podría suponer un procedimiento de determinar la puzolanicidad de una ceniza.

Las adiciones contribuyen a acelerar la hidratación de los constituyentes del clinker y dan a la pasta una estructura evolutiva especial. En primer lugar, alrededor de las cenosferas se forma un espacio ocupado por la fase líquida, el cual se va rellenando con la cal que se forma en la hidrólisis de los silicatos y con los productos hidratados de la combinación de esta cal con los sulfatos y con los silicoaluminatos de las adiciones.

Las propiedades de la pasta dependen en buena parte de la naturaleza y de la evolución de la adherencia de los productos formados en la interfase esfera/matriz de la pasta, todo lo cual depende de las características del clinker y de las adiciones, así como de la finura y proporciones de ambos, y del tiempo.

La acción de las adiciones en la hidratación de los aluminatos se podría esquematizar así: primero tiene lugar una adsorción de iones SO_4^{2-} de la fase líquida sobre el C_3A , la cual reduce la superficie de éste para la disolución; después, se forma etringita que consume agua sustrayéndola del sistema.

A continuación, tiene lugar la migración de iones SO_4^{2-} a través de la membrana semipermeable y la formación y la estabilización de la fase hexagonal hidratada; finalmente, se produce el paso de la fase hexagonal hidratada a la cúbica, si bien de forma mucho más retardada que en ausencia de la adición.

La formación de etringita por reacción de la alúmina de las cenizas con cal y con yeso (sulfatos), contribuye al incremento de las resistencias a plazos cortos, de forma semejante a como la formación de mayores cantidades de geles tobermoríticos $\text{C}_x\text{S}_y\text{H}_z$ da por resultado un aumento de las resistencias a plazos más largos.

2.8. Norma ASTM C 186, método de prueba de la determinación del calor de hidratación del cemento hidráulico

Este método de ensayo cubre la determinación del calor de hidratación de un cemento hidráulico mediante la medición de la solución del cemento seco y el calor de disolución de una parte del cemento parcialmente hidratado durante 7 y durante 28 días; la diferencia es entre estos valores el calor de hidratación para el respectivo período de hidratación.

Los resultados de este método de ensayo pueden ser inexactos si algunos de los componentes del cemento hidráulico son insolubles en la solución de ácido nítrico / ácido fluorhídrico. Utilizando ácido nítrico 2,0 N y ácido fluorhídrico concentrado en una proporción 50 a 1; completando 400 g de HNO_3 y 8 ml de HF.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

A continuación, se muestran las variables consideradas para el presente trabajo de investigación:

Tabla III. Lista de variables manipuladas

Variable		Parámetro que determina	Dimensional
Tiempo de molienda	de	El tiempo de molienda influye para que se alcance la fineza deseada.	Minutos
Tamaño de partícula	de	Las adiciones poseen cierta fineza para que aumente la resistencia.	µm
Resistencia a la compresión		Por norma el cemento Tipo GU debe cumplir a 28 días 4060 PSI.	PSI
Porcentaje de alita	de	Para monitorear el grado de hidratación del cemento.	%
Porcentaje de belita	de	Para monitorear el grado de hidratación del cemento.	%
Calor de hidratación	de	Para monitorear el grado de hidratación del cemento y el calor que emana la reacción.	KJ/Kg

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

El campo de estudio abarcó la puzolana natural, caliza y cenizas volantes que son adquiridas por Cementos Progreso para la utilización en sus procesos. Así mismo, se utilizó cemento tipo I producido en la planta San Miguel localizada en Sanarate, El progreso. El estudio se realizó en el Centro de

Investigación y Desarrollo/CETEC ubicado en la 15 av., 18-01, finca La Pedrera, zona 6 de la ciudad de Guatemala.

Se desarrollaron cuatro pruebas descritas a continuación:

Tabla IV. **Descripción de pruebas realizadas**

Nombre	Tamaño de partícula de las adiciones
Cemento de referencia	45 micrómetros
Cemento prueba 1	40 micrómetros
Cemento prueba 2	35 micrómetros
Cemento prueba 3	30 micrómetros

Fuente: elaboración propia.

3.3. Recursos humanos disponibles

Se contó con el personal del Centro de Investigación y Desarrollo/CETEC, y se dispuso de los analistas del laboratorio químico y físico. Así mismo, con las personas que supervisaron la ejecución, elaboración y revisión del proyecto:

- Desarrollo del proyecto: Katherine Julissa Marroquín Moscoso, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Asesor: Ing. Qco. Emmanuel De Jesús Montufar Cárdenas; analista de laboratorio del Centro de investigación y desarrollo CETEC.
- Supervisor de ejecución: Ing. Roberto Díaz Durán; gerente de investigación y desarrollo del área de cemento, Cementos Progreso.

- Supervisor de laboratorio químico: Lcda. Carmela María Barrientos; coordinadora del laboratorio químico de CETEC, Cementos Progreso.
- Revisor de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala: Dra. Marlene Susana Arrechea Alvarado.
- Supervisor-asesor unidad EPS: Ing. Alejandro Recinos; Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Lic. Luis Velásquez, gerente de investigación y desarrollo, Cementos Progreso.

3.4. Recursos materiales disponibles

El material y equipo que se utilizó en el presente trabajo de graduación fue brindado por el Centro de investigación y desarrollo CETEC.

3.4.1. Material y equipo

- Balanza analítica
- Molino de bolas
- Prensa hidráulica
- CILAS 920 LIQUID
- Difracción de rayos X
- Espectrómetro fluorescencia de rayos X
- Tamiz 325
- Tamiz 3/4
- Tamiz ¼
- Tamiz 400

- Tamiz 450
- Mufla
- Computadora de escritorio/ portátil
- Probetas 100 ml
- Beakers
- Crisoles
- Moldes de cubos de 2 pulgadas
- Mezcladora, tazón y paleta
- Apisonador
- Espátula
- Cuarto húmedo a 23 ± 2 °C
- Máquina hidráulica de compresión
- Triturador de quijadas
- Cal-Metrix
- TGA

3.4.2. Reactivos

- Puzolana natural
- Caliza
- Ceniza volante
- Cemento tipo I
- Trietanolamina
- Isopropanol
- Agua
- Arena estándar graduada (sílice) normada con Coguanor NTG 41095

3.5. Técnica cuantitativa

La caracterización del cemento tipo uso general en la construcción se realizó es a través de una técnica cuantitativa para el análisis de datos de la resistencia a la compresión, calor de hidratación, el tiempo de molienda de las adiciones y finezas de las mismas a diferentes edades.

3.5.1. Análisis de materia prima

- Se ubicaron las materias primas en CETEC.
- Se molió 20 gramos los materiales adicionales en mortero automático RETESH para caracterizar los materiales.
- Se realizó el análisis de difracción de rayos X.
- Se realizaron ensayos químicos. (fluorescencia de rayos X).

3.5.2. Preparación, premolienda

- Se verificó que la muestra se encuentre seca, en caso de no estarlo se metía el material al horno (100 °C) para secarlo. El tiempo dependió de la humedad y cantidad del material.
- Se trituró la muestra en caso de ser necesario, si estuviera muy grande el material.
- Se tamizó la muestra, en este caso se utilizó el material que pasará por el tamiz 3/8 y fuera retenida por el tamiz ¼.

- Se pesó 1 000 gramos del material tamizado.

3.5.3. Molienda

- Se verificó que el molino se encontrará limpio.
- Se realizó la relación de bolas del molino, dependiendo del tamaño de partícula que se requería alcanzar.
- Se vertieron 1 000 gramos del material en el molino.
- Se agregaron 3 ml de trietanolamina en el molino.
- Se encendió el molino.
- Se dejó trabajar el molino por 30 minutos. Después se tomó una muestra aleatoriamente y se realizó el ensayo de fineza.
- Si la fineza fue mayor o igual a 80 % pasante se ha llegado al tamaño de partícula deseado. De lo contrario se volvió a colocar el molino en funcionamiento hasta alcanzar la fineza deseada.
- Se descargó el molino.
- Se identificaron bolsas con el material y el tamaño de partícula.

3.5.4. Mezcla de cemento

- La mezcla consistió en 30 % puzolana natural, 5 % caliza, 5 % *fly ash* y 60 % de cemento tipo I (clinker + yeso).
- Se agregó en una bolsa las proporciones establecidas y se homogenizaron.
- Se realizó un muestreo de dos bolsas. Una sirvió para el laboratorio físico y otra para el laboratorio químico.

3.5.5. Ensayo de resistencia a la compresión

Este Método de ensayo fue utilizado en la determinación de la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico, utilizando especímenes cúbicos de 2 pulgadas.

3.5.5.1. Espécimen mezcla testigo (material de relleno) Según la norma Coguanor 41003 h4 (2012)

- Se prepararon 6 cubos de 2 pulgadas y se aplicó desencofrante.
- Se pesaron 500 gramos del cemento formulado.
- Se pesó 1 375 gramos de arena estándar graduada.
- El agua requerida fue la que produjera un flujo de 110 ± 5 .

- Se verificó que la paleta mezcladora y el recipiente de mezcla estuvieran secos y en su lugar de trabajo.
- Se vertió el agua en el recipiente de mezclado.
- Se agregó el cemento al agua y se mezcló durante 30 s a la velocidad lenta (140 ± 5 r/min).
- Se agregó lentamente la totalidad de la arena en un periodo de 30 s, mientras se mezcló a velocidad lenta.
- Se detuvo la mezcladora, se cambió a velocidad media (285 ± 10 r/min) y se mezcló durante 30 s.
- Se detuvo la mezcladora y se dejó reposar el mortero durante 90 s. Durante los primeros 15 s de este intervalo, se arrastró hacia el fondo con el raspador, el mortero adherido a la pared del recipiente. Durante el resto del intervalo, se tapó el recipiente.
- Se mezcló durante 60 s a velocidad media (285 ± 10 r/min). Coguanor 41002 (2013).
- Se moldeó la mezcla en cuatro rondas de 32 apisonadas.

3.5.5.2. Determinación de flujo en morteros Norma Coguanor 41003 h13 (2013)

- Se limpió y secó la mesa superior del flujo.

- Se colocó el molde de flujo en el centro.
- Se colocó en el molde una capa de mortero de cerca de 25 mm de espesor.
- Se golpeó uniformemente 20 veces con el apisonador.
- Se llenó el molde con el mortero apisonando.
- Se enrasó el molde hasta obtener una superficie plana.
- Se levantó el molde del mortero un minuto después de haber completado la operación de mezclado.
- Se dejó caer la mesa superior de flujo 25 veces en 15 s.
- Se utilizó el calibrador y se midió el diámetro del mortero a lo largo de las 4 líneas grabadas en el tope de la mesa superior del flujo.

3.5.5.3. Almacenamiento de especímenes

- Después de moldear, se colocó los especímenes y los moldes (placas de base) en la habitación húmeda o armario a 23 ± 1 ° C durante 20 a 24 h. Mientras que, en la habitación húmeda o el armario, se protegió la superficie de las gotas de agua.
- Se retiraron los moldes de la habitación húmeda o el armario y se quitaron los cubos de los moldes.

- Se colocó y se guardaron los cubos en agua saturada de cal (Norma ASTM C311-05, 2006).

3.5.6. Prueba de resistencia a la compresión (Norma Coguanor 41003 h4 , 2012)

- Se ensayaron los especímenes inmediatamente después de sacarlos del gabinete húmedo en el caso de especímenes de 24 h y del agua de almacenaje en el caso de todos los otros especímenes. Todos los especímenes de ensayo para una edad de ensayo dada debieron ser rotos dentro de la tolerancia admisible siguiente:

Tabla V. **Prueba de resistencia**

Edad de ensayo	Tolerancia admisible
24 h	$\pm\frac{1}{2}$ h
3 días	± 1 h
7 días	± 3 h
28 días	± 12 h
56 días	± 12 h

Fuente: elaboración propia.

- Se secó cada espécimen a una condición de superficie seca, y se les removió cualquier grano de arena suelta o incrustación de las caras que estarán en contacto con los bloques de apoyo de máquina de ensayo.
- Se debió de aplicar la carga a las caras de espécimen que estuvieron en contacto con las superficies verdaderamente planas del molde. Se colocó cuidadosamente el espécimen en la máquina de ensayo de bajo del centro del bloque del apoyo superior.

- Se colocó el bloque de asiento esférico en contacto uniforme con la superficie del espécimen.
- Se aplicó la velocidad de carga con una velocidad relativa de movimiento entre las platinas superior e inferior correspondiente a una carga sobre el espécimen con el rango de 900 a 1 800 N/s (200 a 400 lb/s).
- Se registró la carga total máxima indicada por la máquina de ensayo.
- Se realizó el cálculo.

3.5.7. Ensayo calor de hidratación

- Se mezclaron 150 gramos del cemento adicionado con 60 ml de agua destilada.
- Se mezcló por 5 minutos la mezcla con un agitador mecánico.
- Se colocó la mezcla en los tubos de ensayo y se rotularon para ensayarlos a 7 y 28 días.
- A la edad especificada, se removieron del frasco el cemento parcialmente hidratado triturando en un mortero hasta lograr que pasara un 80 % el tamiz No. 20.
- En el Dewar del equipo se transfirieron aproximadamente 417g de ácido nítrico 2.0 N y 7 ml de ácido fluorhídrico.
- Se ensambló el calorímetro y se inició la agitación.

- Se adicionó la muestra a analizar en un tiempo no menor a 1 minuto ni mayor a 2 minutos.
- Se leyó la temperatura al más cercano 0,001 °C, a los 20 min y 40 min.

3.5.8. Ensayo calor de hidratación en 24 horas (cal-Metrix)

- Se realizó el mismo procedimiento que 4.5.5.1.
- Se encofró 80 a 100 gramos de la pasta en los recipientes especiales del cal-Metrix.
- Se colocaron los recipientes dentro del aparato a 24 ± 1 °C por 24 horas.

3.5.9. Ensayo tamaño y distribución de partícula

- Se pesaron 0,3 g de la muestra molida.
- Se agregaron 10 mL de isopropanol.
- Se homogenizó la muestra.
- Se colocó al ultrasonido por 5 min.
- Se encendió el equipo Cillas.
- Se abrió el software Particle Insight 2.49.
- Click en la ventana 'New' e identificar (ID) la muestra que se analizó con: número de correlativo y nombre del espécimen.

- Se agregó la muestra, en un beacker de 600 ml con 200 ml de isopropanol y se mantuvo en agitación.
- Se colocó las mangueras Drain y Fill dentro del beacker.
- Se encendió la bomba externa para arenas gruesas.
- Se ajustó nuevamente la manguera DRAIN. Se reguló la capacidad de la bomba de tal forma que la circulación no contenga burbujas de vacío.
- Se reguló el rebalse antes de iniciar el análisis y se esperó 1 min para la estabilización del flujo.
- Click en el ícono 'Continuous'; luego, click y 'Start'.
- Se guardó el análisis.
- Se lavó el sistema
- Se apagó el equipo.
- El software brindó la información de la fineza menores al tamiz 325 así como una gráfica de la distribución de partícula.

3.5.10. Ensayo químico

Se realizó difracción de rayos X y fluorescencia de rayos X a la mezcla con los distintos tamaños de partícula. Para que se ubicarán, mediante los difractogramas, las distintas fases cristalinas de las adiciones minerales.

Para saber el efecto que se tuvo del tamaño de las partículas en la hidratación se realizó difracción de rayos X y análisis termogravimétrico (TGA) de los cubos ensayos en resistencia a la compresión a 1,3,7,28 y 56 días.

El procedimiento a seguir fue: se realizó el ensayo de resistencia a la compresión; luego de quebrado el cubo se procedió a afinarlo en un mortero y se realizó el ensayo de difracción de rayos X y análisis termogravimétrico para saber la transformación de las fases de las adiciones minerales y monitorear el avance de la reacción.

3.5.11. Ensayo de avance de hidratación del cemento

Se monitoreó el avance de hidratación del cemento mediante dos ensayos: difracción de rayos x y un análisis termo gravimétrico Esto con el objetivo realizar un análisis cualitativo para observar el cambio de la hidratación del cemento utilizando adiciones finas.

3.5.11.1. Difracción de rayos X

- Inmediatamente después de realizado el ensayo de resistencia a la compresión a 1, 3, 7, 28 y 56 días, los morteros fueron quebrados.
- Se secó la muestra en la balanza de humedad.
- Se afinó y molió en el mortero Retch hasta una fineza donde se pudiera realizar la medición con el equipo.

3.5.11.2. Análisis termo gravimétrico

- Inmediatamente después de realizado el ensayo de resistencia a la compresión a 1, 3, 7, 28 y 56 días, los morteros fueron quebrados.

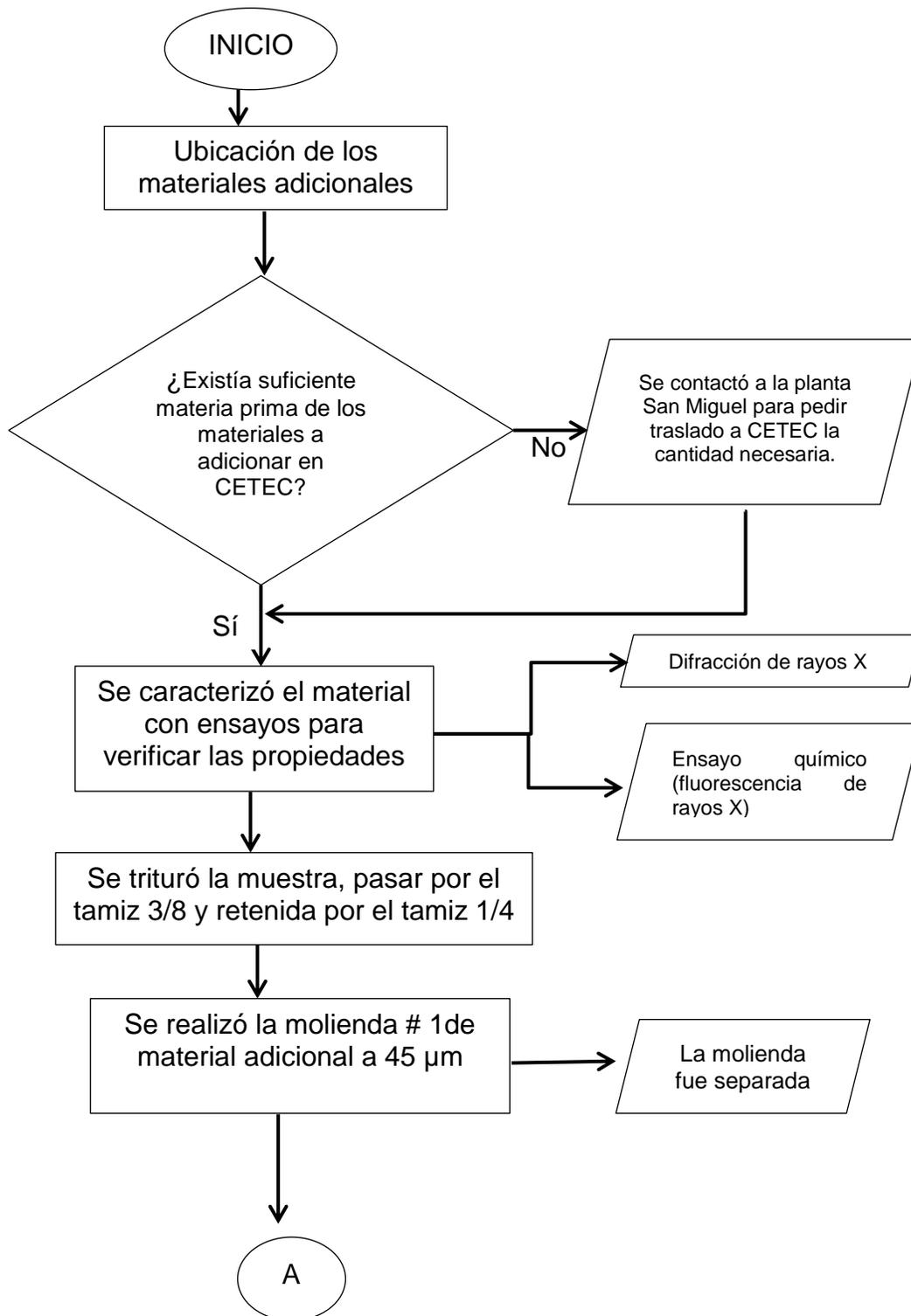
- Se afinó con el mortero de agata.
- Se pesó 0,0300 g y realizar el ensayo.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

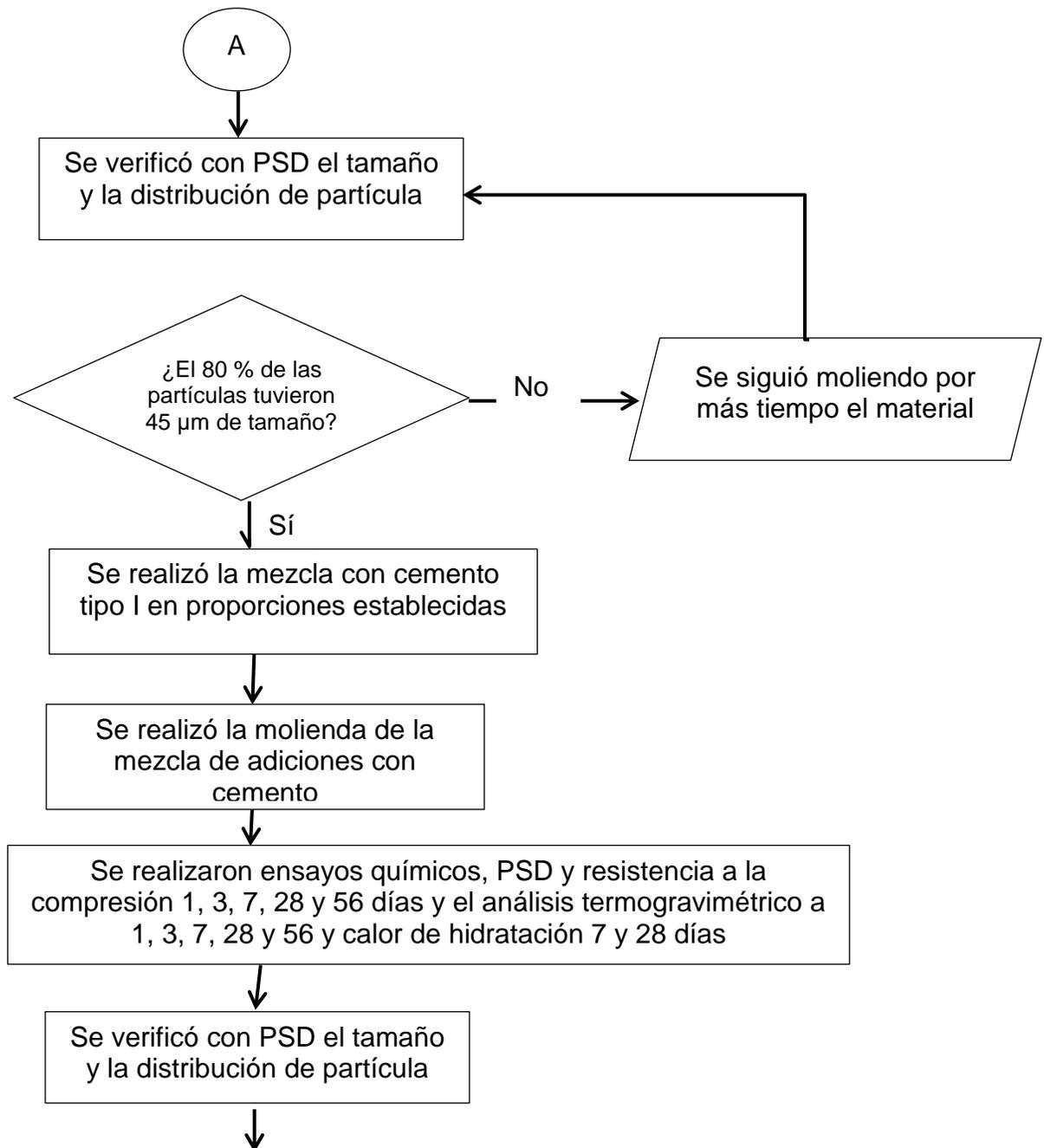
El procedimiento a seguir fue el siguiente:

- Se verificaron las propiedades de las adiciones (caliza, cenizas volantes y puzolana con difracción y fluorescencia de rayos X).
- Se realizó la curva característica del molino de bolas con el que se cuenta actualmente para que se llegará a su máximo de fineza y se verificará si es funcional para el proyecto. Si no lo fuera, se realizaron pruebas con el tamaño de bolas adquiriendo más pequeñas hasta llegar al tamaño de partícula deseado.
- Se realizaron ensayos con el equipo CILAS 920 liquid para verificar el tamaño y la distribución de las partículas analizadas.
- Se realizaron morteros para ensayarlos a la edad de 1, 3, 7, 28 y 56 días.
- Se realizaron ensayos con difracción de rayos X y termogravimétrico para monitorear el avance de hidratación del cemento.
- Se realizaron ensayos de fineza y Blaine al cemento formulado.
- Resultados.

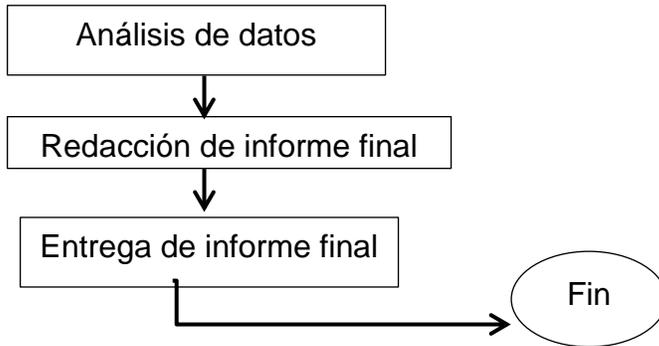
Figura 3. Diagrama de flujo del procedimiento



Continuación de la figura 3.



Continuación de la figura 3.



Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Para la determinación del tiempo y la relación de bolas óptima de la molienda de puzolana, caliza y *fly ash* se hizo funcionar el molino bico con una determinada carga de bolas y se tomó una muestra cada 20 minutos; se realizó una prueba de fineza con los distintos tamices dependiendo del tamaño de partícula que se requería alcanzar. Si la fineza no alcanzaba un 80 % mínimo se volvía a colocar a funcionar el molino controlando siempre que la muestra no se apelmazará. En el caso de la caliza, por ser un material muy duro y con propiedades aglomerantes, se alcanzó un 70 % de fineza deseada y se procedió a tamizarla.

Tabla VI. **Formato del tiempo de molienda hasta alcanzar ≥ 80 % de fineza**

Tamaño	45 μ	40μ	35μ	30μ
Material				
Puzolana natural				
Caliza				
Fly Ash				

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Formato de fineza alcanzada**

Tamaño	45 μ	40μ	35μ	30μ
Material				
Puzolana natural				
Caliza				
Fly Ash				

Fuente: elaboración propia.

Con las adiciones molidas con el tamaño de partícula predominante que se requería, se procedió a realizar el ensayo de resistencia a la compresión, calor de hidratación, el Calmetrix, la difracción y la fluorescencia de rayos X.

Tabla VIII. **Formato de resistencia a la compresión del cemento tipo uso general**

Edad (días)	45 micrómetros	40 micrómetros	35 micrómetros	30 micrómetros
1				
3				
7				
28				
56				

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Formato de calor de hidratación**

Calor de hidratación Tamaño	7 días	28 días
45μ		
40μ		
35μ		
30μ		

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Formato del análisis de fluorescencia por rayos X**

Análisis químico													
AL ₂ O ₃	CaO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	SiO ₂	TiO ₂	LOI	Total

Fuente: elaboración propia.

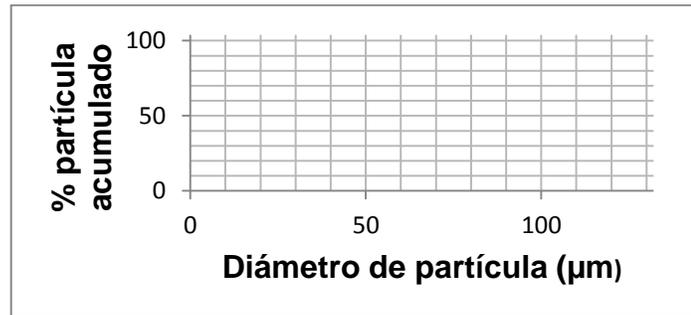
Tabla XI. **Formato del análisis químico por difracción de rayos x**

Alita	Belita	Ferrita	C3ACu	C3AOrth	CaO	Ca(OH)2	MgO	K2SO4	Yeso	YesoHemi	YesoAnh	CaCO3	SiO2	Anortita	Dolomita

Fuente: elaboración propia.

Así mismo, se realizó el análisis de tamaño de partícula de cada material y del cemento en el equipo cilas, el cual brindó una ojiva del porcentaje de volumen de la muestra que pasa cada tamaño de partícula versus el tamaño de partícula.

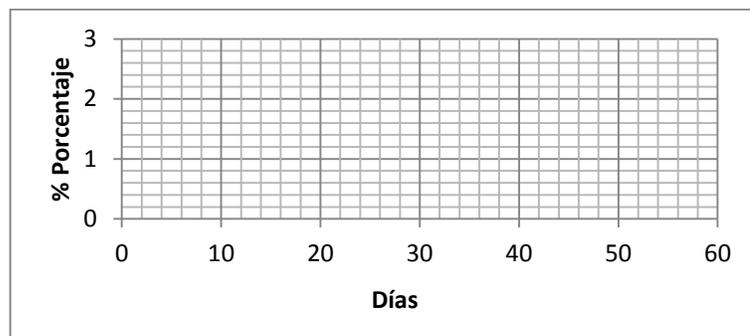
Figura 4. **Formato del tamaño de la partícula versus porcentaje acumulado de la partícula**



Fuente: elaboración propia.

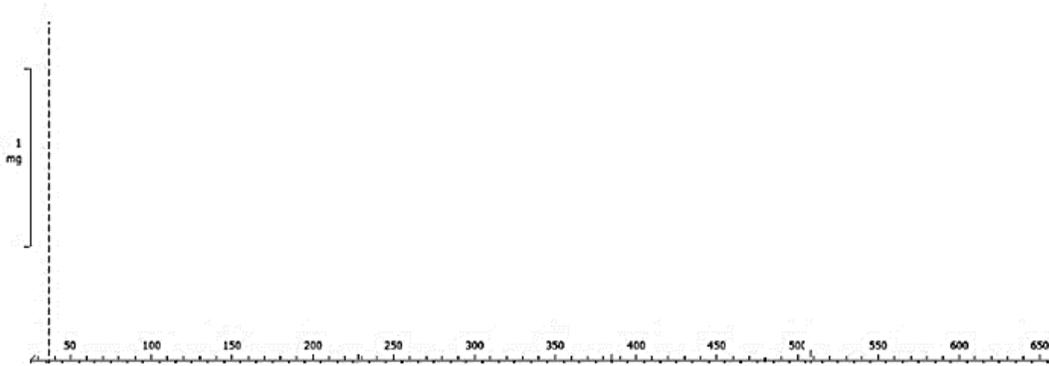
Al ensayar los cubos elaborados para determinar la resistencia a la compresión se procedió a triturarlos y pulverizarlos para ser analizados en difracción de rayos X y en termogravimetría para monitorear el avance de hidratación del cemento. Para ello, en difracción de rayos X, se midió el porcentaje de alita y belita; en termogravimetría el grado de deshidratación versus la temperatura.

Figura 5. **Formato de porcentaje de alita y belita versus días de hidratación del cemento**



Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Formato del análisis termogravimétrico**



Fuente: elaboración propia.

3.8. **Análisis estadístico**

Para el análisis estadístico de datos se utilizaron los siguientes métodos:

- Número de repeticiones de morteros (3 cubos por repetición)

La siguiente ecuación indica la cantidad de repeticiones del experimento que se realizaron para disminuir la dispersión de los datos.

$$N = \frac{z^2 * P * Q}{E^2}$$

Donde

- N = número de repeticiones
- Z = confiabilidad
- P = probabilidad de éxito

- Q = probabilidad de fracaso
- E = error estimado

- Media

La siguiente ecuación indica el promedio de una medición. Indica el valor alrededor del cual se agrupan los datos, dando una idea de cómo están centrados los datos y proporciona mayor facilidad para realizar comparaciones.

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}$$

Donde:

- \bar{X} = media de los datos
- $\sum X_i$ = sumatoria de valores
- n = número de datos

- Desviación estándar

Es una medida de dispersión, indica cuánto pueden alejarse los valores respecto la media.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n}}$$

Donde:

- σ = desviación estándar
 - \bar{X} = media de los datos
 - X_i = valor individual de cada dato
 - n = número de datos
-
- Varianza de un factor

Para un análisis experimental de resultados, el análisis de la varianza permite aprobar hipótesis, ya sea la hipótesis nula o hipótesis alternativa. Un ANOVA consiste en determinar si el factor que se estudiará (tratamiento) influye sobre la variable respuesta (variable dependiente). Para ello, compara la varianza entre las medias de los grupos y la varianza dentro de los grupos para determinar si los grupos forman parte de una misma población o son poblaciones separadas con características distintas.

La hipótesis nula (H_0) indica que, al aplicar tratamientos, las variables respuesta son iguales; mientras que la hipótesis alternativa (H_a) describe que por lo menos una de las variables, difiere de las demás.

- $H_0: R_{Dp11}=R_{Dp12}=R_{Dp13}=R_{Dp14}$
- $H_a: R_{Dp11}\neq R_{Dp12}\neq R_{Dp13}\neq R_{Dp14}$

Un ANOVA puede realizarse con ayuda del programa, Microsoft Excel. Para el presente trabajo de investigación, los factores serán el tamaño de partícula y el tiempo de molienda; mientras que la variable respuesta será la resistencia a la compresión.

Para aceptar o rechazar una hipótesis estadística, se hará basándose en la distribución de Fisher. Se utilizó una confiabilidad del 95 % y se comparó la F crítica con la F calculada a partir de los siguientes criterios para el análisis de varianza:

- Si $F > F_{Crítica}$, se rechaza la hipótesis nula
- Si $F < F_{Crítica}$, se acepta la hipótesis nula

4. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla XII. **Tiempo de molienda (minutos) hasta alcanzar ≥ 80 % de fineza**

Tamaño Material	45 μm	40μm	35μm	30μm
Puzolana natural	45	70	60	41
Caliza	30	20	30	10
Fly Ash	20	20	10	20

Fuente: elaboración propia

Tabla XIII. **Fineza alcanzada por las adiciones**

Tamaño Material	45 μm	40μm	35μm	30μm
Puzolana natural	96	100	100	100
Caliza	98	100	97	98,5
Fly Ash	98	100	100	100

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Resistencia a la compresión del cemento tipo uso general formulado [PSI]**

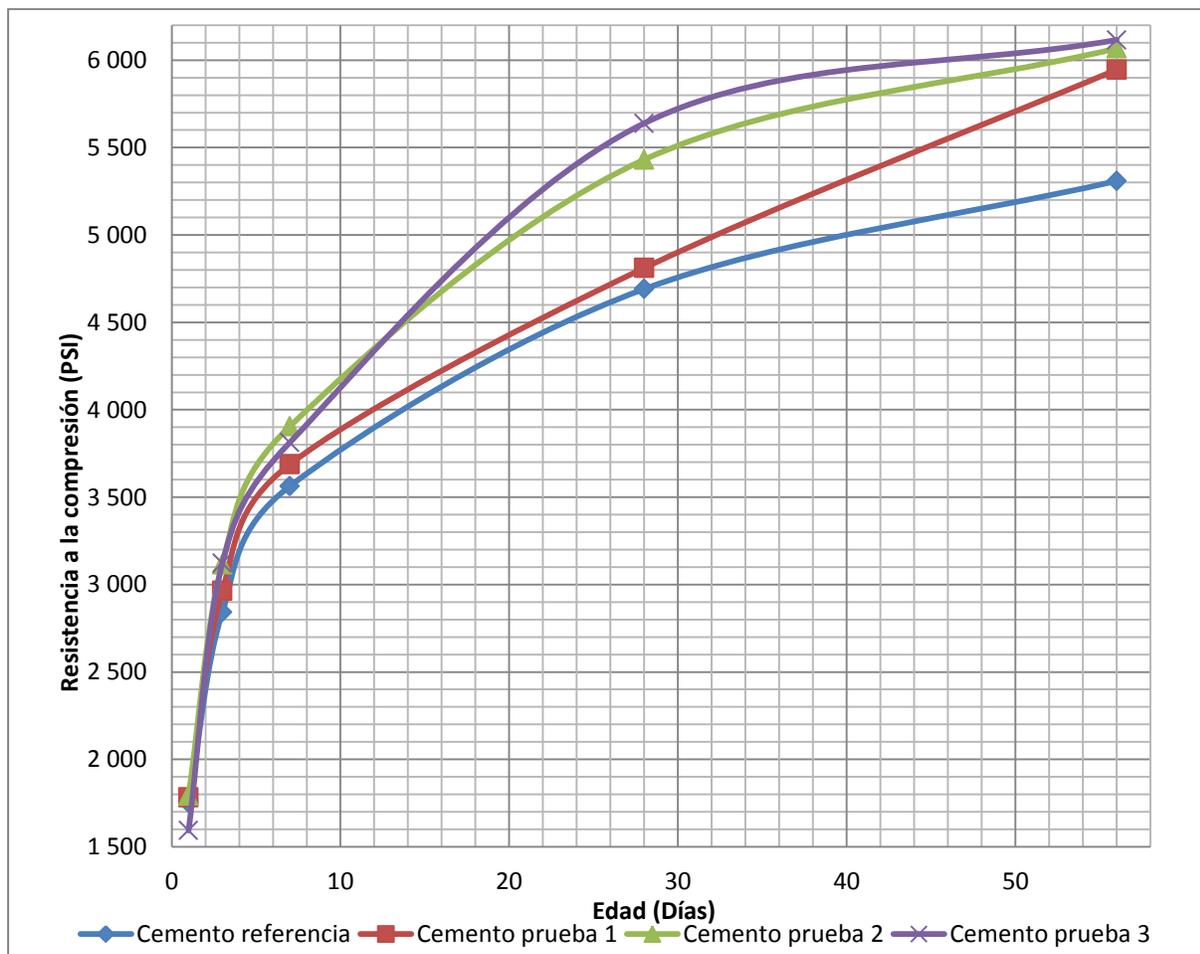
	Cemento de referencia	Cemento prueba 1	Cemento prueba 2	Cemento prueba 3
Edad (días)	45 micrómetros	40 micrómetros	35 micrómetros	30 micrómetros
1	1 752	1 782	1 792	1 593
3	2 842	2 964	3 116	3 088

Continuación de la tabla XIII.

7	3 563	3 688	3 905	3 813
28	4 691	4 811	5 431	5 639
56	5 309	5 946	6 067	6 097

Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Desarrollo de la resistencia a la compresión del cemento formulado**



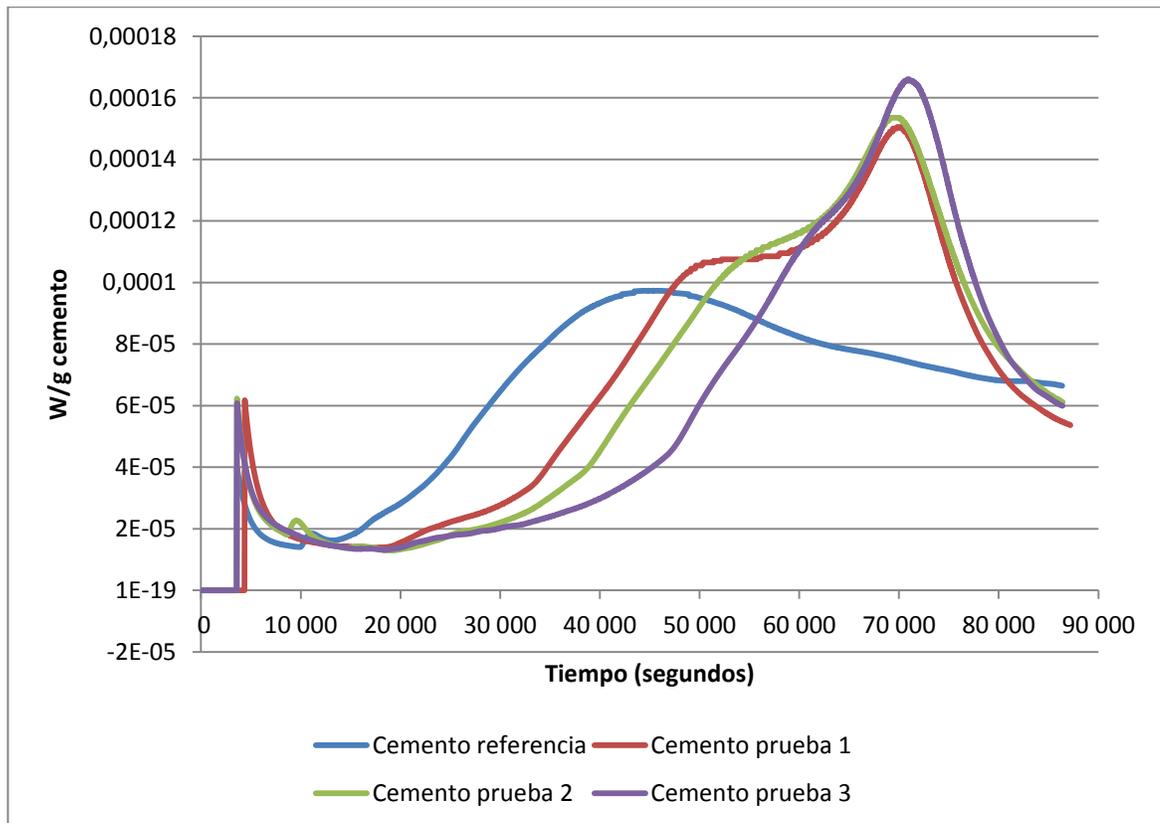
Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Calor de hidratación**

Calor de hidratación Tamaño (KJ/Kg)	7 días	28 días
Cemento de referencia	259,94	322,46,
Cemento prueba 1	267,78	330,63
Cemento prueba 2	268,77	331,97
Cemento prueba 3	272,93	337,39

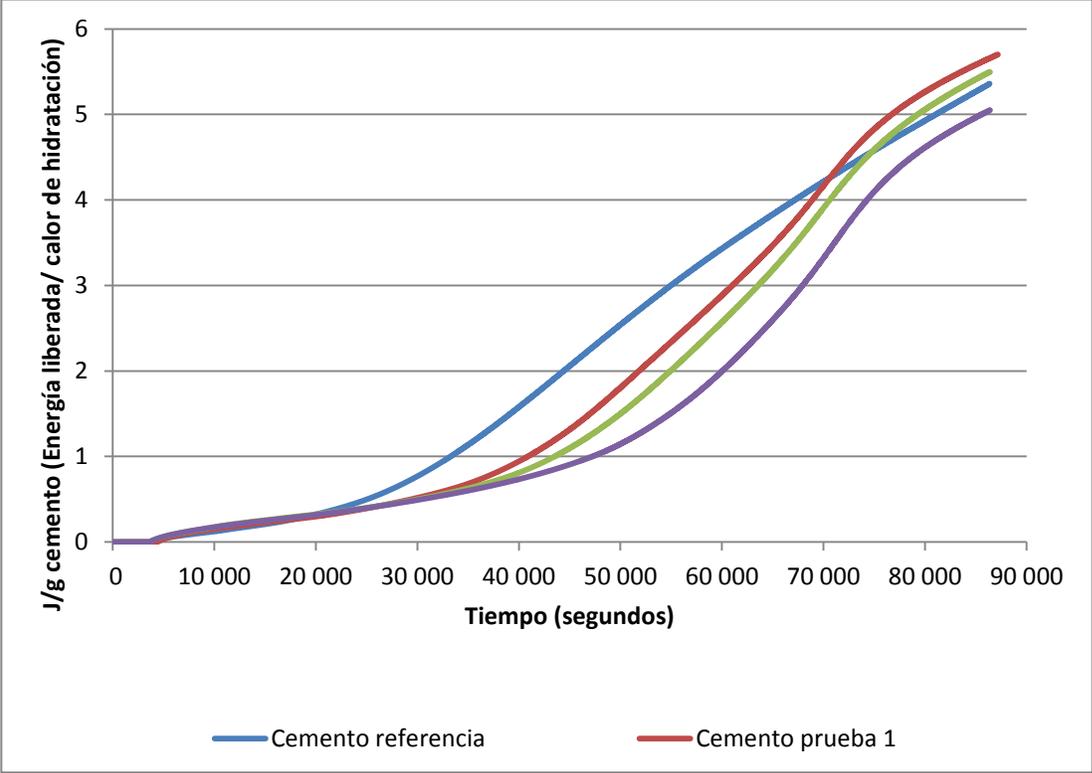
Fuente: elaboración propia

Figura 8. **Potencia liberada por gramo de cemento**



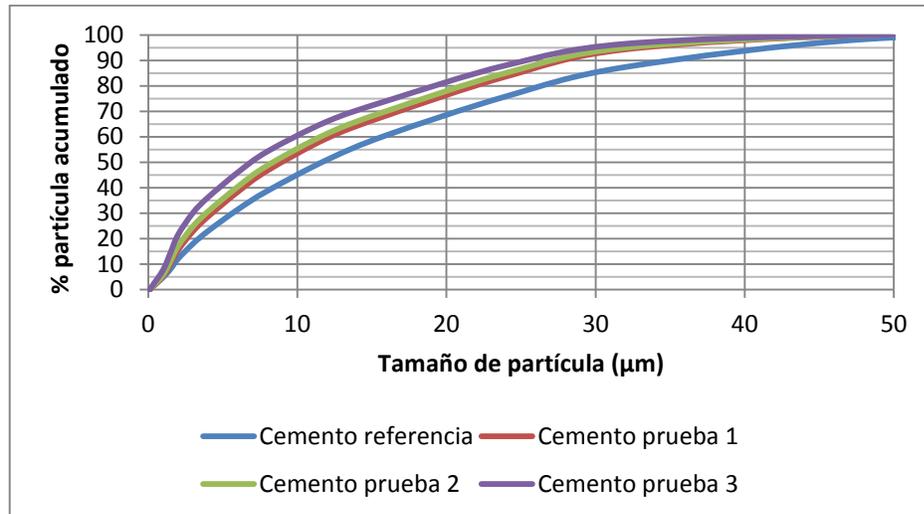
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Calor de hidratación del cemento a 24 horas



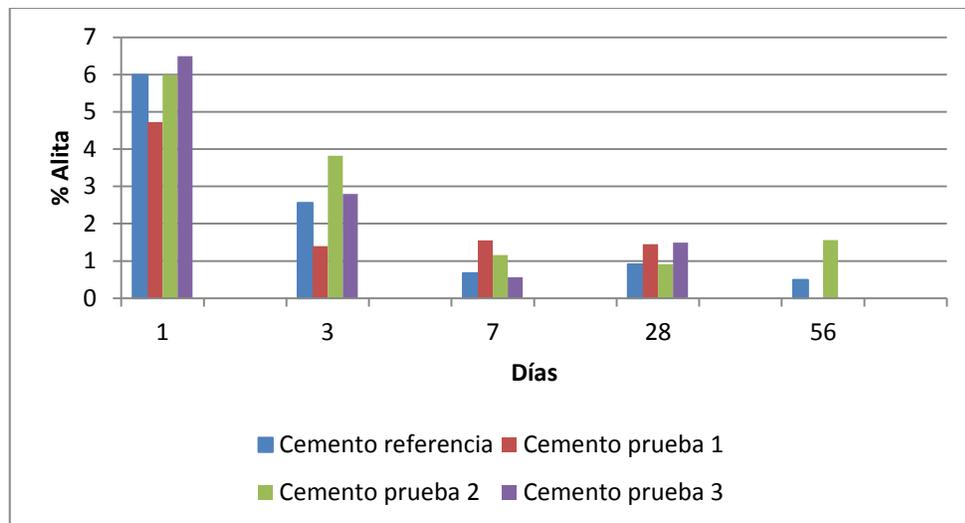
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Curva granulométrica acumulada de los cementos**



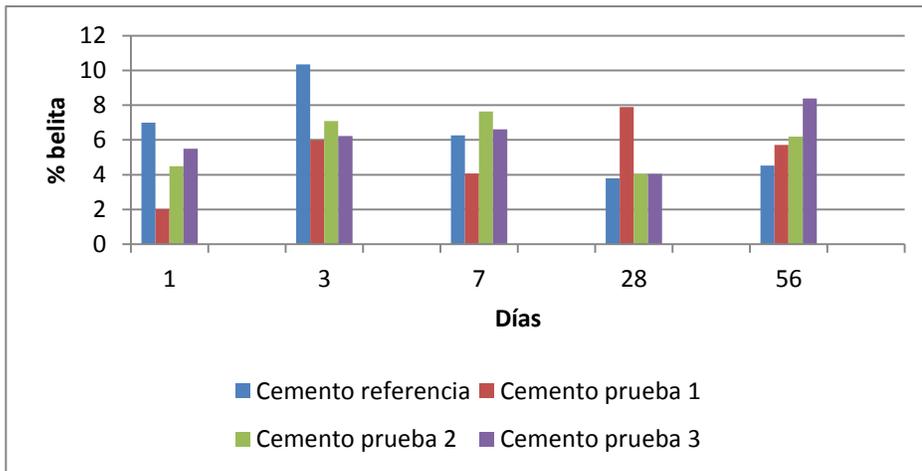
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Porcentaje de alita versus la edad de hidratación a distinto tamaño de partícula**



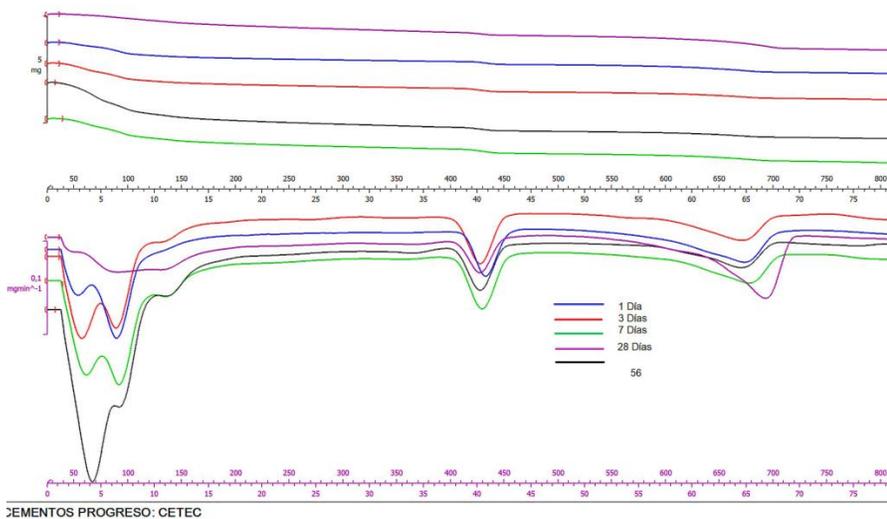
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Porcentaje de belita versus la edad de hidratación a distinto tamaño de partícula**



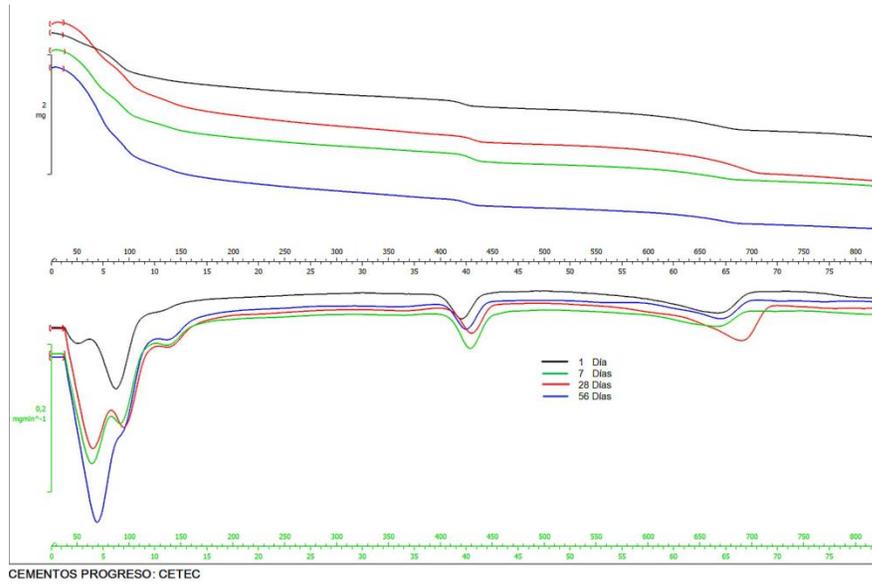
Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **TGA del cemento de referencia**



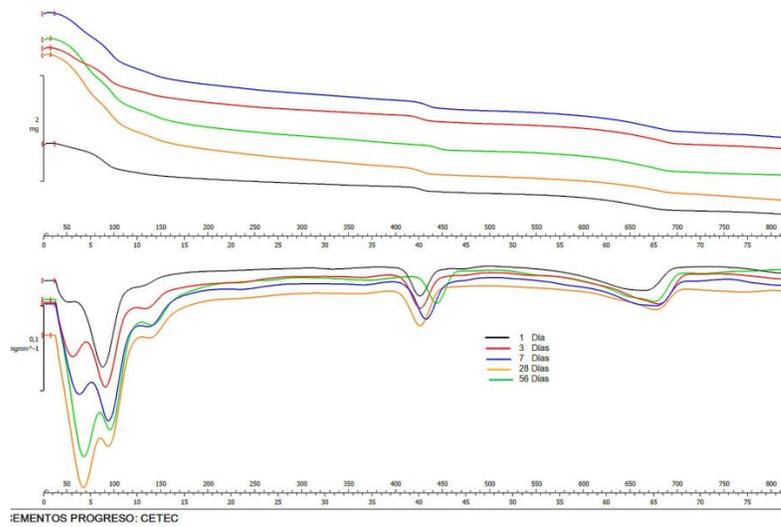
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. TGA cemento, prueba 1



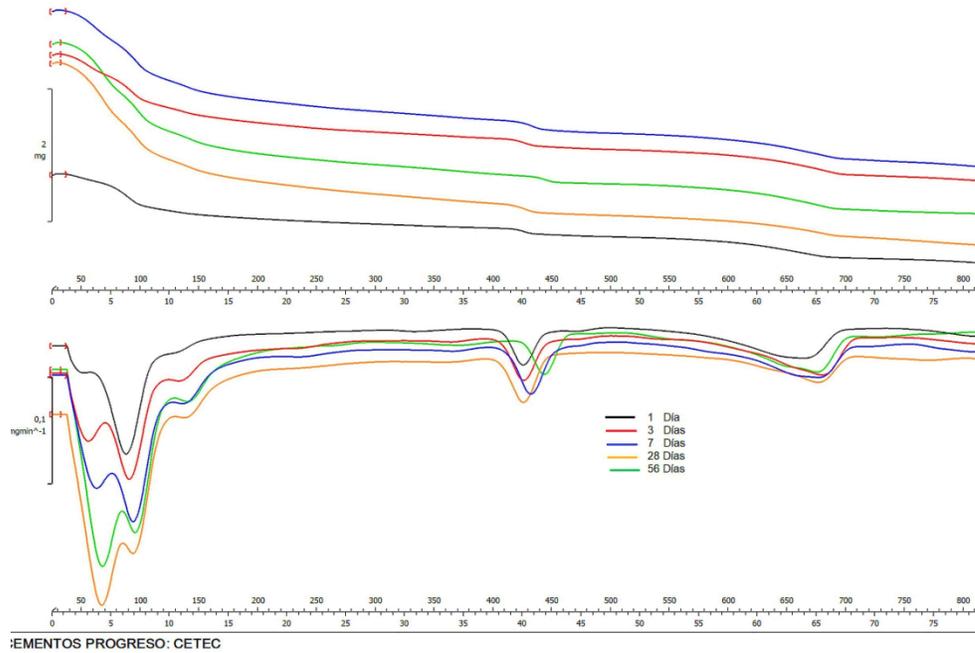
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. TGA cemento, prueba 2



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. TGA cemento, prueba 3



EMENTOS PROGRESO: CETEC

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El presente trabajo de graduación consistió en evaluar el efecto de variar el tamaño de partícula de las adiciones (caliza, puzolana natural y *fly ash*) en un cemento tipo uso general.

Dicho estudio se realizó analizando la resistencia a la compresión, al calor de hidratación y monitoreando el avance de hidratación con termogravimetría y difracción de rayos X. Primeramente, se determinó el tiempo de molienda (en minutos) óptimo para alcanzar mínimo un 80 % de fineza pasando tamíz 325 de las adiciones.

Se formularon cuatro cementos variando únicamente el tamaño de las adiciones ya que la dosificación fue la misma. En las tablas XI y XII se puede observar el tiempo de cada molienda, así como las finezas adquiridas para cada prueba de cemento. El *fly ash* fue el material adicional que alcanza más fineza en menor tiempo, por su granulometría de entrada (95 % pasante tamiz No. 325).

La caliza tiende a ser un material que se aglomera, por lo tanto, se monitoreó que al introducirla al molino tuviera una humedad relativa casi nula (menor al 1 %), y que el tiempo de molienda no fuera excesivo, ya que el molino tiende a perder el efecto de cascada y, por lo tanto, a pegarse el material en las bolas lo que causa un aglomeramiento y disminuye la fineza del material. Por lo anterior, lo que se realizó para prevenir dicho fenómeno fue moler a un 70 % fineza la caliza y tamizarla hasta alcanzar la finura de los tamices deseados.

En cuanto a la puzolana natural tiene un índice de molturabilidad de 0,5-1 lo cual le permite ser un material muy manejable en el molino; esto se demuestra ya que la puzolana alcanzó la fineza deseada en un tiempo máximo de 70 minutos como se observa en la tabla XI. Una vez molidas todas las adiciones, se procedió a realizar el cemento tipo uso general y realizar los ensayos respectivos.

Para corroborar el tamaño de las partículas de los cementos formulados y de las adiciones utilizadas se realizó el ensayo de tamaño de distribución de partícula con el equipo de difracción láser marca Cilas Liquiq, con las muestras en suspensión en isopropanol. En la tabla XII se presenta las finezas alcanzadas por la puzolana, caliza y *fly ash*. En la figura 10 se muestra la curva granulométrica. El cemento de la prueba 3 es el que posee las adiciones más finas y, por lo tanto, es el cemento que posee mayor fineza. EL 95 % del cemento de referencia tiene un tamaño menor a 40 micrómetros mientras que para los tres cementos de prueba más del 95 % tienen un tamaño menor a 40 micrómetros. En dicha curva se corrobora que el objetivo 1 se cumple ya que más del 80 % de las adiciones alcanzó la fineza propuesta.

Se prosiguió a realizar los morteros de los cementos para ejecutar el ensayo de resistencia a la compresión según la norma Coguanor NTG 41095. En la figura 7 se muestra el resultado de dicho ensayo de los cuatro cementos realizados; con base en ella se manifiesta que a resistencias tempranas los cuatro cementos (descritos en la tabla IV) tendieron hacia la misma resistencia; sin embargo, a los tres días de hidratación ya se observa una pequeña diferencia en resistencia entre los cementos; así mismo, conforme aumenta la edad de hidratación fue más notoria la diferencia de resistencia. Se demuestra que conforme aumenta la fineza también la resistencia a edades tardías.

El cemento después de los 56 días aún sigue con alguna ganancia de resistencia a la compresión, aproximadamente del 1 %; en la presente investigación los valores máximos obtenidos para los cementos fueron de: 5 309, 5 946, 6 067, 6 097 para los cementos de referencia, prueba 1, prueba 2 y prueba 3, respectivamente.

Al observar la tabla XIII y la figura 7 se demuestra que la adición de caliza ayuda a las resistencias tempranas (uno, tres y siete días de hidratación) y se evidenció que al variar el tamaño de partícula de la caliza no influye significativamente en la resistencia a la compresión ya que estas tendieron a ser iguales.

En cuanto al *fly ash* y la puzolana natural poseen altas propiedades puzolánicas (hidráulicas); por lo que al aumentar su fineza ayuda a que todos los silicatos presentes, logren reaccionar aumentando así su resistencia; esto es un gran aporte para la industria cementera y para el medio ambiente ya que con base en ello se reduce el factor clinker y, por lo tanto, aportan a la reducción de la huella de carbono del cemento.

Cabe mencionar que el tamaño de la partícula no solamente influye en la resistencia a la compresión, también, en el calor de hidratación. La adición de estos minerales modifica la cinética de reacción del cemento; en la figura 8, se muestra la potencia liberada; en los cuatro cementos se pueden identificar cuatro regiones:

- En la primera región correspondiente al rango de 0 a 3 600 segundos; se libera un flujo de calor que se presume que el cemento está en su fase inicial de hidratación y se está formando yeso dihidratado. La cal libre se está mojando para formar gel de sílice.

- En la segunda región correspondiente al rango de 3 600 a 16 000 segundos para todos los cementos se tiene una disminución de calor esto ocurre también en un periodo de tiempo más corto; algunos autores la relacionan con la disolución de C3S.
- En la tercera región, correspondiente al rango de 16 000 a 43 000 segundos para el cemento de referencia y de 16 000 a 68 000 segundos para los restantes, se nota un incremento del flujo de calor; esto se le atribuye a que se está consumiendo la alita e inclusive en menor cantidad también la belita para formar en grandes cantidades gel de sílice (C-S-H) y portlandita para brindarle resistencias tempranas. En este periodo, la diferencia en las cuatro pastas es el tiempo que se tomó cada cemento en la disolución de alita y belita, así como el calor liberado.

En la figura 8 se observa que al tener partículas más finas de las adiciones el cemento tiende a liberar menos energía y retardar la hidratación; por lo tanto, entre más finas estén las partículas se estará hidratando y reaccionando el gel de sílice y portlandita para brindarle al cemento mejores resistencias al cemento en edades tardías.

- En la cuarta región, correspondiente al rango de 43 000 a 90 000 segundos para el cemento de referencia y de 68 000 a 90 000 segundos para los restantes, se observa el pico máximo y una desaceleración del flujo de calor emitido; en esta etapa se presume que se está consumiendo aluminatos para formar sulfatos. Dicho valor máximo es de: 0,000166 W/g, 0,000154 W/g, 0,000151 W/g y 0,00009735 W/g para los cementos prueba 3, prueba 2, prueba 1 y de referencia, respectivamente.

En la figura 9 se presenta la energía liberada por el cemento a las 24 horas de hidratación, corrobora la región tres de la figura 8; ya que el cemento de la prueba tres es el que más se tarda en reaccionar y es el que menos energía necesita inversión. En general, mientras más fino este el cemento más tenderá a retardar su hidratación y la energía liberada por dicha reacción será menor.

Así mismo, en la tabla XII se demuestra con base en el método de la norma C186 que el cemento de la prueba 3 es el que más energía libera a 7 y 28 días; así mismo al realizar una comparación con la norma ASTM C 1157-09, los cuatro cementos formulados tienen características especiales del calor de hidratación para ser catalogados como un cemento de moderado calor de hidratación ya que a 7 días todos poseían por debajo de 290 KJ/kg. Puede ser utilizadas en obras de concreto normal en ambientes muy calurosos.

Al aumentar la fineza de las adiciones también aumentó el Blaine del cemento (área de contacto de superficie); por lo que el proceso de hidratación será mejor ya que no habrá muchos espacios vacíos en la pasta y el agua utilizada para la misma penetrará en toda la superficie y, por lo tanto, se logró reaccionar más gel de sílice. Con base en lo anterior se monitoreo el grado de hidratación del cemento con termogravimetría y difracción de rayos X.

El proceso de hidratación del cemento formulado variando la fineza de las adiciones se presenta en las figuras 13, 14, 15 y 16. En las cuatro figuras se puede observar un comportamiento similar; antes de los 100 °C se tiene pérdida de agua en el mortero.

A partir de los 110 – 180 °C se tiene una pequeña pérdida endotérmica causada por la deshidratación del gel de silicato cálcico hidratado (C-S-H); siendo la temperatura de deshidratación del gel de silicato cálcico hidratado para el cemento de referencia de 140 °C, para la prueba 1 °C de 150 °C, para la prueba 2 de 145 °C y para la prueba 3 de 155 °C.

De 400 °C – 500 °C se tiene una pérdida endotérmica debido a la deshidratación en la estructura de la portlandita. En la presente investigación la pérdida endotérmica de la portlandita fue de: 430 °C para el cemento de referencia y prueba 1, para la prueba 2 y prueba 3 de 440 °C.

Y la pérdida exotérmica a partir de los 700 °C es causada por la descomposición de carbonatos (CaCO_3) aun presentes sin consumirse en el mortero. La temperatura de descomposición determinada por el TGA para los cementos fue de: 700 °C para el de referencia, 690 °C para la prueba 1 y prueba 2 y 680 °C para la prueba 3.

En las cuatro curvas (figuras 13, 14, 15 y 16) se observa que la mayor pérdida está en el rango de 350 °C – 550 °C, ya que la portlandita aún posee bastante agua en su estructura.

Se observa que los cuatro cementos, al tener las mismas cantidades de adiciones (caliza, puzolana y *fly ash*) tienen las tres regiones de pérdida de masa y descomposición endotérmica. Se esperaría que al aumentar el porcentaje de adiciones al cemento tendría más pérdida en cada etapa, ya que se estaría brindando más reactividad puzolánica y, por lo tanto, brindando más gel de sílice para que aumenten las resistencias.

En la figura 11 y 12 se muestra el porcentaje de alita y belita de los cementos ensayados; se observa que el proceso de hidratación para los cementos más finos fue más lento ya que la alita en los primeros días se consumió en pocas cantidades, mientras que a edades tardías se consumió más rápidamente. En cuanto al porcentaje de belita en todos los cementos realizados disminuye más lento, e inclusive a 56 días, en todas las pastas realizadas, existía una gran cantidad para reaccionar y seguir aumentando la resistencia.

En referente a todos los ensayos realizados a los cuatro cementos, el mejor efecto lo brindó el cemento de la prueba tres, el cual posee las adiciones pasante 100 % de 30 micrómetros con fineza de cemento de 98,94 % pasante tamiz No. 325; ya que es el que se comporta mejor en resistencia a la compresión y en propiedades mecánicas. Su resistencia a 28 días fue de 5 639 PSI, 39 % más de resistencia al cemento tipo uso general normado en Coguanor NTG 41095 en vigencia.

CONCLUSIONES

1. Existe diferencia significativa, 70 % de diferencia de resistencia a la compresión entre los valores de la resistencia a la compresión para las muestras a diferentes edades del cemento tipo uso general a diferente tamaño de partícula. Se acepta la hipótesis alternativa.
2. El efecto que tiene variar 5 % el tamaño de partícula de las adiciones: caliza, puzolana natural y ceniza volante, al cemento tipo uso general aumenta un 5 % la resistencia a la compresión a edades tardías, reduciendo el factor clinker.
3. El tiempo para alcanzar la fineza requerida en el molino de bolas en Cetec oscila entre 10 a 70 minutos para los materiales en estudio y carga de bolas utilizada disponible, respectivamente.
4. El tamaño de partícula óptimo estudiado en la presente investigación que producen el mejor desarrollo de la resistencia a la compresión del cemento a las edades de 1, 3, 7, 28 y 56 días en el cual se utilizaron las adiciones; caliza, puzolana y *fly ash* de 30 micrómetros.
5. El calor de hidratación de los cuatro cementos formulados ensayados con la norma ASTM C186, se catalogan como cementos de moderado calor de hidratación. La energía liberada por el cemento en el proceso de hidratación aumenta conforme disminuye el tamaño de partícula de las adiciones estudiadas, caliza, *fly ash* y puzolana.

6. El proceso de hidratación entre los cuatro cementos no varía significativamente; el tamaño de partícula afecta la cinética con la que es consumida la alita y belita en la reacción, a los 56 días, 2 % de alita y 8 % de belita sin reaccionar.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio variando el tamaño de las adiciones ultrafinas, menores a 16 micrómetros; así mismo, de nanopartículas, en un micronizado de laboratorio.
2. Realizar una investigación variando el tamaño de las partículas en molienda conjunta.
3. Llevar la presente línea de investigación a escala industrial, ya que traerá muchos beneficios económicos para la industria; porque se ahorraría en el consumo de materias primas que tiene mayor valor monetario.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Adiciones y cemento con adiciones*. [En línea]. <<http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/969/1029>>. [Consulta: 7 de abril de 2017].
2. American Society for Testing and Materials. *Designation C 311-05. Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete*. Estados Unidos: ASTM internacional, 2006. 392 p.
3. _____. *Designation C618-05. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. Estados Unidos: ASTM internacional, 2005. 193 p.
4. _____. *Designation C186-05. Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement*. Estados Unidos: ASTM internacional, 2005. 403 p.
- 5.
6. CALDERÓN GARCÍA, José Eduardo. *Producción de cemento Portland*. Lugar de publicación: presentación power point. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2007. 294 p.

7. *Cenizas, cementos y hormigones con ceniza*. [En línea]. <<http://materconstrucc.revistas.csic.es>>. [Consulta:4 de abril de 2017].
8. Comité Técnico de Normalización de Cemento (CTN Cemento). *Coguanor NTG-41095. Cementos hidráulicos. Especificaciones por desempeño*. Guatemala: Comisión Guatemalteca de normas, Ministerio de Economía, 2014. 392 p.
9. _____. *Coguanor NTG 41001 Terminología referente al cemento hidráulico*. Guatemala: Comisión Guatemalteca de normas, Ministerio de Economía, 2014. 139 p.
10. _____. *Coguanor NTG 41002. Práctica para la mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica*. Guatemala: Comisión Guatemalteca de normas, Ministerio de Economía, 2013. 294 p.
11. _____. *Coguanor NTG 41003 h4. Método de ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de mortero de cemento hidráulico usando especímenes cúbicos de 50mm (2pulg) de lado*. Guatemala: Comisión Guatemalteca de normas, Ministerio de Economía, 2012. 254 p.
12. _____. *Coguanor NTG 41003 h13 Método de ensayo. Determinación del flujo en morteros de cemento hidráulico*. Guatemala: Comisión Guatemalteca de normas, Ministerio de Economía, 2012. 473 p.

13. DUDA, H. Walter. *Manual tecnológico del cemento*. España: Reverté, 2003. 85 p.
14. FERNÁNDEZ PEREZ, Alvaro. *Mezclas ternarias en el desarrollo de materiales base cemento con un bajo impacto ambiental*. España: Universidad Autónoma de Madrid, 2016. 392 p.
15. *Fine particle size cement compositions*. [En línea]. <<https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/0f3f0634a381cb6836cb/EP0611081A2.pdf>>. [Consulta: 14 de diciembre de 2017].
16. HOHELLA, M. F. *Atomic structure, microtopography, composition and reactivity of mineral surfaces, reviews in mineralogy, mineral-water interface geochemistry, mineralogical society of America*. 23^a ed. Estados Unidos: Mcgraw Hill, 1990. 248 p.
17. Instituto de Investigación en Ciencia de la Construcción, Jiangsu. *Optimization of Ultrafine Limestone Filler on Cement Grain Composition*. China: Laboratorio de ingeniería de los materiales, China, 2000. 294 p.
18. JIHUI ZHAO, Dongmin Wang. *Ultrafine grinding of fly ash with grinding aids: Impact on particle characteristics of ultrafine fly ash and properties of blended cement containing ultrafine fly ash*. China: School of Chemical and Environment Engineering, China, 2015. 103 p.

19. KJELLEN, K. O.; LAGERBLAD, B. *Effect of mineralogy of fillers on the cement hydration, in proceedings of the NATO/RILEM workshop The modelling of microstructure and its potential for studying transport properties and durability*. Alemania: Kluwer academic publishers, 1994. 293 p.
20. KLEIN CORNELIS, Hurbult Cornelius. *Manual de mineralogía*. España: Reverté, 1998. 292 p.
21. *Laboratorio de Molienda. Aplicación de molturabilidad del clinker y materias primas. Fundiciones del Estanda, S.A.* [En línea]. <<http://imcyc.com/biblioteca/ArchivosPDF/Molienda%20del%20Cemento/4%20El%20laboratorio%20de%20molienda%20aplicacion%20de%20la%20molturabilidad%20del%20clinker%20en%20el%20dise%C3%B1o%20y%20mantenimiento%20de%20elementos%20sometidos%20a%20desgaste.pdf>>. [Consulta: 12 de diciembre de 2017].
22. LIU JUN, Wu Kewei; WANG YUFEI, Yuanquan. *Effects of Fly Ash/Diatomite Admixture with Variable Particle Sizes on the Mechanical Properties and Porosity of Concrete*. China: School of Materials Science and Engineering and Dalian University of Technology, 2006. 184 p.
23. LUJÁN MONTES, Brian Alexander. *Determinación de la relación diámetro promedio de partícula media en un granulómetro laser y resistencias tardías para un cemento tipo I, para la implementación de un sistema de medición en línea*. Trabajo de

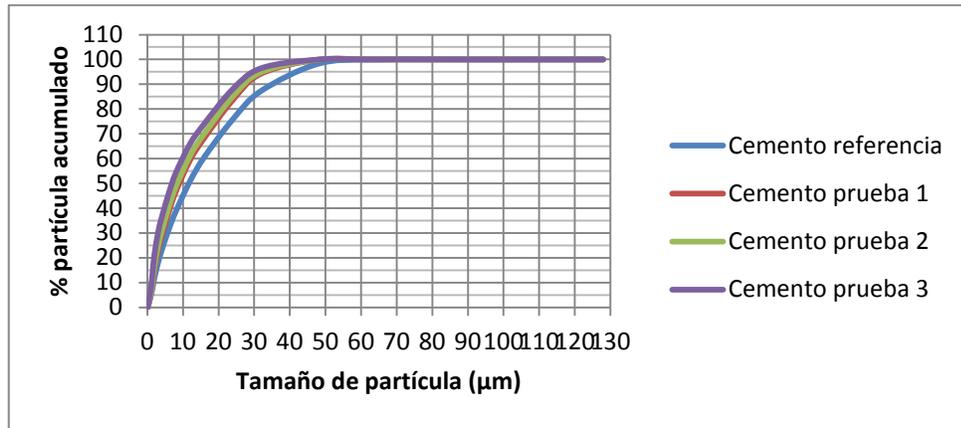
graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2007. 247 p.

24. *Materiales cementicios*. [En línea]. <<http://www.fceia.unr.edu.ar/~fermar/Apuntes%20Tecnolog%C3%ADa%20del%20Hormig%C3%B3n%20UTN%20FRSF/Unidad%202%20MATERIALES%20CEMENTICIOS.pdf>>. [Consulta: 10 de abril de 2017].
25. *Proceso de fabricación del cemento Portland*. [En línea]. <<http://historiaybiografias.com/cemento/>>. [Consulta: 23 de diciembre de 2017].
26. *Reacción puzolánica*. [En línea]. <<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion4.Reaccion.PUZOLANICA.pdf>>. [Consulta: 17 de marzo de 2017].
27. SANYTSKY, Myroslav; RUSYN, et al. *Influence of ultrafine ground fly ash on the microstructure and properties of cementitious*. Ucrania: Lviv Polytechnic National University, 2016. 291 p.
28. SHAOLONG LIUA, Tongsheng Zhangabc; YIQUN GUOA, Jiangxiong Weiab QijunYuab. *Effects of SCMs particles on the compressive strength of micro-structurally designed cement paste: Inherent characteristic effect, particle size refinement effect, and hydration effect*. China: School of Chemical and Environment Engineering, 2010. 304 p.
29. Verder Wcientific. *The art of milling*. Alemania: Technische Universität, 2010. 184 p.

30. Vogt Carsten. *Influence of ultrafine particles on concrete properties and application to concrete mix design*. Alemania: Technische Universität, 2010. 289 p.

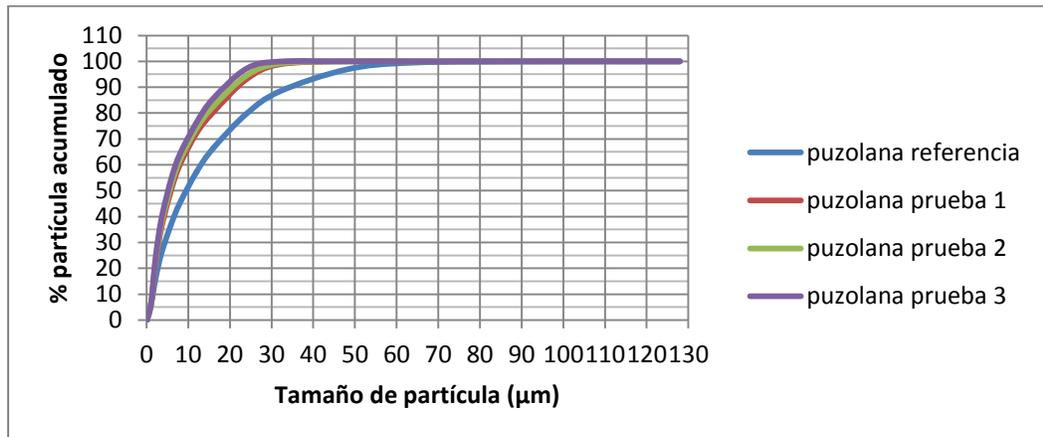
APÉNDICES

Apéndice 1. Distribución de tamaño de la partícula cemento formulado



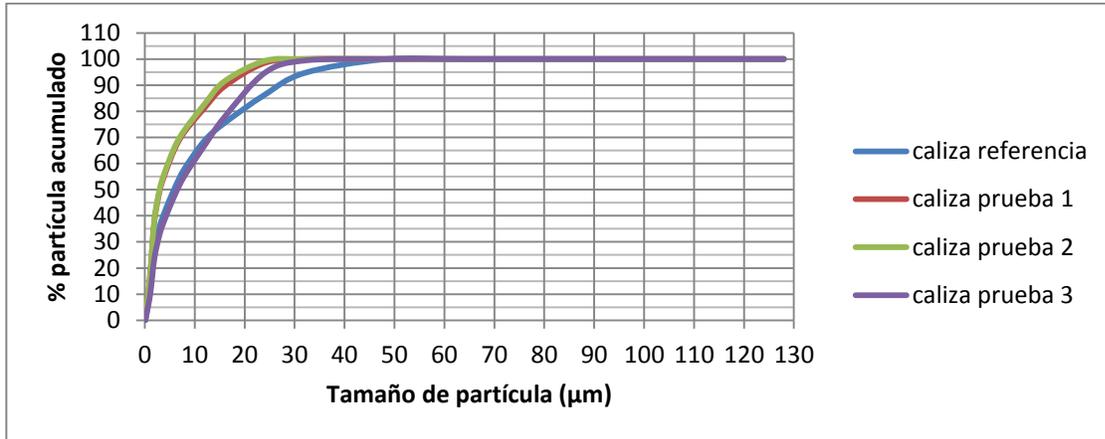
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Distribución del tamaño de la partícula puzolana natural



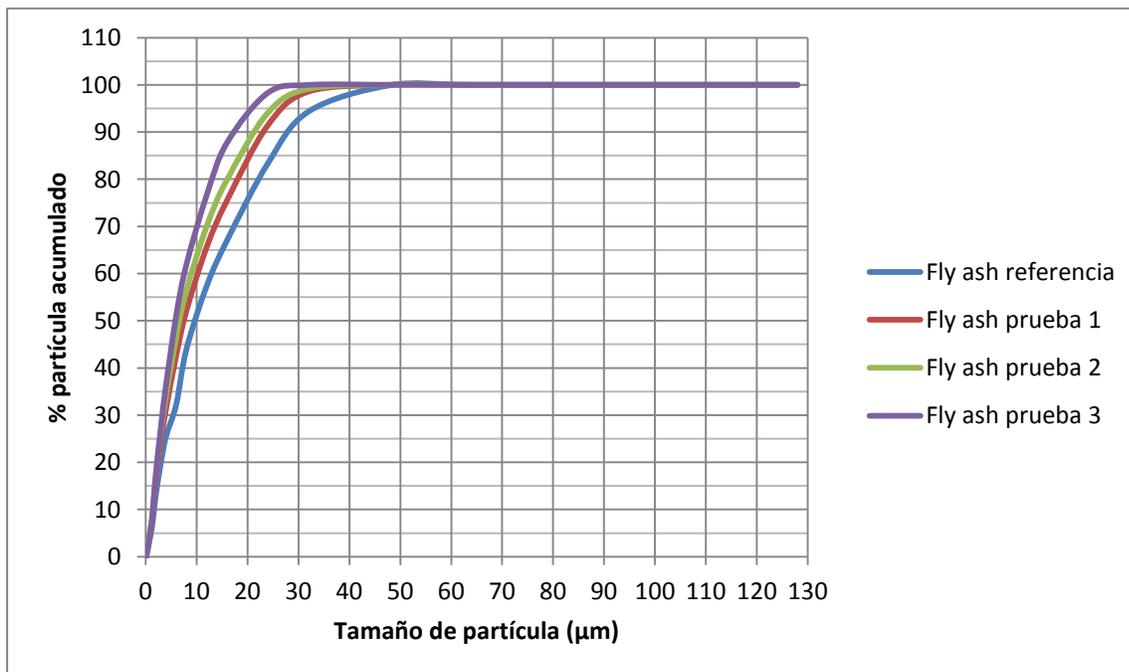
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Distribución del tamaño de la partícula caliza



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Distribución de tamaño de partícula ceniza volante



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Cemento referencia**

Día	Núm.	Resistencia (psi)	Día	Núm.	Resistencia (psi)
1	1	1 753,505793	56	1	5 080,670631
	2	1 717,246368		2	5 099,525532
	3	1 769,45994		3	4 973,342733
	4	1 783,96371		4	5 437,463373
	5	1 797,017103		5	5 681,126709
	6	1 689,689205		6	5 582,501073
	promedio	1 751,813687		promedio	5 309,105009
	Desviación estándar	41,09884931		Desviación estándar	296,1295497
3	1	2 954,417949			
	2	2 729,609514			
	3	2 819,532888			
	4	2 831,135904			
	5	2 905,105131			
	6	2 813,73138			
	promedio	2 842,255461			
	Desviación estándar	78,3239391			
7	1	3 460,599522			
	2	3 624,05701			
	3	3 551,973273			
	4	3 630,293631			
	5	3 556,324404			
	6	3 556,324404			
	promedio	3 563,262041			
	Desviación estándar	61,56712273			
28	1	4 493,267946			
	2	4 557,084534			
	3	4 542,580764			
	4	4 951,587078			
	5	4 910,976522			
	promedio	4 691,099369			
	Desviación estándar	220,9948149			

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Cemento, prueba 1**

Día	Núm.	Resistencia (psi)	Día	Núm.	Resistencia (psi)
1	1	1 827,47502	56	1	5 997,308895
	2	1 811,520873		2	6 048,07209
	3	1 805,719365		3	5 711,584626
	4	1 731,750138		4	6 013,263042
	5	1 731,750138		5	5 958,148716
	promedio	1 781,643107		promedio	5 945,675474
	Desviación estándar	11,26573585		Desviación estándar	134,7898952
3	1	2 954,417949			
	2	2 729,609514			
	3	2 819,532888			
	4	3 116,860173			
	5	3 012,433029			
	6	3 148,768467			
	promedio	2 963,60367			
	Desviación estándar	113,1510976			
7	1	3 460,599522			
	2	3 624,05701			
	3	3 551,973273			
	4	3 665,102679			
	5	3 927,620916			
	6	3 900,063753			
	promedio	3 688,236192			
	Desviación estándar	188,2637114			
28	1	4 557,084534			
	2	4 542,580764			
	3	5 333,036229			
	promedio	4 810,900509			
	Desviación estándar	452,2409451			

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Cemento, prueba 2**

Día	Núm.	Resistencia (psi)	Día	Núm.	Resistencia (psi)
1	1	1 807,169742	56	1	6 155,399988
	2	1 876,787838		2	6 236,6211
	3	1 849,230675		3	5 952,347208
	4	1 747,704285		4	5 939,293815
	5	1 736,101269		5	6 032,117943
	6	1 737,551646		6	6 088,682646
	promedio	1 792,424243		promedio	6 067,41045
	Desviación estándar	35,05994535		Desviación estándar	106,2433465
3	1	3 047,242077			
	2	3 160,371483			
	3	3 257,546742			
	4	3 025,486422			
	5	3 083,501502			
	6	3 121,211304			
	promedio	3 115,893255			
	Desviación estándar	105,2531437			
7	1	4 074,108993			
	2	3 984,185619			
	3	3 960,979587			
	4	3 831,896034			
	5	3 711,514743			
	6	3 866,705082			
	promedio	3 904,898343			
	Desviación estándar	128,2568526			
28	1	5 592,653712			
	2	5 219,906823			
	3	5 331,585852			
	4	5 277,921903			
	5	5 617,310121			
	6	5 549,142402			
	promedio	5 431,420136			

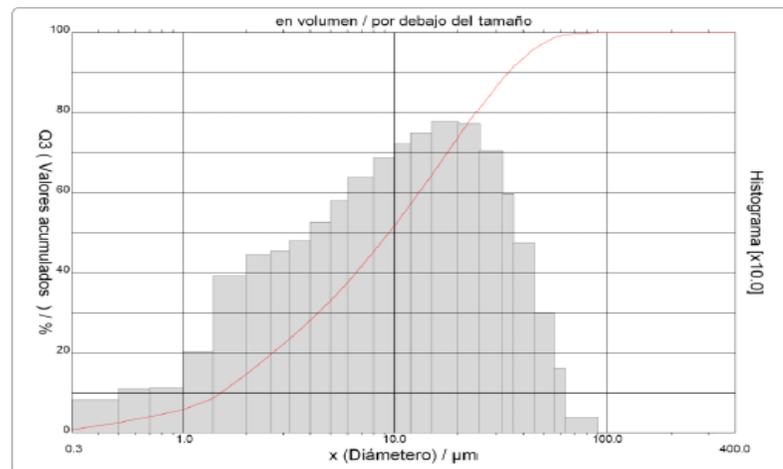
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Cemento, prueba 3**

Día	Núm.	Resistencia (psi)	Día	Núm.	Resistencia (psi)
1	1	1 688,238828	56	1	6 194,560167
	2	1 586,712438		2	6 010,362288
	3	1 596,865077		3	6 097,384908
	4	1 541,750751		4	6 175,705266
	5	1 559,155275		5	6 103,186416
	6	1 585,262061		promedio	6 116,239809
	promedio	1 592,997405		Desviación estándar	65,43113459
	Desviación estándar	50,90527126			
	3	1		3 051,593208	
2		3 158,921106			
3		3 051,593208			
4		3 229,989579			
5					
6					
promedio		3 123,024275			
Desviación estándar		61,9657908			
7	1	3 723,117759			
	2	3 849,300558			
	3	3 750,674922			
	4	3 839,147919			
	5	3 849,300558			
	6	3 865,254705			
	promedio	3 812,799404			
	Desviación estándar	6 0,02119633			
28	1	5 656,4703			
	2	5 668,073316			
	3	5 591,203335			
	4	5 388,150555			
	5	5 379,448293			
	6	5 192,34966			
	promedio	5 479,282577			
	Desviación estándar	41,43951552			

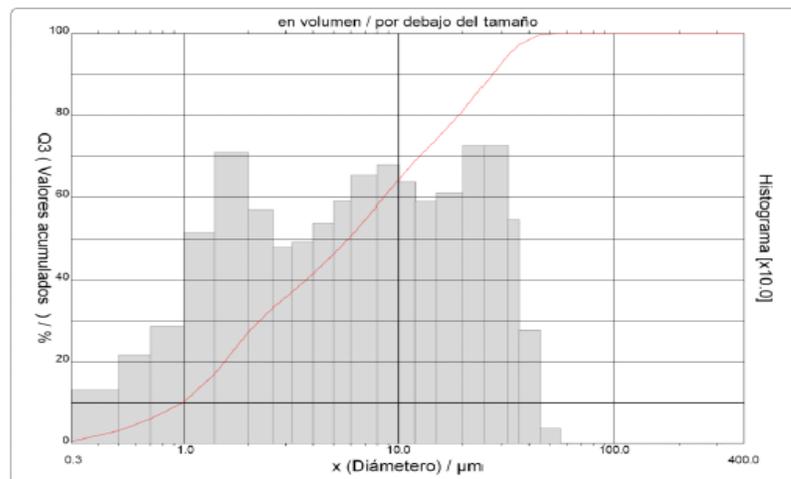
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Histograma de la puzolana natural utilizada en el cemento referencia**



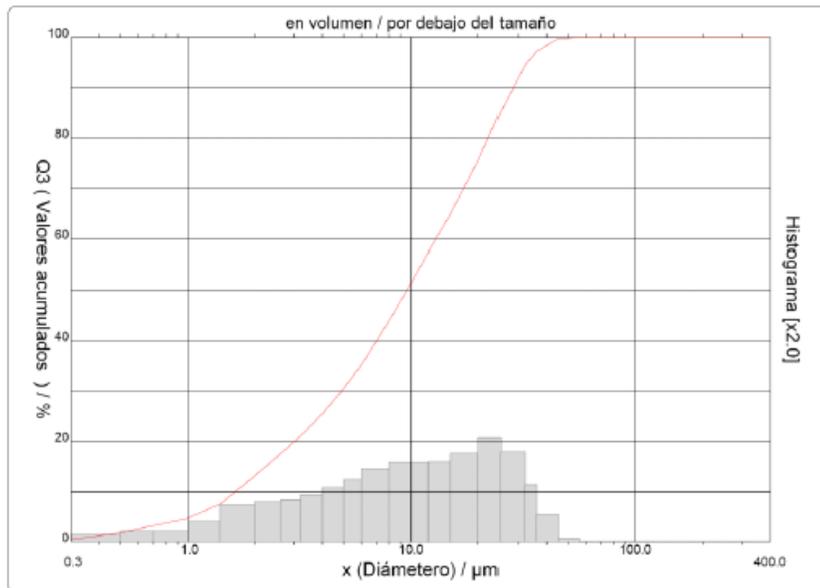
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Histograma de la caliza utilizada en el cemento referencia**



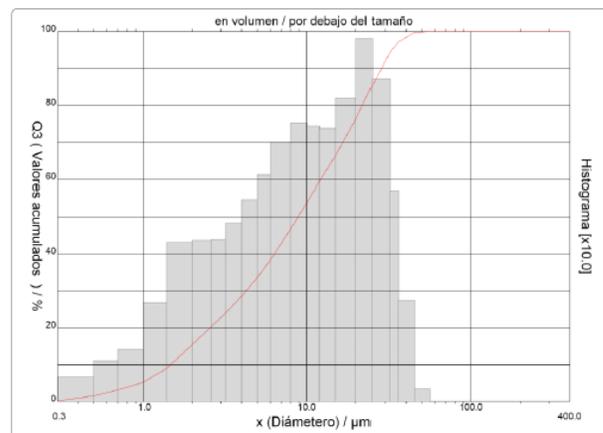
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Histograma de *fly ash* utilizada en cemento referencia**



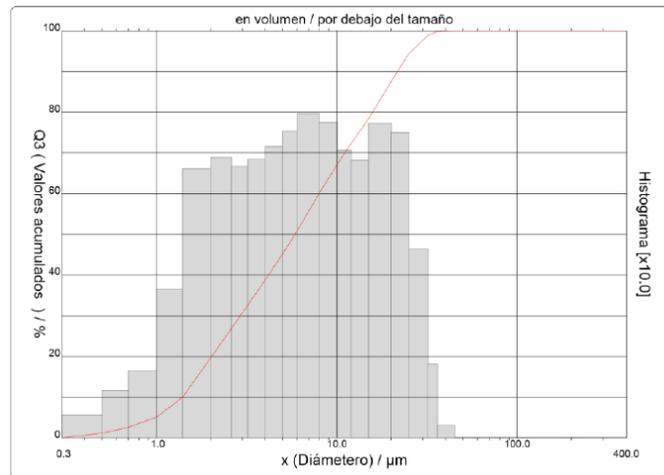
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Histograma del cemento referencia**



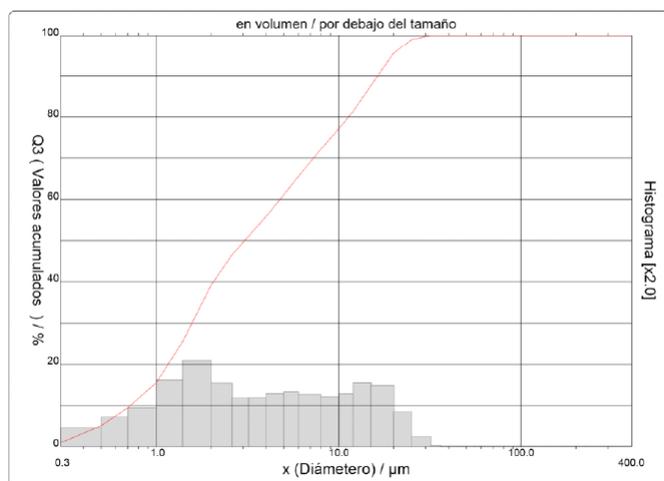
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Histograma de la puzolana natural utilizada en cemento, prueba 1**



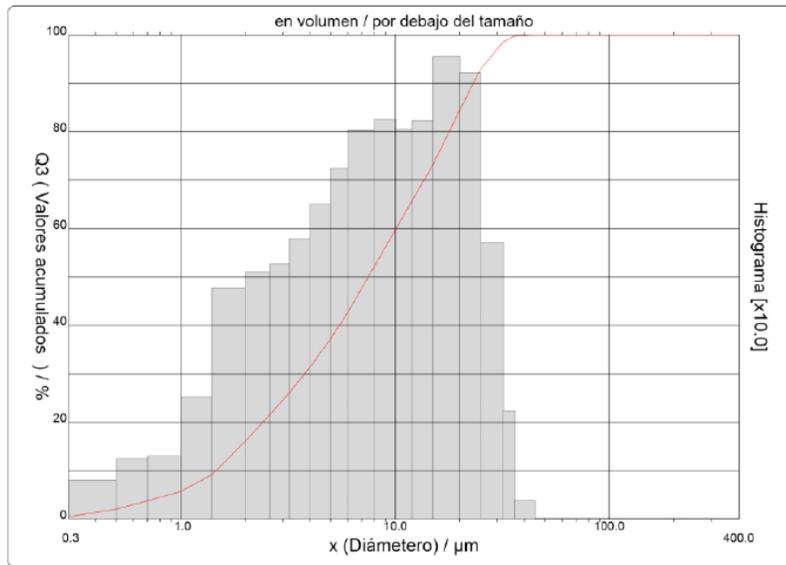
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Histograma de caliza utilizada en cemento prueba 1**



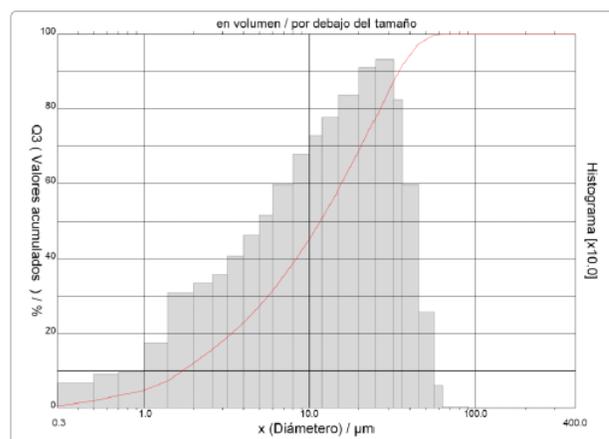
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Histograma de *fly ash* utilizada en el cemento, prueba 1**



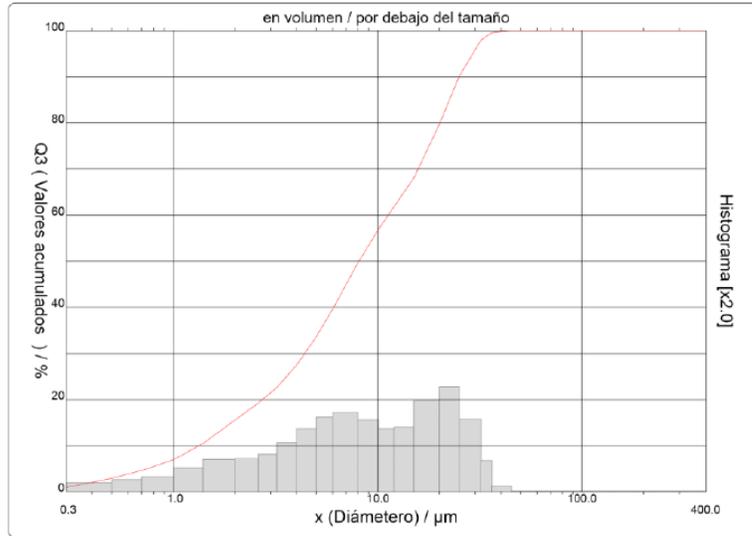
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Histograma del cemento, prueba 1**



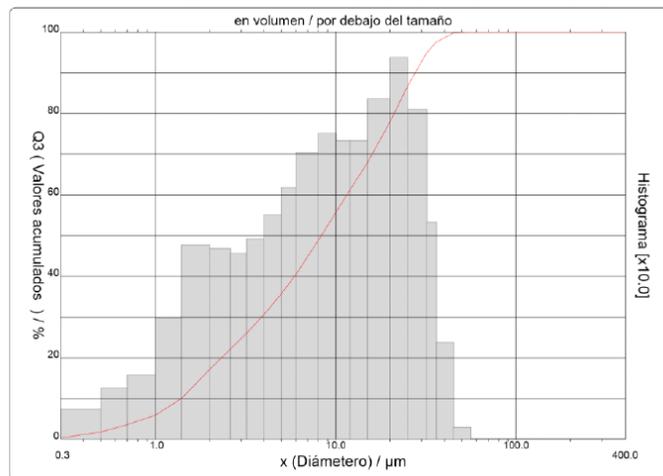
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Histograma del cemento utilizado como materia prima**



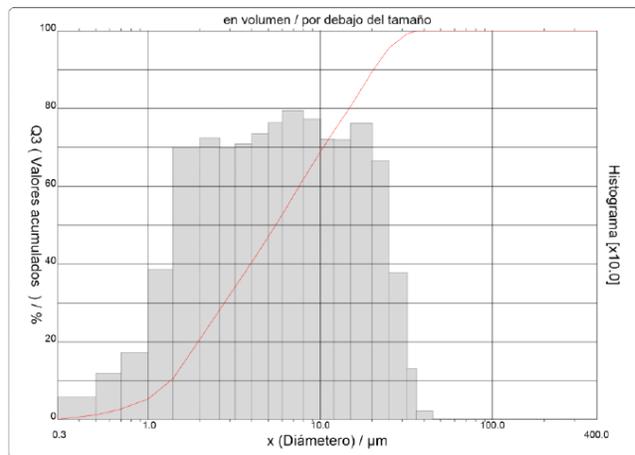
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18. **Histograma del cemento, prueba 2**



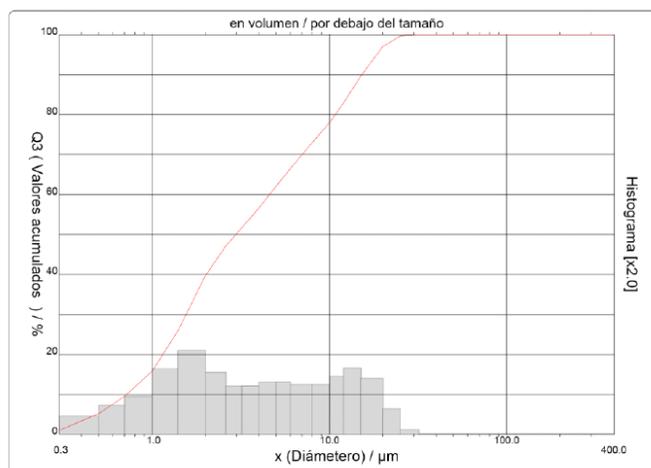
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. **Histograma de la puzolana natural utilizada en el cemento, prueba 2**



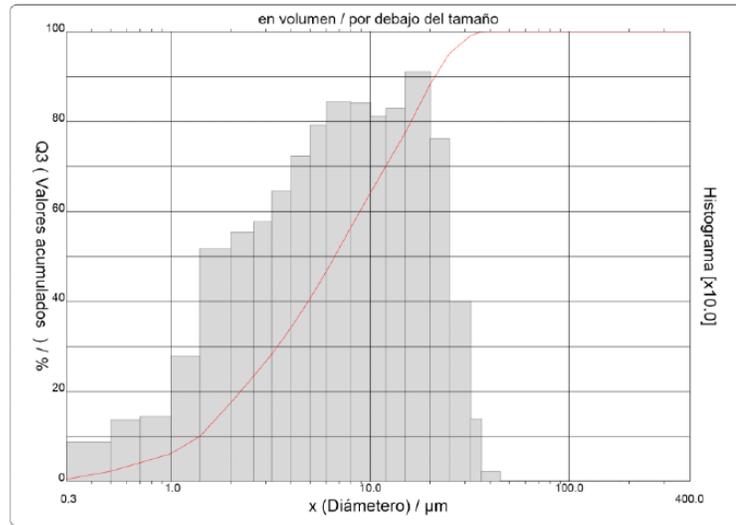
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 20. **Histograma de la caliza utilizada en el cemento, prueba 2**



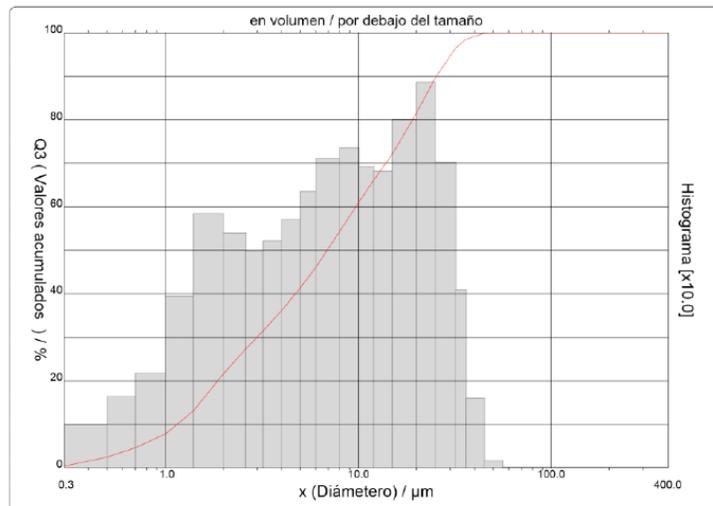
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 21. **Histograma de *fly ash* utilizada en el cemento, prueba 2**



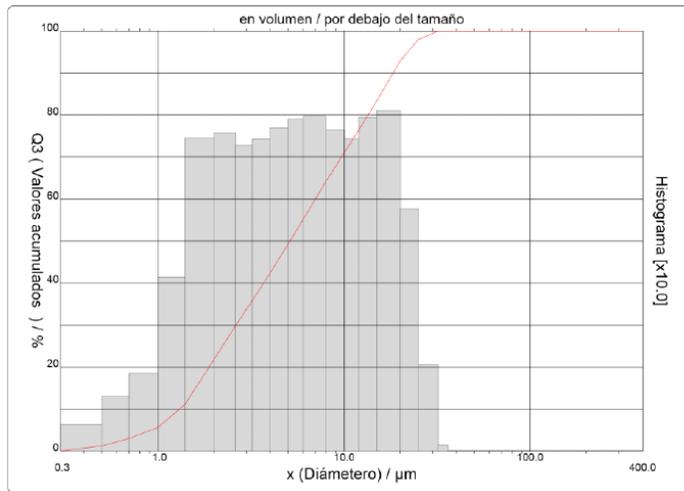
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 22. **Histograma del cemento, prueba 3**



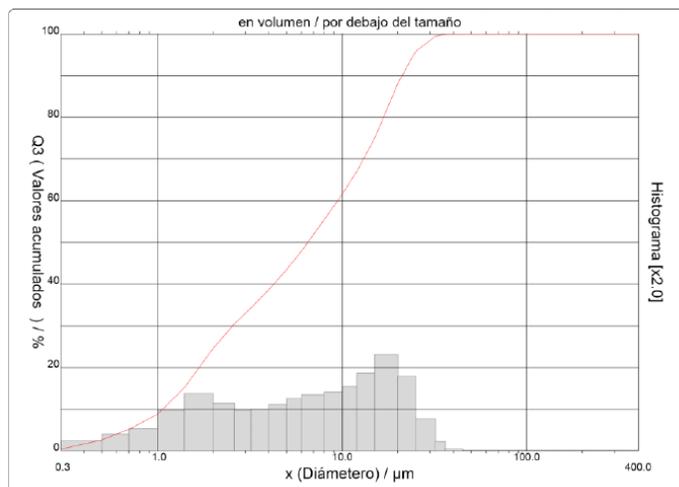
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 23. **Histograma de la puzolana natural utilizada en el cemento, prueba 3**



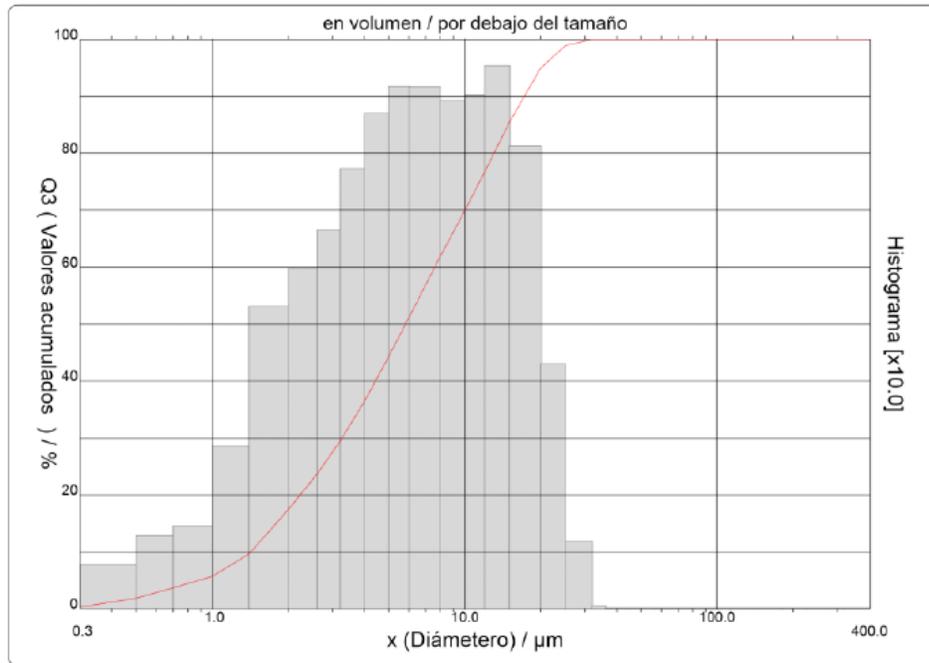
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 24. **Histograma de la caliza utilizada en el cemento, prueba 3**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 25. **Histograma de *fly ash* utilizada en el cemento, prueba 3**



Fuente: elaboración propia.

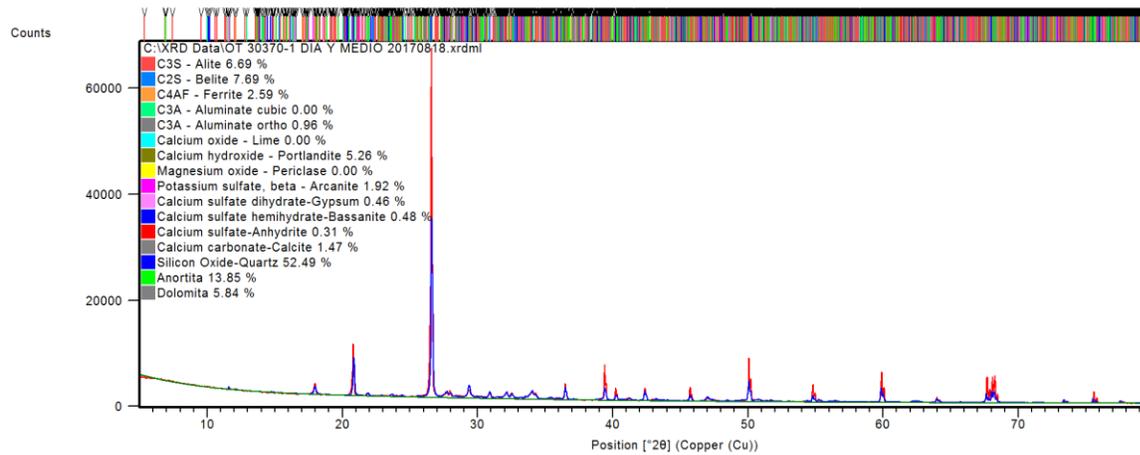
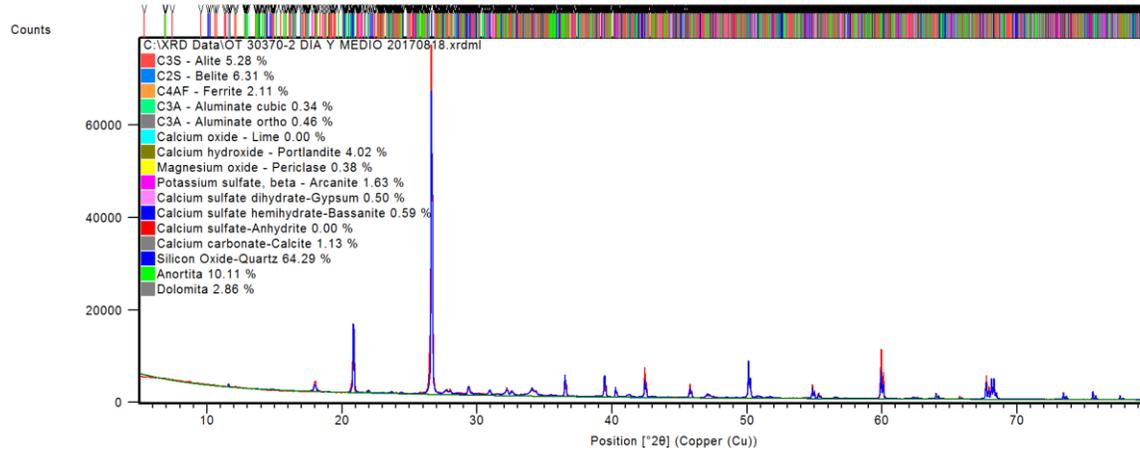
Apéndice 26. **Distribución del tamaño de bolas del molino**

	Relación de tamaño de bola (% PESO)							Total
	15 (mm)	17 (mm)	19(mm)	22 (mm)	26 (mm)	33 (mm)	39 (mm)	
Referencia	0	0	10 %	13 %	21 %	27 %	29 %	100
Prueba 1	20 %	20 %	10 %	10 %	15 %	15 %	10 %	100
Prueba 2	45 %	30 %	5 %	5 %	10 %	5 %	0 %	100
Prueba 3	63 %	25 %	7 %	5 %	0 %	0 %	0 %	100

Fuente: elaboración propia.

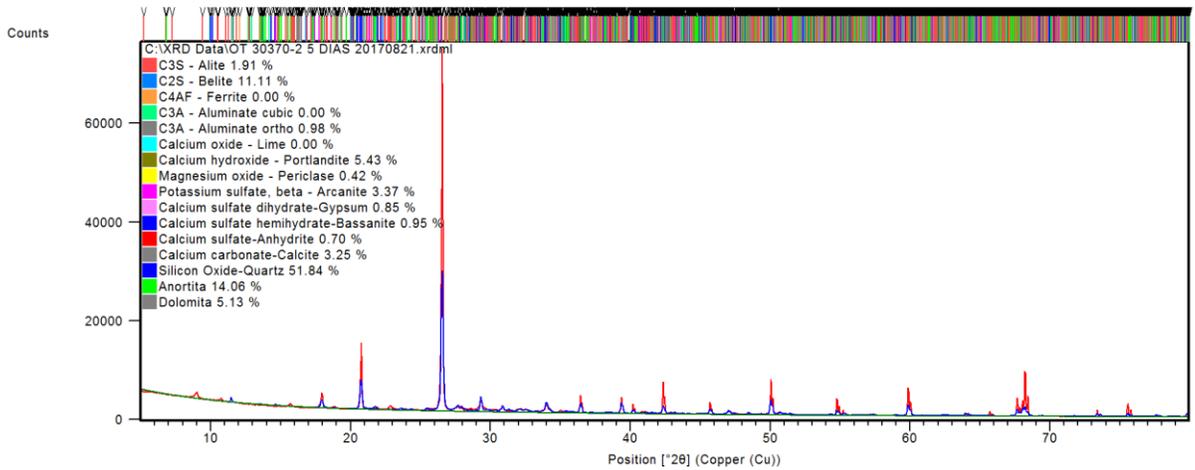
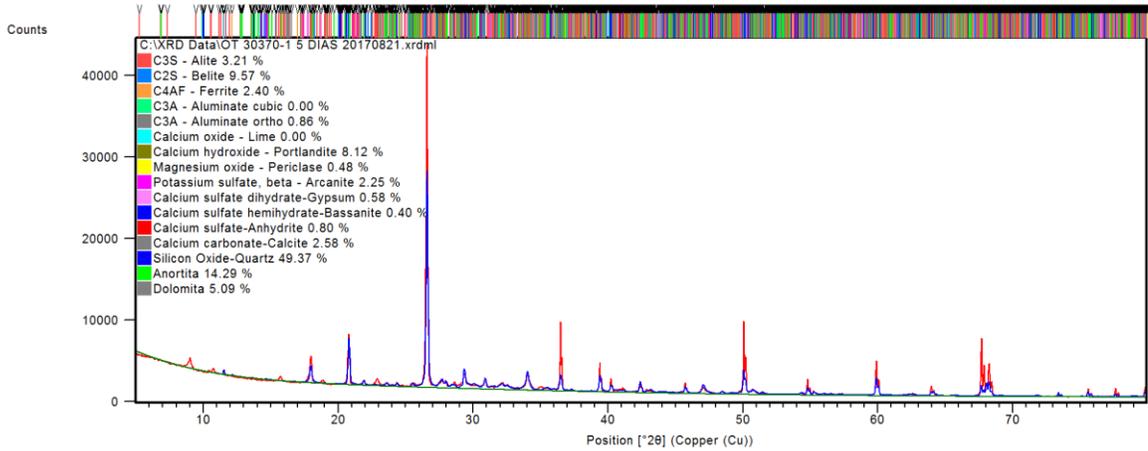
Apéndice 27. Cemento de referencia

1 día



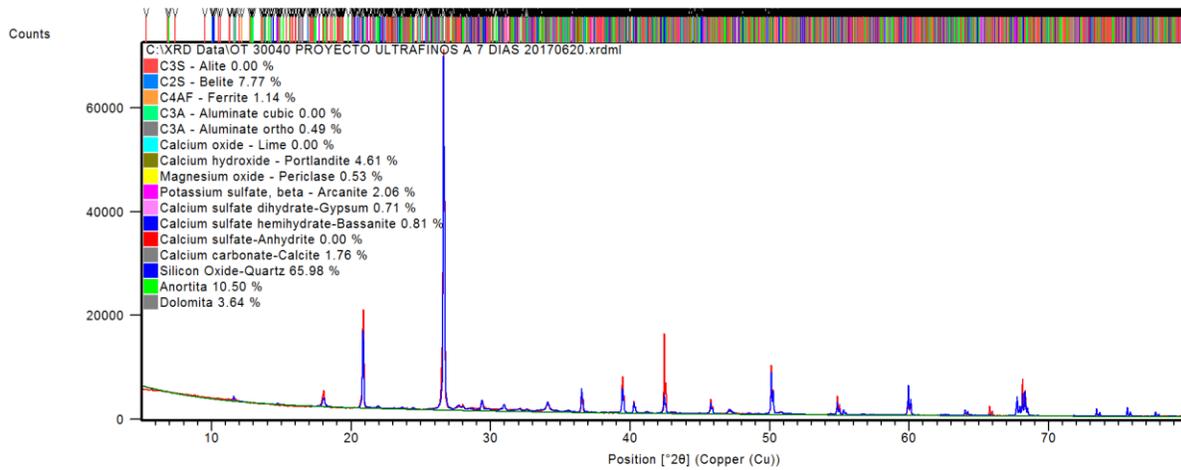
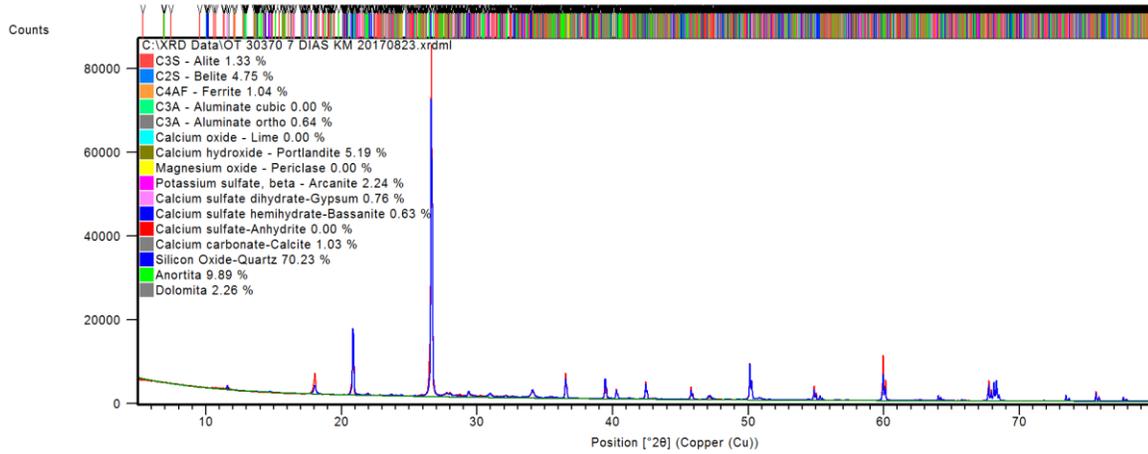
Continuación del apéndice 27.

3 días



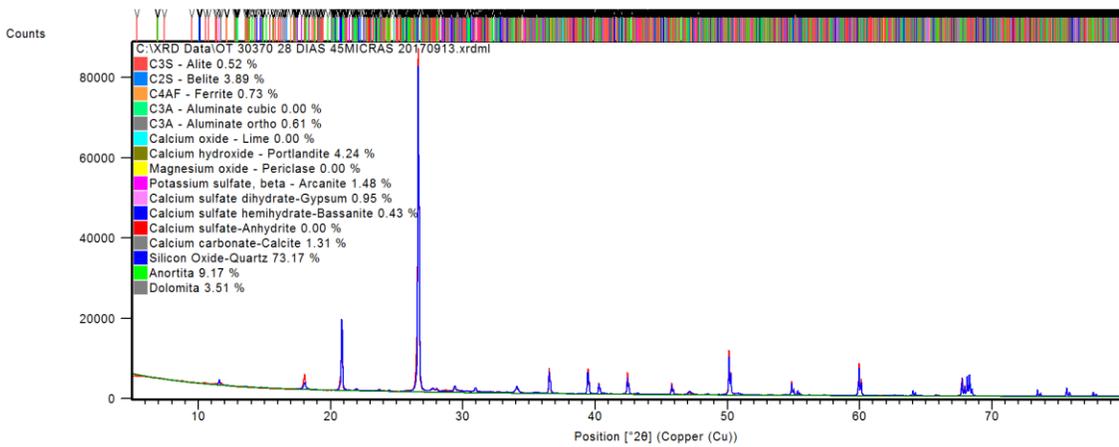
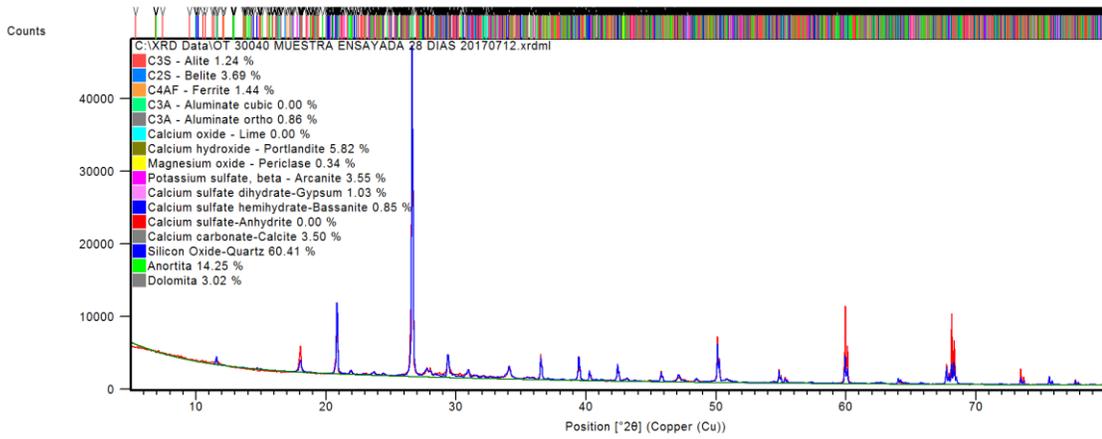
Continuación del apéndice 27.

7 días



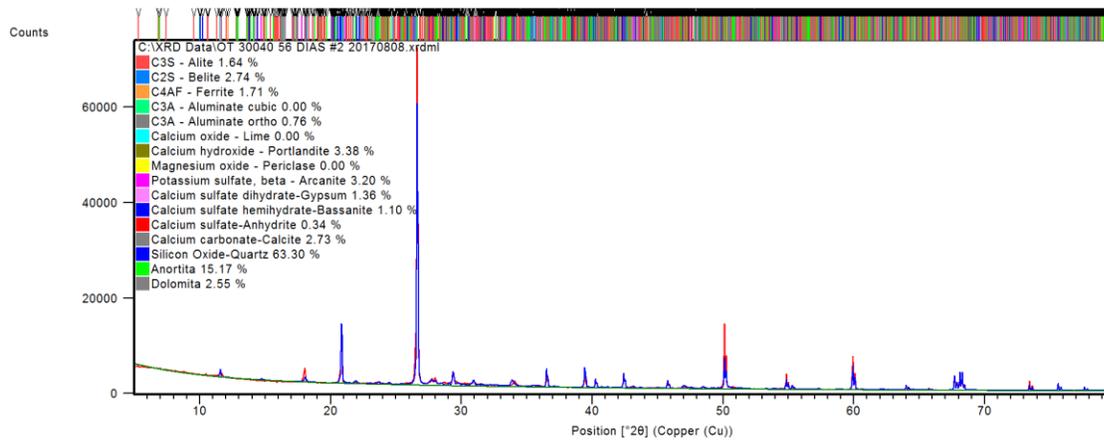
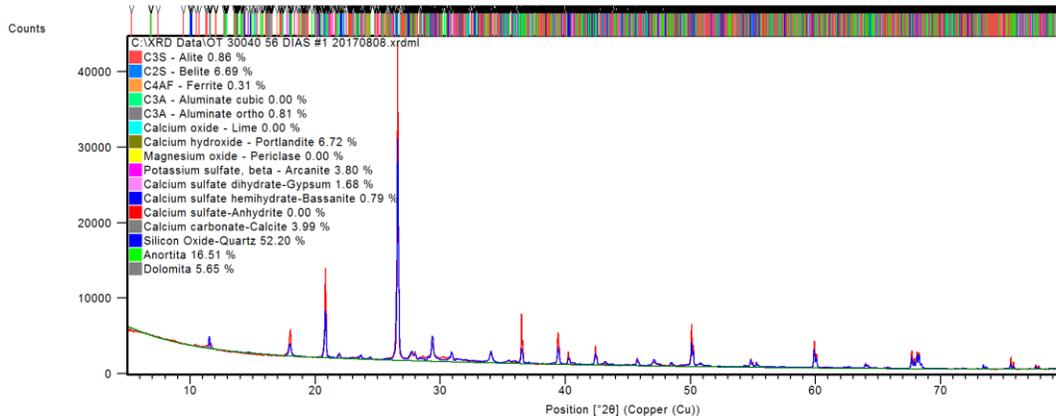
Continuación del apéndice 27.

28 días

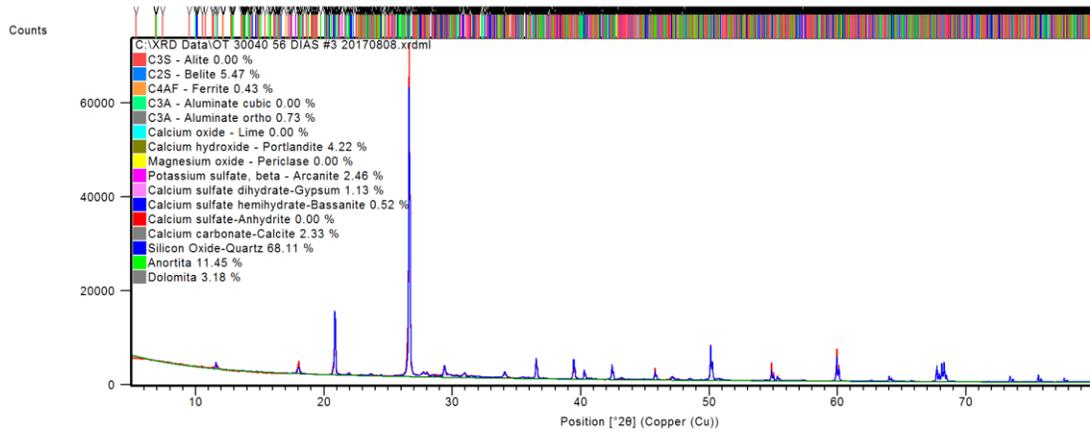


Continuación del apéndice 27.

56 días



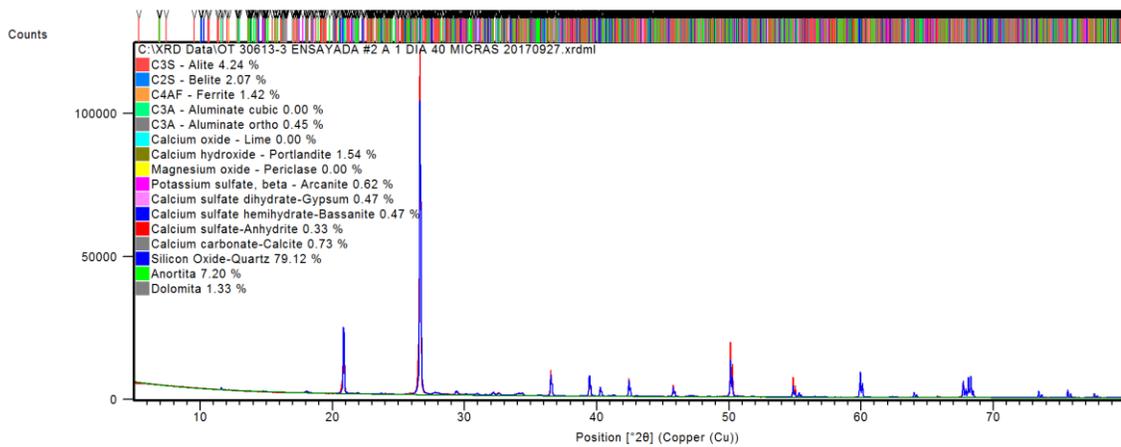
Continuación del apéndice 27.



Fuente: elaboración propia.

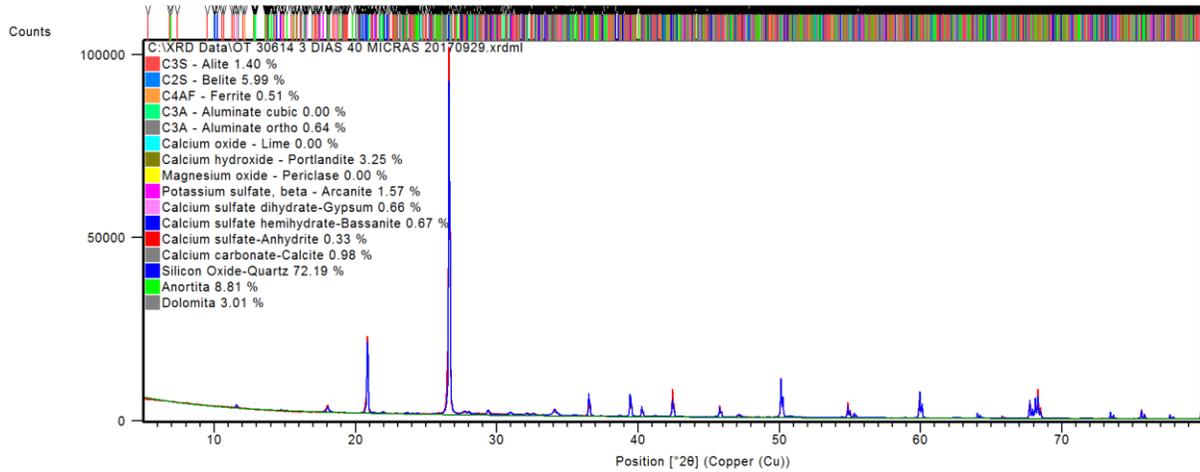
Apéndice 28. **Cemento, prueba 1**

1 día

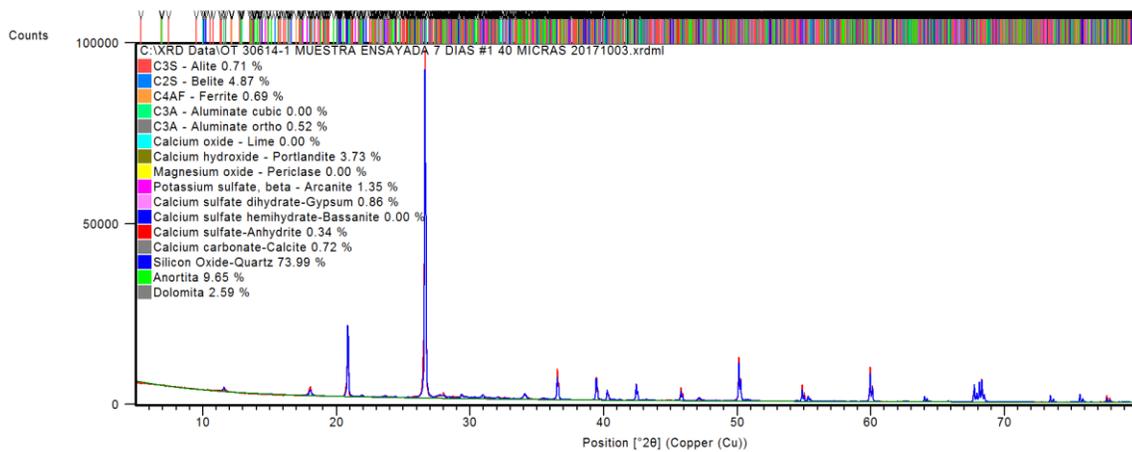


Continuación del apéndice 28.

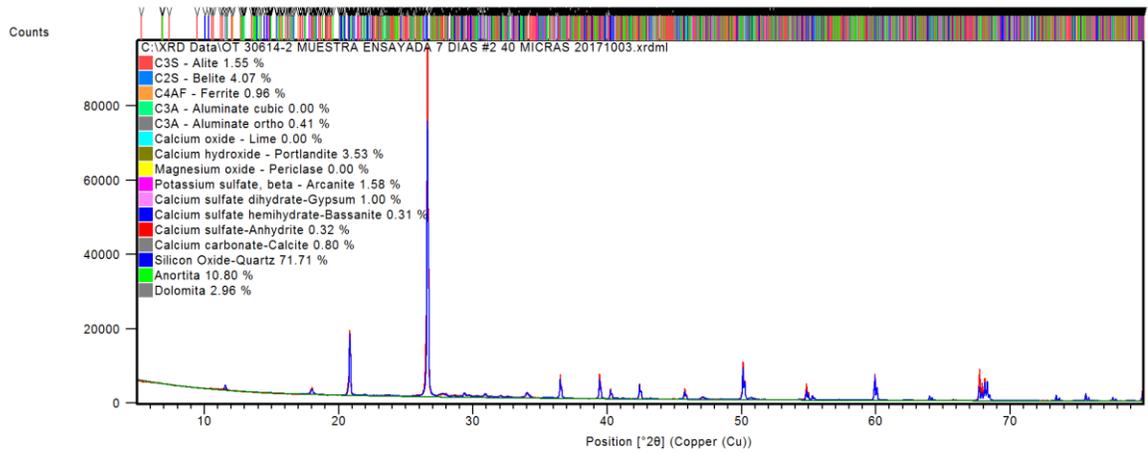
3 días



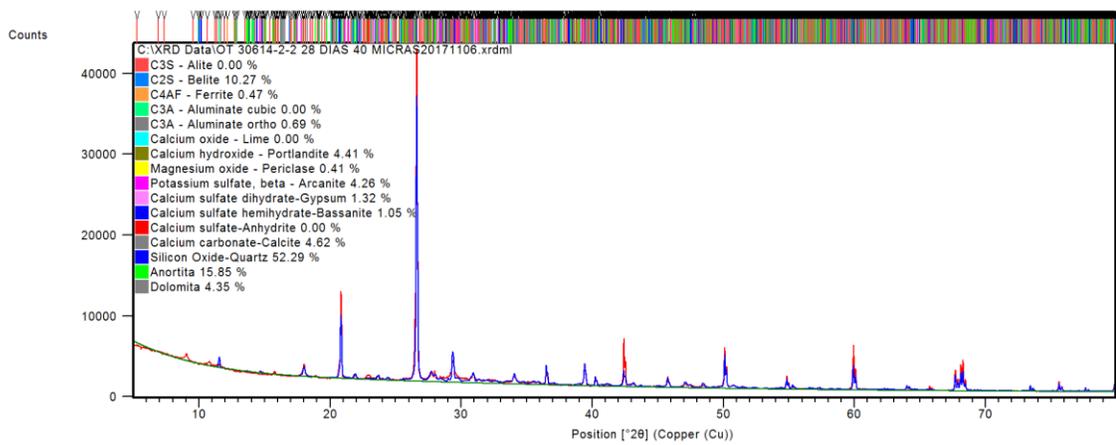
7 días



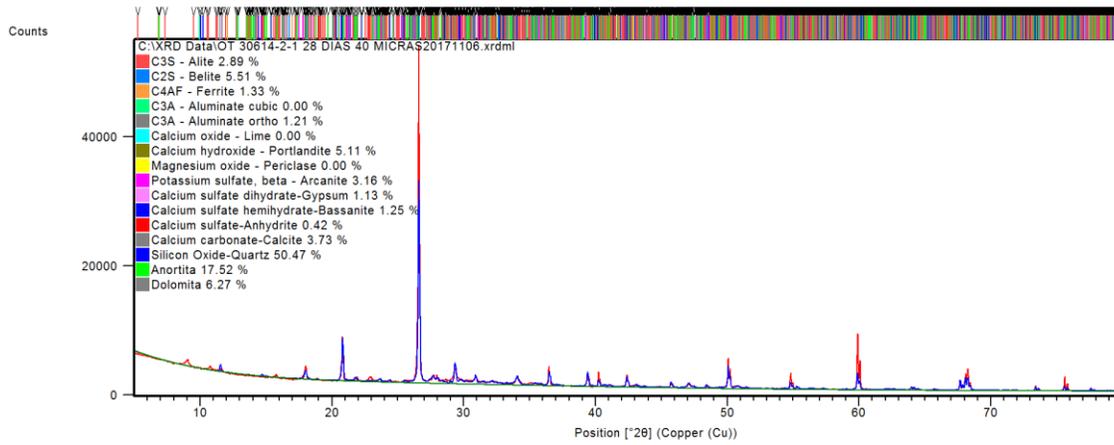
Continuación del apéndice 28.



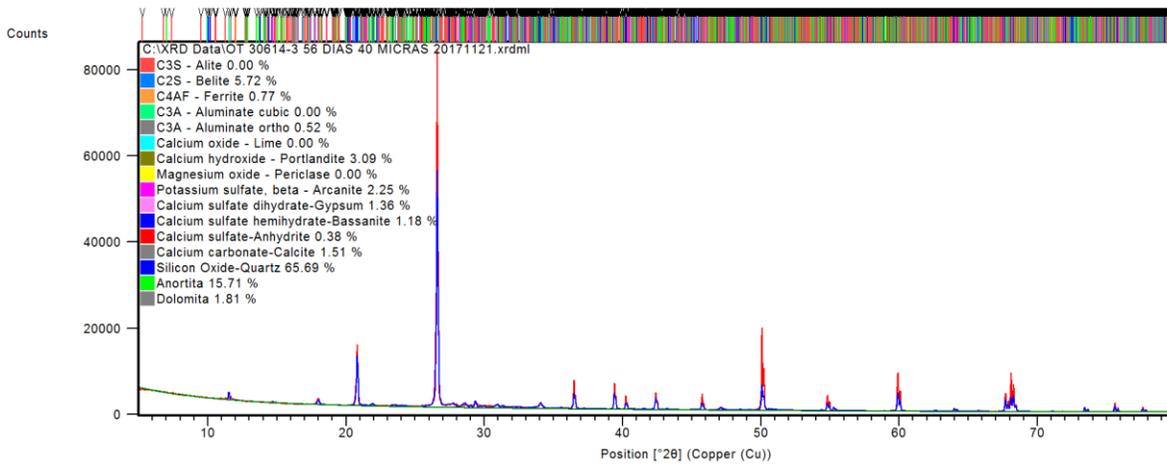
28 días



Continuación del apéndice 28.

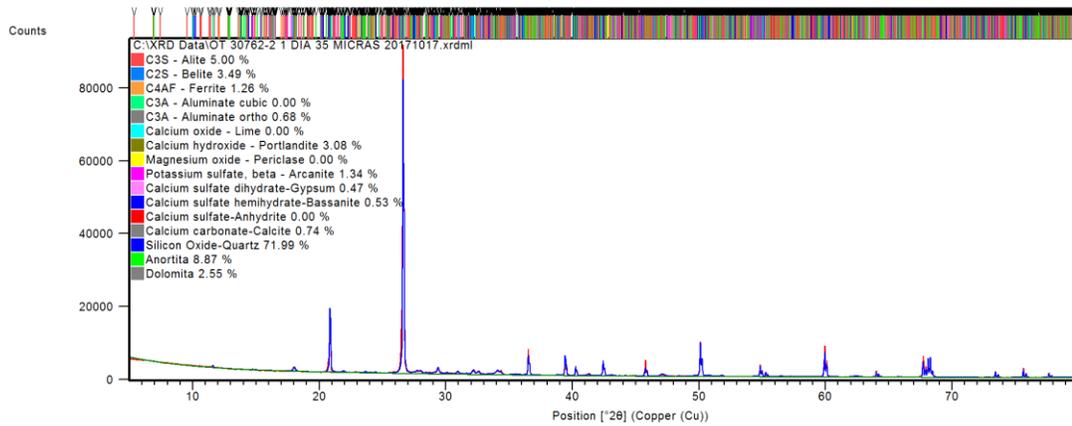
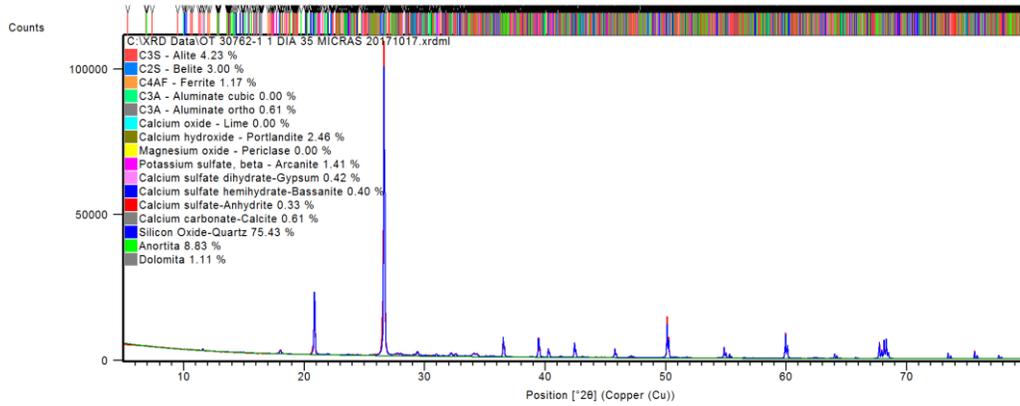
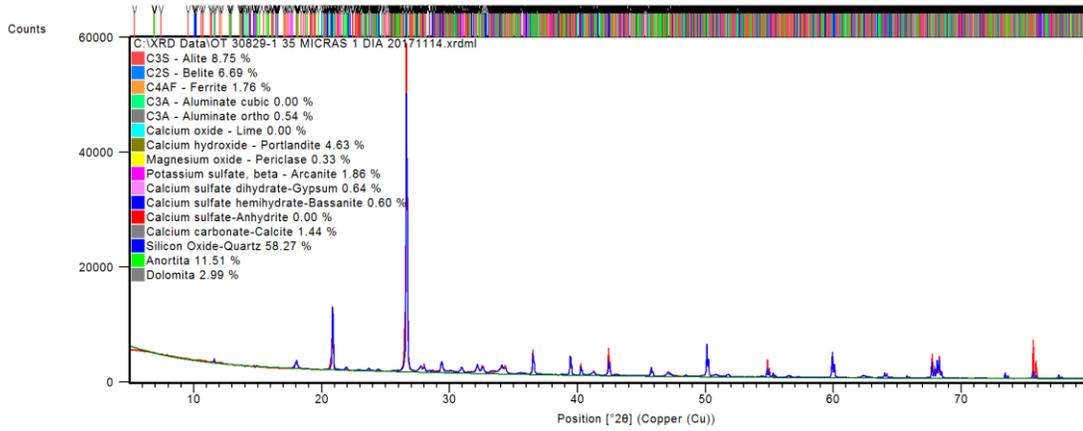


56 días



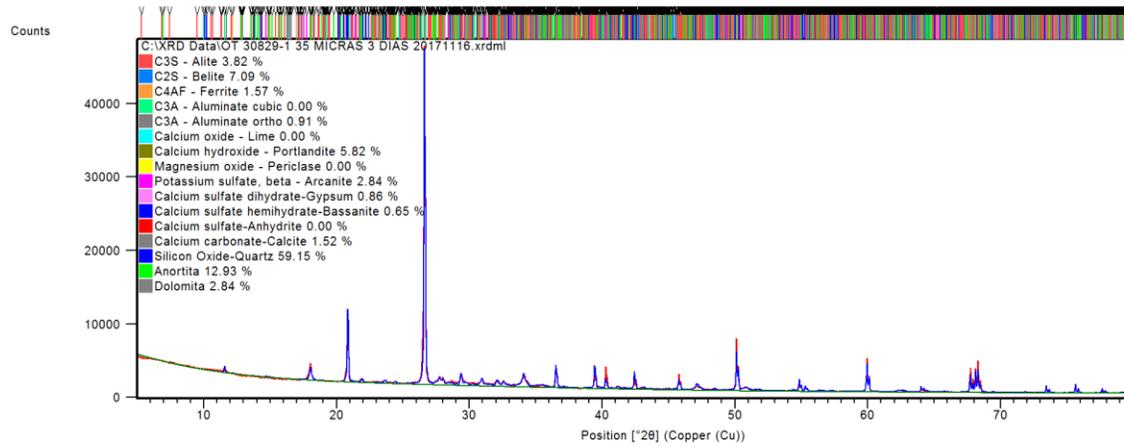
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 29. Cemento, prueba 2

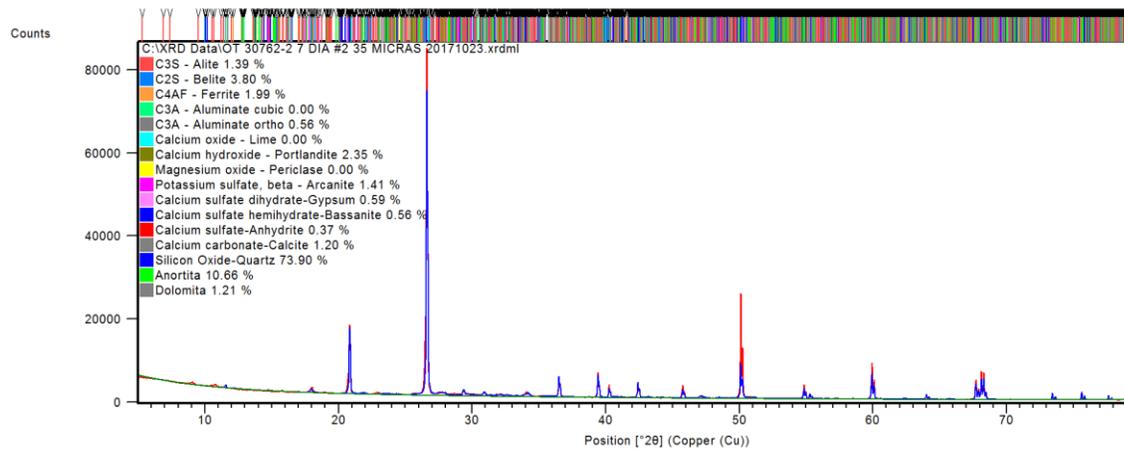


Continuación del apéndice 29.

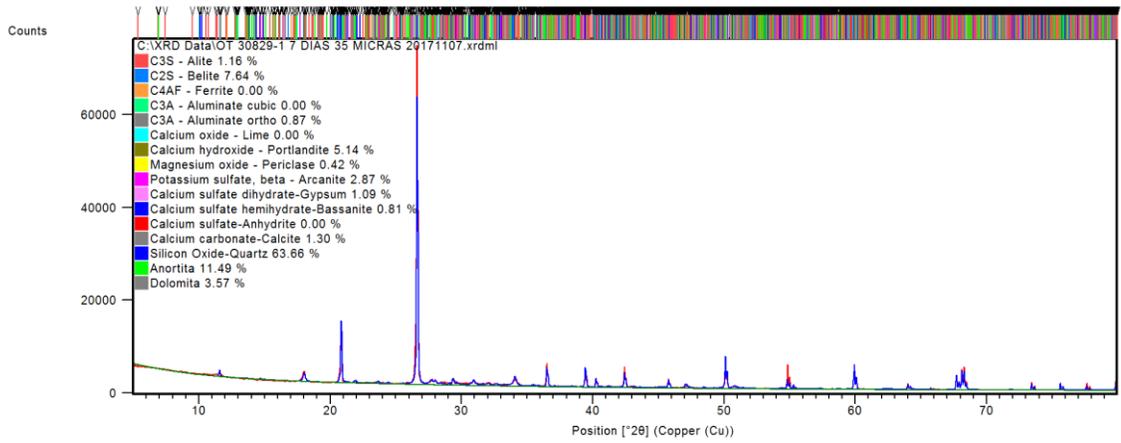
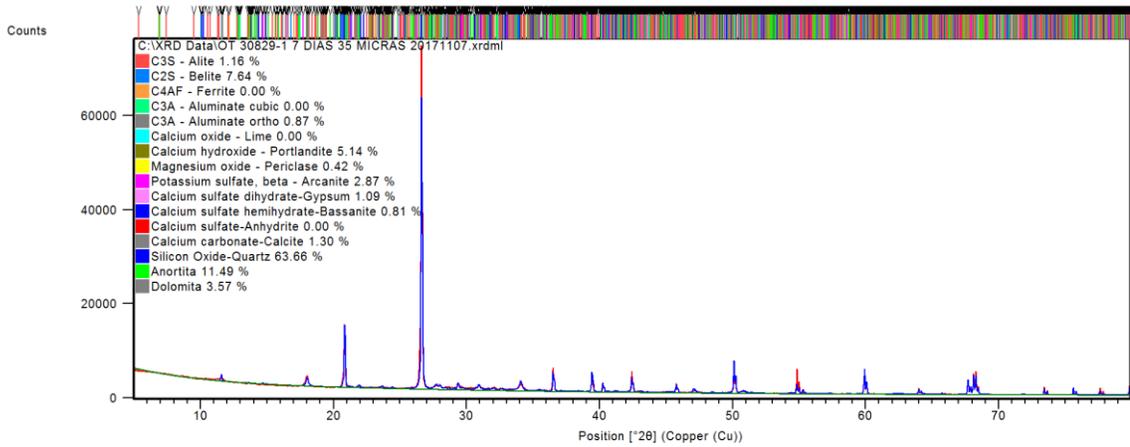
3 días



7 días

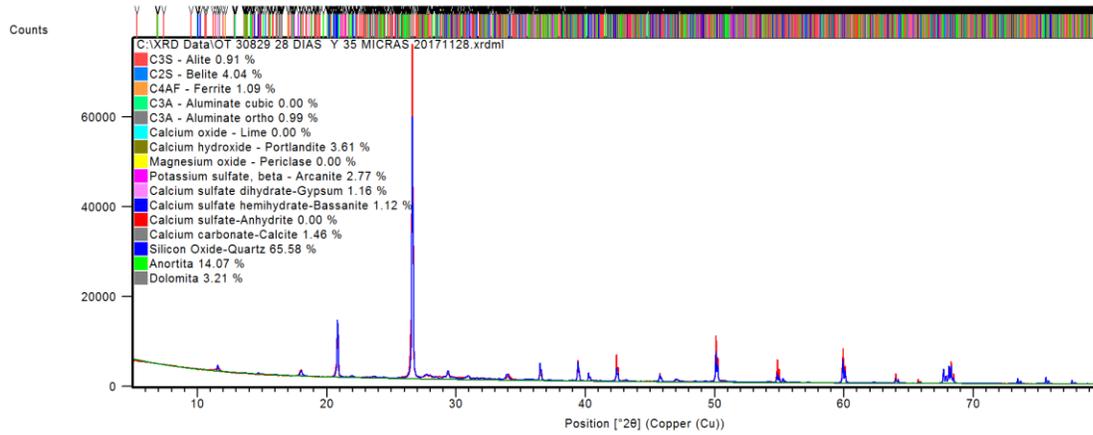


Continuación del apéndice 29.

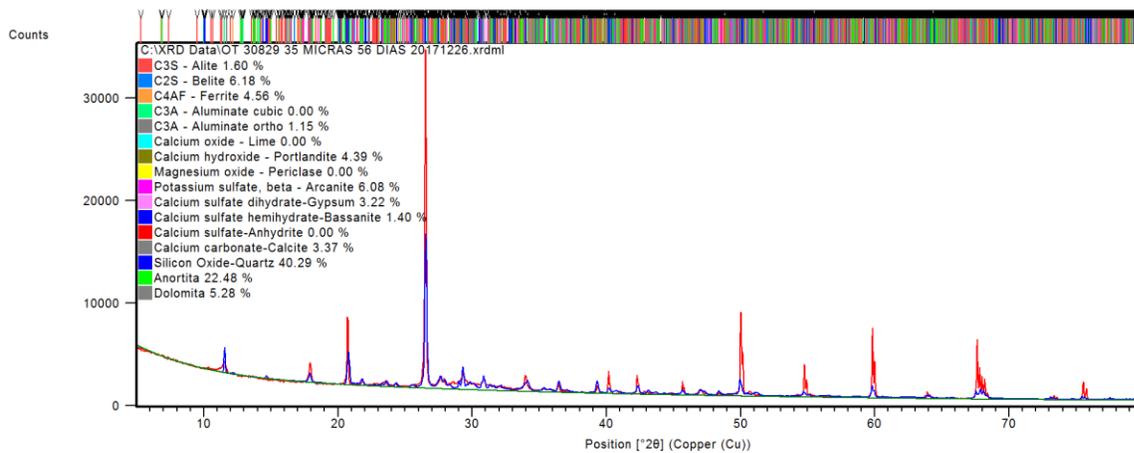


Continuación del apéndice 29.

28 días



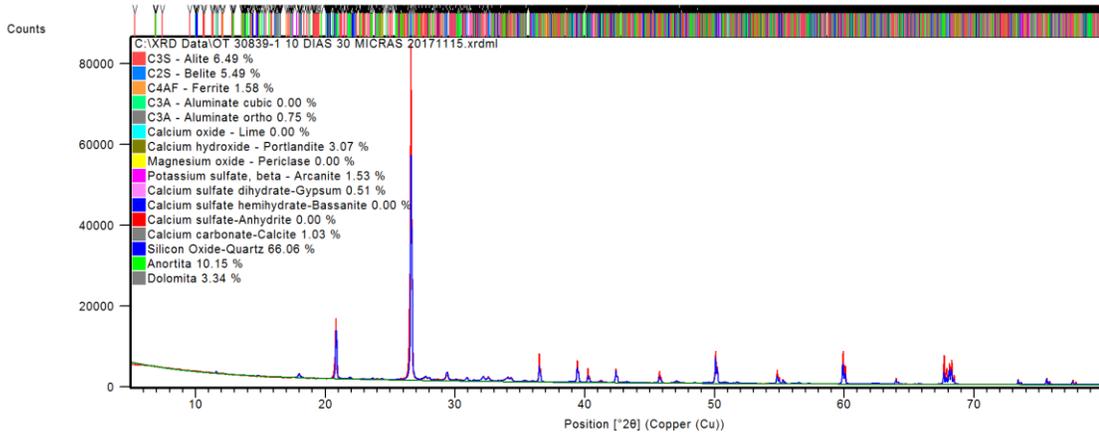
56 días



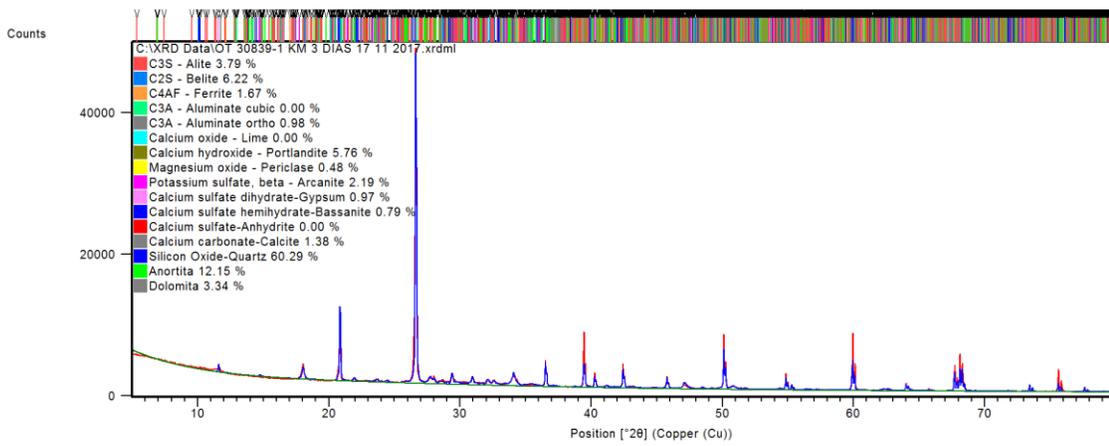
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 30. Cemento, prueba 3

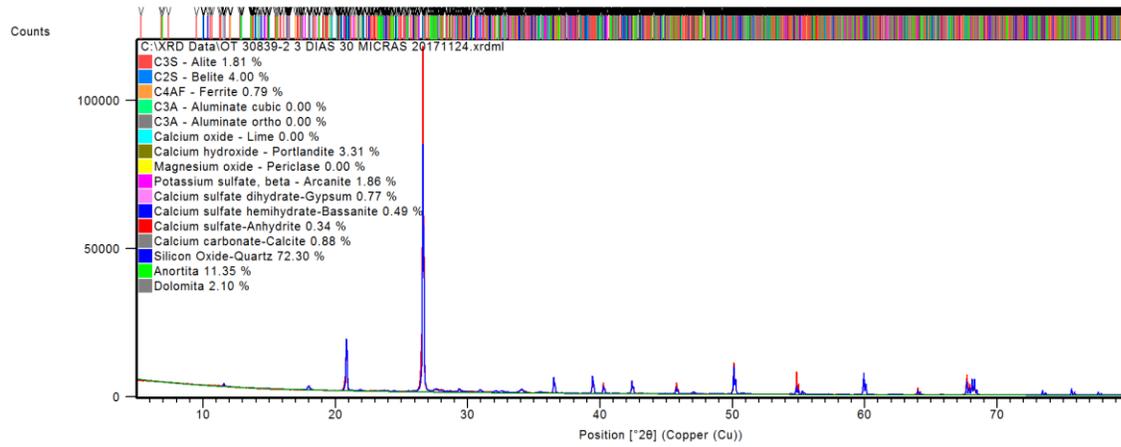
1 día



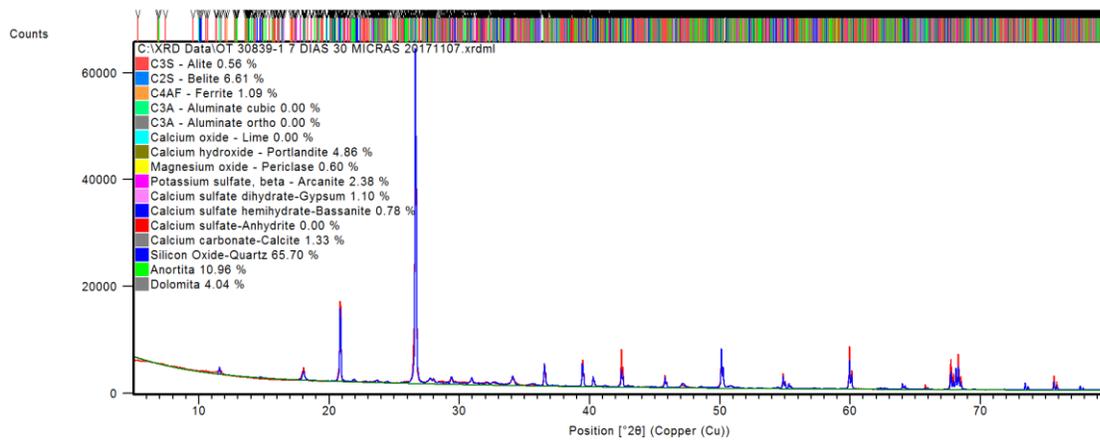
3 días



Continuación del apéndice 30.

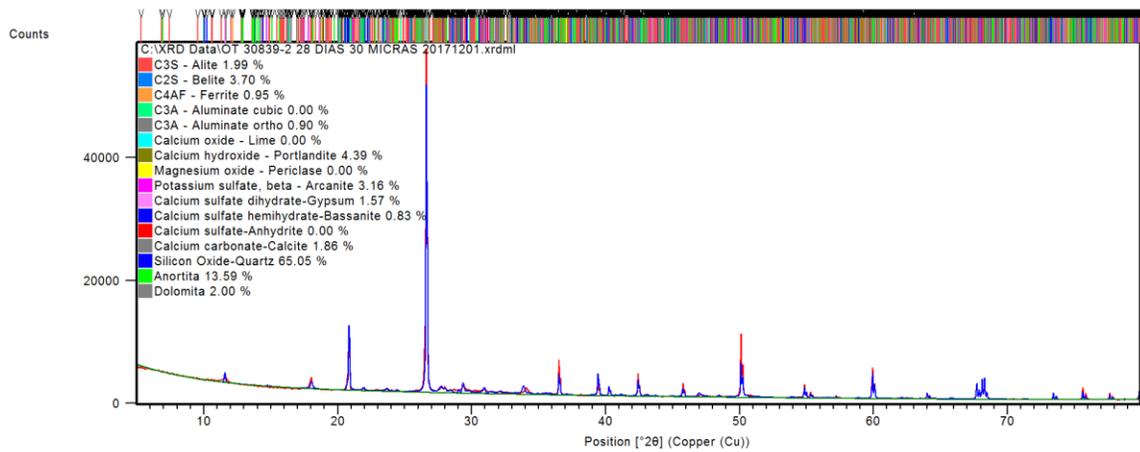
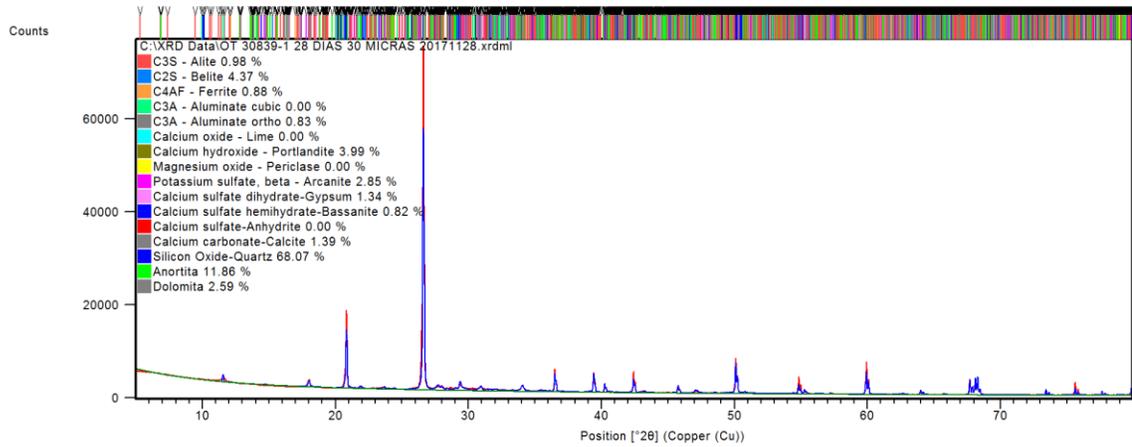


7 días



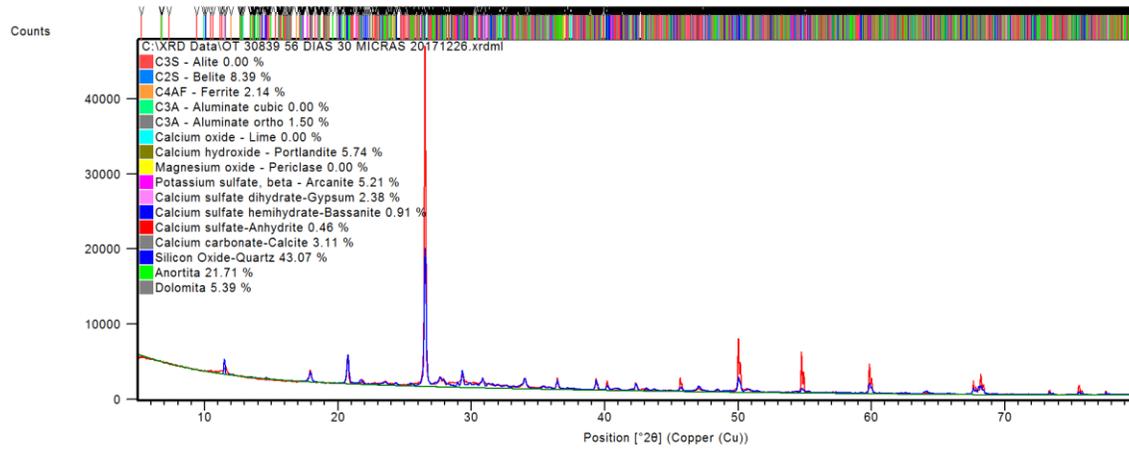
Continuación del apéndice 30.

28 días



Continuación del apéndice 30.

56 días



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 31. Tamizado de materia prima (caliza y puzolana)



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 32. **Pesado de material**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 33. **Análisis del tamaño de la partícula y fineza**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 34. **Molino de bolas**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 35. **Ensayos físicos (*flow*, morteros, resistencia a la compresión)**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 36. **Calor de hidratación**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 37. **Descripción del equipo utilizado**

Equipo	Descripción
Balanza analítica	Marca OHAUS, Modelo EP4102C
Molino	Marca Bico Modelo 395-51
Alpin	Marca: MICRON Modelo: AJ-SEVE
Difractómetro de rayos X	Marca Panalytical Modelo: Empyrean
Fluorescencia de rayos X	
TGA	Marca: Mettler Toledo Modelo: TGA 1 Star System
Calorímetro	Marca: Cal-Metrix Modelo: I-cal 8000
PSD (Cilas Liquid)	Marca MICROMERITICS INSTRUMENT CORPORATION
Prensa hidráulica	Marca: Toni Technik Modelo: 1457
Balanza de humedad	Marca OHAUS
Tamiz No. 325	Marca Humboldt
Tamiz No. 400	Marca Humboldt
Tamiz No. 450	Marca Humboldt
Mezcladora	Marca Hobart

Fuente: elaboración propia.