

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FC**  
Facultad de  
Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil

## **TRABAJO DE DIPLOMA**

Título Evaluación de los cambios de volumen en pastas de cemento  
Portland P 35 con adición mineral activa LC<sup>2</sup>

Autores Lyannis Aparicio Ruiz

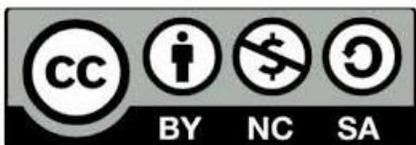
Tutores MSc. Ing. María Betania Díaz García

Santa Clara, junio 2018  
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

**Atribución- No Comercial- Compartir Igual**

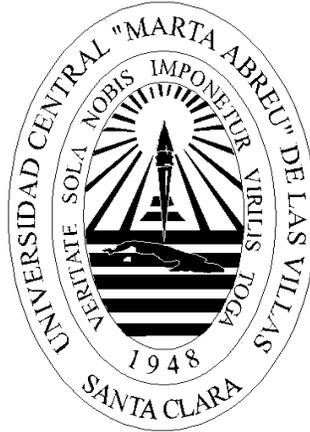


Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

**Universidad Central Marta Abreu de Las Villas**  
**Facultad de Construcciones**  
**Dpto. Ingeniería Civil**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Tema:** Evaluación de los cambios de volumen en pastas de cemento P 35 con adición mineral activa LC<sup>2</sup>

Autor: Lyannis Aparicio Ruiz  
Tutora: MSc. Ing. María Betania Díaz García

**Curso 2017-2018**

*El éxito en la vida podría definirse como el  
crecimiento continuo de la felicidad y la realización  
progresiva de unas metas dignas.*

*Deepak Chopra*

# DEDICATORIA

*A mi familia, porque representa los cimientos de mi carácter y la verdadera responsable de mis logros.*

*En especial, a mi abuela Hildelisa, porque se que, desde el cielo, está muy orgullosa de mi.*

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco, primeramente, a mis padres Yanet y Jorgito, por el esfuerzo y el sacrificio, por la confianza plena y el apoyo constante. Mi mayor satisfacción es saber que hoy se sienten orgullosos.

A mi hermanita Lyangel, por ser la chispita de mis días y mi compañera para toda la vida.

A mis abuelitos Jorge y Milagros, por su ejemplo de lucha, dedicación y sabiduría.

A mi abuelo Felito, por su presencia y ayuda oportunas.

A mi tía Yanka, por estar siempre a mi lado y convertirse de tía a madre y mejor amiga.

A mi tía Yamila, por estar siempre ahí para mi cuando la necesito y ser la tía loca que todo el mundo debería tener.

A mis tíos Osdany y Adolfo, porque el cariño inculcado desde niña significa mucho más que lazos de sangre.

A mi Reidel, por acompañarme siempre, por enseñarme que el verdadero amor es el que da todo sin esperar nada, porque sin su presencia el camino hubiese sido más abrupto.

A mi familia adoptiva, Toyito, Ileana, Victoria, Suyen, Yan Carlo, por regalarme su cariño y haberme acogido como una hija, una hermana.

A mi tutora María Betania, por su apoyo incondicional en momentos que, más allá de tutora, se convirtió en una verdadera amiga.

A Barbie, por enseñarme a razonar en un momento crucial y oportuno que sentó las bases para alcanzar mi meta.

A mis chicas Laura Elena y Adriana, por demostrarme que a pesar de las diferencias los verdaderos amigos siempre te cuidan la espalda, por los numerosos recuerdos que guardaré para siempre.

A mis buenos amigos Murga y Bárbaro, por haber hecho el mejor equipo, por los grandes momentos que hemos vivido juntos.

A mi mejor amigo Migue, por regalarme su sincera amistad casi sin conocerme.

A todos los profesores del Dpto. de Ingeniería Civil, por los conocimientos adquiridos gracias a su labor.

De forma general, agradezco a todas las personas que me ayudaron a alcanzar mi meta, y aquellos que me pusieron obstáculos, gracias también por hacerme más fuerte.

## RESUMEN

En la actualidad, las adiciones minerales son muy utilizadas ya que favorecen no solo la sustitución parcial del cemento Portland, la cual reduce la producción del clínker, sino que brinda ciertas propiedades químicas y físicas que hacen más durable el hormigón. La variación de la relación agua-cemento, el uso de aditivos retardadores del fraguado y la adición de Materiales Cementicios Suplementarios (MCS) son factores que tienen gran influencia en la hidratación del cemento y la formación de las fases de una pasta de cemento hidratada. Es por ello que esta investigación se centra en evaluar el efecto de la adición mineral activa LC<sup>2</sup>, que no es más que una mezcla de arcilla calcinada, piedra caliza y yeso, en el proceso de hidratación del cemento. El trabajo consta de varias etapas: primeramente, se realiza un estudio de toda la bibliografía relacionada con el tema; en una segunda etapa se practican ensayos de calorimetría y contracción en pastas de cemento y para el caso de las muestras de hormigón se realizan los ensayos de asentamiento y resistencia; en una tercera y última etapa se interpretan los resultados y se analizan las propiedades químicas de las pastas y las propiedades físico-mecánicas de los hormigones, ambos elaborados con un 15 y un 30% de adición mineral activa LC<sup>2</sup>. Se logra con este estudio aportar una vía de sustitución del cemento Portland por adiciones, como es el caso del LC<sup>2</sup>, que estén al alcance de la Industria de la Construcción en Cuba.

## **ABSTRACT**

At the present time, the mineral additions are very used since they not favor alone the partial substitution of the cement Portland, which reduces the production of the clinker, but rather it offers certain chemical and physical properties that make more durable the concrete. The variation of the relationship water-cement, the use of additives and the addition of Supplementary Cementitious Material (MCS) is factors that have great influence in the hydrate of the cement and the formation of the phases of a moisturized cement pasta. It is hence that this investigation is centered in evaluating the effect of the mineral addition LC<sup>2</sup> it activates that is not more than a mixture of roasted clay, calcareous stone and plaster, in the process of hydrate of the cement. The work consists of several stages: firstly, it is carried out a study of the whole bibliography related with the topic; in a second stage they are practiced isothermal calorimetry tests and contraction in cement pastes and for the case of the concrete samples they are carried out the consistency tests and compressive strength; in a third and last stage the results are interpreted and the chemical properties of the pastas and the physical-mechanical properties of the concretes are analyzed, both elaborated with a 15 and 30% of mineral addition LC<sup>2</sup>. It is achieved with this study to contribute a way of substitution of the cement Portland for additions, like it is the case of LC<sup>2</sup> that they are within reach of the Industry of the Construction in Cuba.

# ÍNDICE

RESUMEN.....	IV
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales ..</b>	<b>5</b>
1.1 Cemento Portland. Generalidades.....	5
1.1.1 Antecedentes del cemento Portland actual .....	6
1.1.2 Características físicas y mecánicas del cemento .....	6
1.2 Proceso de hidratación del cemento Portland .....	8
1.2.1 Hidratación de silicatos de calcio .....	10
1.2.2 Hidratación de aluminato tricálcico (C <sub>3</sub> A) .....	12
1.2.3 Hidratación del ferrito aluminato tetracálcico (C <sub>4</sub> AF) .....	13
1.2.4 Estructura de la pasta de cemento hidratada. Productos de hidratación del cemento Portland.....	13
1.2.5 Cambios de volumen durante la hidratación de la pasta de cemento Portland. 18	
1.3 Adiciones al cemento Portland .....	19
1.3.1 Materiales Cementicios Suplementarios (MSC) .....	19
1.3.2 Cemento de Bajo Carbono.....	21
1.3.3 Hidratación del cemento Portland con adiciones puzolánicas .....	22
1.3.4 Efecto de la adición de puzolanas al cemento Portland .....	24
1.4 Conclusiones Parciales .....	25
<b>Capítulo II: Uso de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones .....</b>	<b>27</b>
2.1 Materias primas. Caracterización .....	27
2.1.1 Cemento .....	27
2.1.2 Árido grueso (Gravilla), fracción 19.0- 9.50 mm .....	27
2.1.3 Árido grueso (Granito), fracción 9.52- 4.76 mm .....	28
2.1.4 Árido fino (Arena), fracción 4.76 - 0.147mm.....	29
2.1.5 Aditivo SikaPlast .....	30
2.1.6 Adición mineral LC <sup>2</sup> (arcilla + caliza + yeso).....	31
2.2 Diseño experimental.....	32
2.2.1 Declaración de las variables independientes .....	32
2.2.2 Declaración de las variables dependientes .....	33
2.2.3 Parámetros de estado.....	33
2.2.4 Procedimiento experimental.....	34
2.3 Dosificaciones a emplear en la investigación .....	34

2.4 Estudios en pastas de cemento.....	36
2.4.1 Ensayo para la determinación del calor de hidratación .....	36
2.4.2 Ensayo para la determinación de la contracción química.....	38
2.5 Estudios en hormigones .....	42
2.5.1 Ensayos para evaluar la consistencia .....	43
2.5.1 Preparación y llenado de moldes para ensayo de resistencia .....	44
2.5.2 Desencofrado y curado de las probetas.....	45
2.5.2 Ensayos para evaluar la resistencia a la compresión.....	45
2.7 Conclusiones Parciales .....	47
<b>Capítulo III: Influencia de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones.....</b>	<b>48</b>
3.1 Introducción.....	48
3.2 Influencia de la adición mineral activa LC <sup>2</sup> en la hidratación de pastas de cemento	48
3.2.1 Efecto del aditivo SikaPlast en la hidratación del cemento Portland.....	48
3.2.2 Efecto de la adición mineral activa LC <sup>2</sup> en la hidratación del cemento Portland	50
3.3 Influencia de la adición mineral activa LC <sup>2</sup> en la contracción química de pastas de cemento .....	54
3.3.1 Efecto del aditivo SikaPlast en la contracción química de pastas de cemento Portland .....	55
3.3.2 Efecto de la adición mineral activa LC <sup>2</sup> al 30% y de la relación agua-cemento en la contracción química de pastas de cemento .....	56
3.3.3 Relación entre calor liberado y cambios de volumen en pasta de cemento con adición mineral activa LC <sup>2</sup> .....	57
3.3.4 Efecto de la adición mineral activa LC <sup>2</sup> al 15% en la contracción química de las pastas de cemento .....	61
3.4 Influencia de la adición mineral activa LC <sup>2</sup> en hormigones fluidos .....	62
3.4.1 Efecto de la adición mineral activa LC <sup>2</sup> en el asentamiento .....	63
3.4.2 Efecto de la adición mineral activa LC <sup>2</sup> en la resistencia a compresión.....	64
3.5 Conclusiones Parciales .....	64
CONCLUSIONES GENERALES .....	66
RECOMENDACIONES .....	67
BIBLIOGRAFÍA.....	68
ANEXOS.....	70

## INTRODUCCIÓN

La adaptación de un hormigón a las exigencias tecnológicas particulares de cada aplicación tiene un límite. Cuando ya no se puede jugar con la elección de los áridos, del cemento y de la proporción de mezcla, se recurre a productos que aportan la mejora de las características o propiedades deseadas para cada aplicación particular o la adaptación. Estos productos son las adiciones minerales y los aditivos (Tovar, 2017)

Según la (NC:526, 2012) Términos y definiciones, una adición es un material que, en una cantidad limitada, es molido simultáneamente o mezclado con el cemento hidráulico durante su fabricación.

La sustitución de una parte del clínker por otros constituyentes minerales ha sido investigada desde hace mucho tiempo por razones económicas y ecológicas. La cantidad de clínker que puede ser sustituido por materiales cementicios suplementarios (MCS) depende del tipo de MCS empleado. Los MCS tradicionalmente utilizados son desechos de procesos industriales, como las cenizas volantes, la microsílice y las escorias de alto horno, además de puzolanas naturales como tobas zeolitizadas y cenizas volcánicas (Vizcaíno, 2015, Tovar, 2017)

Actualmente, en Cuba, se trabaja en la elaboración de hormigones, donde se utilizan cementos con adiciones minerales activas, con el objetivo fundamental de mejorar las propiedades del mismo y disminuir la aparición de fisuras debido a cambios de volumen. Estos cambios propios del volumen de los elementos de hormigón, conocido como retracción, provocan la aparición de fisuras, las cuales no solo afectan la estética de las edificaciones, sino que representan el mal funcionamiento de las mismas (Martínez, 2015). Dichas fisuras se pueden explicar como resultado de un proceso físico-químico que sufre la pasta de cemento, después de ser amasado con los áridos, y que consiste principalmente en una variación de volumen, que puede depender de muchos factores, entre ellos el tipo de cemento, los áridos, la relación agua-cemento, y fundamentalmente de las condiciones de humedad y temperatura durante el curado (Munizaga, 2009)

En este contexto es de capital importancia la identificación y desarrollo de nuevas fuentes de materiales puzolánicos que permitan la producción de aglomerantes con altos volúmenes de sustitución de clínker a un costo asequible desde el punto de vista económico, energético y medioambiental. (Almenares, 2017)

Por lo antes expuesto el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales CIDEM, propone un estudio sobre la evaluación de la retracción en pastas y hormigones de cemento Portland P 35 con adiciones minerales activas (LC<sup>2</sup>) al 30%, que no es más que un producto de arcilla calcinada, caliza y yeso en proporciones adecuadas que sustituyen el cemento en la elaboración de hormigones. Todo ello se realiza para conocer la influencia del proceso de hidratación en los cambios de volumen del LC<sup>2</sup> como adición mineral activa; lo que nos lleva a plantear el siguiente **problema científico**: ¿En qué medida influye la adición mineral activa LC<sup>2</sup> al 15 y 30% en los cambios de volumen producidos en pastas de cemento Portland?

**Objeto de investigación:** Cambios de volumen

**Campo de aplicación:** Pastas y hormigones elaborados con cemento P 35 y LC<sup>2</sup>

**Objetivo General:** Evaluar el efecto de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> al 15 y 30% en los cambios de volumen que se producen en las etapas de hidratación del cemento.

**Objetivos específicos**

1. Analizar la influencia de las adiciones puzolánicas en los cambios de volumen que se producen en pastas de cemento Portland P 35.
2. Determinar el comportamiento de la adición LC<sup>2</sup> al 15 y 30% en la cinética de hidratación en pastas de cemento.
3. Evaluar los cambios de volumen que se producen en la hidratación en pastas de cemento con adición mineral activa LC<sup>2</sup> al 15 y 30%.

**Hipótesis**

Si se emplea la adición mineral activa LC<sup>2</sup> al 15 y 30% de sustitución, se logra mantener las propiedades químicas en pastas de cemento, sin que afecte el proceso de hidratación de estas y las propiedades físico-mecánicas en los hormigones.

Para dar cumplimiento a los objetivos específicos se plantean las siguientes **tareas de investigación**

Etapa I

- Elaboración del Diseño teórico metodológico.
- Revisión bibliográfica de literatura actualizada sobre hidratación de cementos con adiciones y su influencia en la retracción.

Etapa II:

- Definición del diseño de experimento.
- Selección y obtención de los materiales para ensayos a los hormigones.
- Definición de las dosificaciones a utilizar en la investigación.
- Realización de los ensayos de las pastas de cemento. Contracción y calorimetría.
- Realización de los ensayos de los hormigones en estado fresco. Cono de Abrams.
- Fabricación de especímenes a escala de laboratorio.
- Realización de los ensayos de los hormigones en estado endurecido. Resistencia (7 y 28 días)

Etapa III:

- Procesamiento de los resultados experimentales
- Análisis del efecto de  $LC^2$  en las propiedades físico-mecánicas de los hormigones.
- Análisis estadístico de los resultados alcanzados en la investigación.
- Entrega y discusión del trabajo de diploma

### **Novedad científica**

Se demuestra que el uso del  $LC^2$  como adición mineral activa al cemento P 35 posee un efecto positivo sobre la hidratación del cemento, sin alterar las propiedades físico-químicas, lo que favorece la producción de hormigones más durables.

### **Aportes de la investigación**

- Aporte Práctico: Se ofrece una investigación que aplicada a la práctica permite disminuir los problemas de fisuración, causados por cambios de

volumen y favorece a su vez inclusión de una adición al proceso de elaboración de hormigones más durables.

- Aporte Económico: Con la realización de esta investigación se pone a disposición un estudio para disminuir el consumo de cemento Portland, se logra alcanzar hormigones de mayor durabilidad y reducir los gastos en reparaciones de elementos estructurales.

### **Estructura de la investigación**

- Resumen
- Introducción:  
Se definen todos los elementos teóricos metodológicos de la presente investigación.
- Capítulo I: Proceso de hidratación del Cemento Portland con adiciones minerales.  
Se explica el proceso de hidratación del cemento Portland y la influencia de las adiciones minerales activas en el mismo. Se exponen las propiedades de los cementos con adiciones puzolánicas.
- Capítulo II: Uso de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones.  
Se definen las características de los materiales y la dosificación de los mismos. Se detalla el procedimiento para los ensayos y se exponen los primeros resultados.
- Capítulo III: Influencia de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones.  
Se comparan los resultados obtenidos entre las muestras estudiadas y se expone el efecto del empleo de las adiciones minerales activas en pastas y hormigones.
- Conclusiones.
- Recomendaciones.
- Referencias bibliográficas.

## Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales

### 1.1 Cemento Portland. Generalidades

Con varios billones de toneladas producidas al año, el cemento es uno de los materiales más usados, pero también el más complejo por su variedad en la composición. El cemento se fabrica por el calentamiento de una mezcla de caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) y arcilla a temperaturas alrededor de los 1450 °C provocando una fusión parcial. El producto se llama clínker, el cual se muele y se mezcla con un porcentaje pequeño de yeso. (Mejía, 2016)

De forma general, el cemento constituye material mineral finamente molido, que después de ser mezclado con agua forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, después de endurecer, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua. (NC:120, 2014)

Según la (NC:526, 2012): Cemento hidráulico: Términos y definiciones, existen varios tipos de cemento, en dependencia de su utilización y componentes:

- Cemento hidráulico
- Cemento hidráulico mezclado
- Cemento hidráulico introductor de aire
- Cemento hidráulico expansivo
- Cemento Portland
- Cemento Portland Puzolánico
- Cemento Portland de escorias
- Cemento Portland de escorias de altos hornos
- Cemento Portland blanco
- Cemento Portland de bajo calor de hidratación
- Cemento natural
- Cemento hidrófobo
- Cemento de albañilería
- Cemento resistente a los sulfatos

## Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales

- Cementos de alta resistencia inicial

### **1.1.1 Antecedentes del cemento Portland actual**

Hasta el siglo XVIII los únicos conglomerantes que se utilizaron fueron los yesos y las cales hidráulicas, es durante los siglos XIX y XX cuando empieza a ser importante el interés por el cemento. Vicat fue un estudioso de la hidraulicidad de las cales que contenían arcillas y fruto de sus estudios son los primeros cementos naturales, precursores de los actuales Portland. En 1824, Joseph Aspdin, constructor de Leeds, en Inglaterra, daba el nombre y patentaba un material pulvurento que, amasado con agua y con arena, se endurecía formando un conglomerado de aspecto parecido a las calizas de las islas Portland. Más tarde, Isaac Johnson molió finamente los nódulos sobrecocidos que quedaban a la salida del horno de Aspdin, con ello mejoró las dosificaciones y aumentó las temperaturas de cocción hasta lograr la sinterización de la mezcla. (Villarino, 2015). En 1838 este cemento se utilizó por primera vez en una construcción de importancia, en uno de los túneles construidos bajo el río Támesis en Londres. Un técnico norteamericano llamado David Saylor, fue el primero en fabricar cemento en América, dando lugar en 1850 al nacimiento de la industria cementera en Norteamérica. El uso del cemento Portland continuó extendiéndose hasta convertirse en el material de construcción más utilizado en el mundo. (Artega, 2009)

### **1.1.2 Características físicas y mecánicas del cemento**

Las características físicas y mecánicas más importantes: fraguado y endurecimiento, expansión, finura de molido y resistencia a compresión.

#### **Fraguado**

La velocidad de fraguado de un cemento viene limitada por las normas que establecen un período de tiempo, a partir del amasado, dentro del cual deben producirse el principio y el fin del fraguado. Ambos conceptos se definen de un modo convencional, mediante la aguja de Vicat, ya que el fraguado es un proceso continuo que se inicia al amasar el cemento y se prolonga por el endurecimiento. (Villarino, 2015)

## Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales

### **Endurecimiento**

Ganancia progresiva de resistencias de una pasta fraguada. En la velocidad de endurecimiento, así como la de fraguado entran en juego: la finura de molido, la temperatura del agua del amasado y la presencia de materias orgánicas, inorgánicas y aditivos. (Villarino, 2015)

### **Expansión**

Los ensayos de estabilidad de volumen tienen por objeto manifestar, a corto plazo, el riesgo de expansión tardía que puede tener un cemento fraguado debida a la hidratación del óxido de calcio y/o del óxido de magnesio libres. (Villarino, 2015)

### **Finura de molido**

Es una característica íntimamente ligada al valor hidráulico del cemento, ya que influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante su fraguado y primer endurecimiento. Al entrar en contacto con el agua, los granos de cemento se hidratan sólo en una profundidad de 0,01 mm, por lo que, si dichos granos fuesen muy gruesos, su rendimiento sería muy pequeño al quedar en su interior un núcleo prácticamente inerte. Si el cemento posee una finura excesiva, su retracción y calor de fraguado son muy altos (lo que, en general, resulta perjudicial), el conglomerante resulta ser más susceptible a la meteorización (envejecimiento) tras un almacenamiento prolongado, y disminuye su resistencia a las aguas agresivas. Pero siendo así que las resistencias mecánicas aumentan con la finura, se llega a una situación de compromiso: el cemento portland debe estar finamente molido, pero no en exceso. (Villarino, 2015)

### **Resistencia**

La aplicación fundamental del cemento es la fabricación de morteros y hormigones destinados a la construcción de elementos en los que, generalmente, la propiedad más interesante es su resistencia mecánica; por consiguiente, los cementos, junto con los áridos tienen que conferírseles y esto lo logran porque al amasarlos con agua dan lugar a pastas que endurecen y tiene una gran cohesión y, cuya porosidad va disminuyendo a la vez que las resistencias mecánicas van creciendo con el paso del tiempo. La resistencia mecánica de un hormigón será tanto mayor cuanto mayor sea la del cemento empleado. Pero esta característica no es la única que debe

## Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales

buscarse, ya que por sí sola no garantiza otras igualmente necesarias, o incluso más, como por ejemplo la durabilidad. (Villarino, 2015)

### 1.2 Proceso de hidratación del cemento Portland

El endurecimiento y fraguado del hormigón son el resultado de procesos químicos y físicos entre el cemento Portland y el agua, que se denominan hidratación. (Blanco, 2015)

La hidratación del cemento es el proceso mediante el cual este material, al mezclarse con el agua, reacciona y empieza a generar enlaces o estructuras cristalinas, que lo convierten en un material aglutinante. Los componentes principales del clínker son: el silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S), silicato dicálcico (C<sub>2</sub>S), aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A), ferro aluminato tetracálcico (C<sub>4</sub>AF), óxido de magnesio (MgO), Cal libre (CAO) y sulfatos de álcalis. (Silva, 2017)

	Componente	Fórmula química
MATERIAS PRIMAS	Óxido de aluminio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Óxido de silicio	SiO <sub>2</sub>
	Cal libre	CaO
	Óxido de hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Óxido de azufre	SO <sub>3</sub>
	Óxido de potasio	K <sub>2</sub> O
	Óxido de sodio	Na <sub>2</sub> O
	COMPONENTES PRINCIPALES	Silicato tricálcico
Silicato bicálcico		2 CaO · SiO <sub>2</sub>
Aluminato tricálcico		3 CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ferrito aluminato tetracálcico		4 CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ferrito bicálcico		2 CaO · Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Óxido de calcio (cal libre)		CaO
Óxido de magnesio (magnesia libre)		MgO
Álcalis:		
- Óxido de sodio		Na <sub>2</sub> O
- Óxido de potasio		K <sub>2</sub> O
Sulfato de calcio		
- Dihidrato o yeso		CaSO <sub>4</sub> · 2 H <sub>2</sub> O
- Hemihidrato	CaSO <sub>4</sub> · 0,5 H <sub>2</sub> O	
- Anhidro	CaSO <sub>4</sub>	

**Figura 1** Componentes principales del cemento Portland. Fuente: (Monteagudo, 2014)

La alita (forma impura del C<sub>3</sub>S) se presenta como cristales incoloros y opacos de sección prismática con contornos rectangulares o hexagonales de unos 50 μm

## Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales

aproximadamente. Es una fase hidráulicamente activa con una elevada velocidad de hidratación que determina la alta resistencia inicial que presenta el hormigón. La reacción del  $C_3S$  es exotérmica y la cantidad de calor liberado total está en el orden de 500 J/g. (Carrasco, 2014)

La fase belita (forma impura de  $C_2S$ ) presenta cristales con mayor brillo que los del  $C_3S$  los que poseen un tamaño en el orden de 30  $\mu m$ . Son de forma redondeada y estriada, presentándose frecuentemente agrupados en zonas, en pares o dispersos. Presenta una velocidad de reacción más lenta liberando menor calor total (250 J/g) que el correspondiente al  $C_3S$ , por lo que confiere al cemento una alta resistencia a largo plazo. (Carrasco, 2014)

El  $C_3A$  reacciona inmediatamente con el agua y produce el fraguado (pasaje de estado fluido a sólido de la pasta) instantáneo de la pasta con una elevada liberación de calor (850 J/g). El color del cemento se debe a esta fase, puesto que es gris oscuro con forma rectangular, prismática y amorfa. El  $C_3A$  produce una pequeña contribución en la resistencia hasta los 28 días, posteriormente, su aporte se halla incierto. (Carrasco, 2014)

La fase  $C_4AF$  reacciona rápidamente con el agua y produce el fraguado en pocos minutos. El calor liberado durante la hidratación es del orden de 420 J/g. Está compuesto por cristales prismáticos bien formados, con tonos pardos y de gran poder reflector, siendo capaz de reflejar los cristales de la fase de  $C_3A$ . (Carrasco, 2014)

En el momento de la hidratación los componentes del clínker reaccionan con el agua formando una pasta de cemento y sus fases precipitan como partículas de escala nanométrica con un sistema poroso asociado. En el primer paso del proceso de hidratación, el cemento se disuelve liberando iones al agua (el agua es llamada ahora solución porosa). Luego, la concentración de iones en la solución porosa se satura, por lo que los iones se combinan para formar fases sólidas que finalmente se precipitan. (Mejía, 2016)

Las reacciones químicas que describen la hidratación del cemento son muy complejas. Para poder entender los procesos químicos que determinan el fraguado

## Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales

del cemento, es necesario estudiar la hidratación de cada uno de los minerales de clínker por separado. (Blanco, 2015)

### **1.2.1 Hidratación de silicatos de calcio**

Los dos compuestos de silicato cálcico tienen casi el mismo proceso de hidratación. Sólo se distinguen por la cantidad de  $\text{Ca(OH)}_2 = \text{CH}$  que se forma y por la cantidad de calor de hidratación liberado durante las reacciones. (Blanco, 2015)



(silicato tricálcico) + (agua)  $\rightarrow$  (C-S-H) + (hidróxido de calcio)



(silicato dicálcico) + (agua)  $\rightarrow$  (C-S-H) + (hidróxido de calcio)

El producto principal de la hidratación es el silicato de calcio hidratado ( $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_4$ ). El hidrato resultante es pobremente cristalino y produce un sólido poroso que puede ser definido como un gel rígido. El otro compuesto resultante de la hidratación de los silicatos es el hidróxido de calcio (CH), el cual, en contraste con C-H-S es un material bien cristalizado y con una estequiometría definida ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). (Carrasco, 2014)

La hidratación de  $\text{C}_3\text{S}$  comprende cinco etapas:

#### **Etapas 1: Período inicial o preinducción**

Cuando se mezcla  $\text{C}_3\text{S}$  con el agua de amasado comienza un período donde hay una rápida evolución de calor (la reacción es rápida por la gran superficie de contacto con agua), que cesa después de, aproximadamente 15 min.

Al cabo de unos pocos segundos, la solución se sobresatura con respecto al silicato de calcio hidratado, que precipita rápidamente, en la terminología cementera el hidrato obtenido se representa por C-S-H. (Blanco, 2015, Morales, 2010)

#### **Etapas 2: Período de inducción o durmiente**

Aparentemente, el período de inducción está causado por la necesidad de obtener una cierta concentración de iones en la solución antes de que se formen núcleos de cristales que facilitan el crecimiento del producto de hidratación. En el período de inducción el consumo de agua y la cantidad de hidratos formados son muy pequeños, lo que explica porque el hormigón de cemento Portland queda manejable

## Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales

y trabajable, es decir, en un estado plástico durante un determinado tiempo. (Blanco, 2015, Morales, 2010)

La teoría de la barrera física a la difusión, se basa en la formación de una capa de C-S-H alrededor de la partícula de  $C_3S$ , por donde el  $Ca(OH)_2$  tiene que salir. Dicha capa retarda la velocidad de reacción porque el agua tiene que pasar a través de la capa de C-S-H, en contracorriente con el  $Ca(OH)_2$ . Como hay concentraciones elevadas de  $Ca(OH)_2$ , solubilizadas en el agua, el potencial químico se disminuye continuamente hasta que la solución está sobresaturada con respecto a la Portlandita,  $Ca(OH)_2$ . La velocidad de la hidratación de  $C_3S$  no puede volver a crecer antes de que  $Ca(OH)_2$  empiece a cristalizar, este proceso se representa por el siguiente equilibrio. (Blanco, 2015, Morales, 2010)

### **Etapa 3: Etapa de hidratación media**

Después de 1-3 horas, es decir, al final del período de inducción, empieza la solidificación o fraguado inicial. El  $C_3S$  empieza a hidratarse rápidamente otra vez, ya que el  $Ca(OH)_2$  empieza a cristalizar y así se mueve el equilibrio de la reacción hacia la derecha. La velocidad de hidratación alcanza un máximo al final del período de aceleración. Este máximo corresponde con el máximo de la evolución de calor (2-8 horas) el fraguado final ha ocurrido y comienza el endurecimiento inicial. (Blanco, 2015, Morales, 2010)

### **Etapa 4: Período de deceleración**

Por la hidratación del  $C_3S$ , el espesor de la capa C-S-H crece. Por consiguiente, llega un momento en que la velocidad de reacción es igual a la velocidad de difusión. A partir de este momento, mientras el espesor de la capa sigue creciendo y el movimiento a través de la capa C-S-H determina la velocidad de la reacción y la hidratación queda controlada por la velocidad de difusión dentro de la capa. Luego la velocidad de reacción empieza a disminuir hasta que llegue un estado estable (etapa 5) después de 12 a 24 horas. (Blanco, 2015, Morales, 2010)

### **Etapa 5: Período de difusión estacionario**

Durante esta etapa, la difusión es tan lenta que la velocidad de hidratación está controlada únicamente por la velocidad de difusión. Como el espesor de la capa sigue creciendo, la velocidad de difusión sigue disminuyendo hasta que no haya

## Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales

más  $C_3S$  a hidratar. La hidratación, como otras reacciones químicas, es sensible con respecto a la temperatura. La velocidad de reacción aumenta con la temperatura. Pero la dependencia entre la velocidad y la temperatura está relacionada con el grado de reacción. La etapa en la que la temperatura tiene más importancia es en el período de aceleración (etapa 3) donde la velocidad de reacción es controlada químicamente. (Blanco, 2015, Morales, 2010)

### **1.2.2 Hidratación de aluminato tricálcico ( $C_3A$ )**

El  $C_3A$  presente en el clínquer reacciona inmediatamente con el agua y provoca el fraguado instantáneo, permite la formación de aluminatos hidratados en fase metaestable como el  $C_4AH_{19}$  y  $C_2AH_8$  cuyos cristales tienen forma de platos hexagonales y con el transcurso del tiempo se transforman a una fase menos soluble y más estable de composición  $C_3AH_6$ . Dicha reacción puede representarse mediante la siguiente ecuación:



(Aluminato tricálcico + Agua  $\rightarrow$  Aluminato tricálcico hidratado)

Para retardar la reacción de los aluminatos se adiciona yeso ( $3CSH_2$ ). Durante la reacción entre  $C_3A$  y los iones sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) provenientes de la disolución del yeso, se produce inicialmente un sulfoaluminato de calcio pobre en iones sulfato. Con el incremento del tiempo de reacción y la presencia de iones  $SO_4^{2-}$ , el sulfoaluminato se enriquece en  $SO_4^{2-}$  y precipita la ettringita ( $C_3A \cdot 3CS \cdot 32H$ ). (Carrasco, 2014) Esta reacción se muestra en la siguiente ecuación:



(Aluminato tricálcico + Sulfato de calcio + Agua  $\rightarrow$  Ettringita)

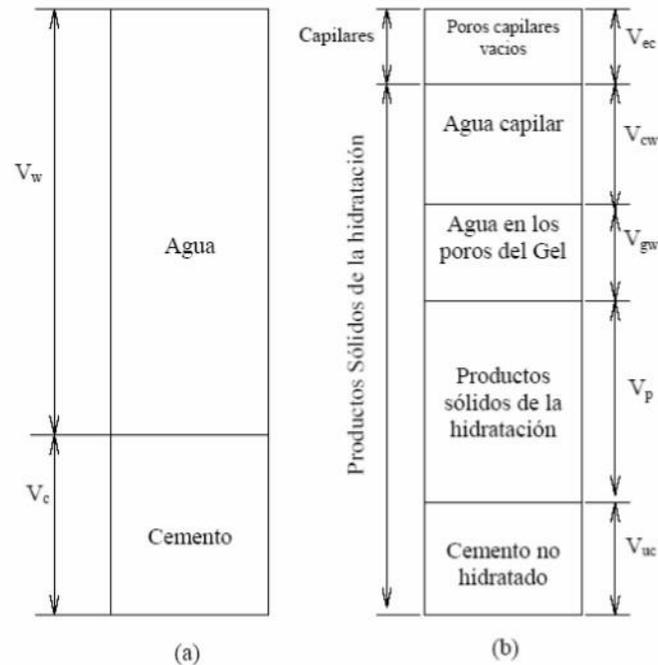
Esta ettringita, recristaliza más tarde en forma de agujas lo cual influye en la cohesión del material. Al consumirse el yeso, antes de la hidratación total del  $C_3A$ , la ettringita pierde  $SO_4^{2-}$  y se transforma en monosulfoaluminato de calcio hidratado ( $C_3A \cdot CS \cdot 12H$ ) que se presenta como placas hexagonales o pseudo hexagonales. Si el contenido de  $C_3A$  y la cantidad de iones  $SO_4^{2-}$  en la solución es suficiente para la formación de la misma, cristaliza finamente posibilitando una buena plasticidad de la mezcla. (Alujas, 2010)

### **1.2.3 Hidratación del ferrito aluminato tetracálcico (C<sub>4</sub>AF)**

El C<sub>4</sub>AF aparentemente tiene la misma secuencia de hidratación que la correspondiente al C<sub>3</sub>A, aunque las reacciones de este compuesto son más lentas y liberan menor cantidad de calor. El C<sub>4</sub>AF no causa el fraguado instantáneo de la pasta debido a que no se hidrata lo suficientemente rápido y la presencia de yeso retarda su hidratación más drásticamente que la del C<sub>3</sub>A. (Carrasco, 2014)

### **1.2.4 Estructura de la pasta de cemento hidratada. Productos de hidratación del cemento Portland**

El volumen total de la mezcla cemento-agua permanece sin cambios durante el proceso de hidratación, por consiguiente, la densidad media de los productos de hidratación es considerablemente más baja que la densidad del cemento Portland anhidro. Se estima que 1 cm<sup>3</sup> de cemento, en completa hidratación, necesita un volumen de 2 cm<sup>3</sup> para acomodar los productos hidratados. Así, la hidratación del cemento puede considerarse como el proceso durante el cual el volumen ocupado por el cemento y el agua va siendo reemplazado poco a poco por los productos de hidratación. (Torres, 2017)



**Figura 2:** Representación de las proporciones volumétricas de la estructura de la pasta de cemento (a) antes de la hidratación, (b) durante la hidratación.

La pasta de cemento, en cualquier etapa de la hidratación, está constituida por tres fases fundamentalmente, la fase sólida, la estructura porosa y la fase acuosa:

### **Compuestos hidratados de la fase sólida**

- Silicato de calcio hidratado. Tobermorita (C-S-H):

Los silicatos cálcicos hidratados (abreviado C-S-H) ocupan entre el 50 y el 60 % de la pasta de cemento hidratada, y son los elementos más influyentes en las propiedades de la pasta. La morfología de los C-S-H varía desde fibras pobremente cristalinas hasta estructuras reticulares (Torres, 2017).

De acuerdo a la morfología y aspecto observado por microscopía electrónica de barrido (SEM), el C-S-H puede clasificarse en cuatro tipos:

Tipo I: Tiene una morfología fibrosa, formada por láminas enrolladas sobre sí mismas y en una relación molar Ca/Si entre 0,8 y 1,5.

Tipo II: Se presenta en forma de panal de abeja con una relación molar Ca/Si entre 1,5 y 2.

## Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales

Tipo III: Está formado por granos de tamaño idénticos entre sí que no sobrepasan los  $0.01\mu\text{m}$ .

Tipo IV: Resulta ser un material compacto. (Carrasco, 2014)

De todos los productos hidratación los C-S-H son los principales responsables del endurecimiento y de la ganancia de resistencias mecánica en los materiales de base cemento. (Monteagudo, 2014)

- Hidróxido de calcio. Portlandita (CH):

Los cristales de hidróxido cálcico (también llamado Portlandita) constituyen el 20 – 25 % de la pasta de cemento hidratada, tiende a formar grandes cristales con una morfología de prisma hexagonal y varía usualmente entre una estructura indefinida hasta pilas de grandes láminas, viéndose su desarrollo afectado por el espacio disponible, temperatura de hidratación y las impurezas presentes en el sistema. (Torres, 2017). Cuando se impide el libre crecimiento, los cristales de CH pueden detener su crecimiento o hacerlo en otra dirección. (Carrasco, 2014). Las fuerzas de sus enlaces son débiles por lo que no contribuyen significativamente a las propiedades mecánicas del cemento endurecido, pero sí al aporte de alcalinidad. Esta característica puede resultar muy positiva en la protección frente a la corrosión de metales embebidos en el hormigón. El CH hace más vulnerable al hormigón frente al ataque por compuestos ácidos y fomenta la solubilidad del mismo, lo que puede producir lixiviación del material en contacto con el agua. (Monteagudo, 2014)

- Ettringita y monosulfoaluminatos:

La ettringita en el cemento Portland es poco estable, debido a que no existe la cantidad suficiente de iones  $\text{SO}_4^{2-}$  para estabilizarla en el tiempo. En consecuencia, la ettringita sólo suele ser detectada en las pastas jóvenes. La morfología de la Ettringita también depende del espacio disponible para su cristalización y del aporte e iones para su crecimiento. En el cemento Portland, generalmente se presenta como agujas delgadas creciendo dentro de los poros capilares. Con el transcurso de la hidratación, la ettringita se transforma en monosulfoaluminatos, estos hidratos se presentan en clastos o rosetas de formas irregulares. (Carrasco, 2014)

Los sulfoaluminatos de calcio son un constituyente menor en la pasta hidratada entre el 10 y el 15% del volumen de la misma. En consecuencia, este hidrato no

## **Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales**

tiene gran influencia en la microestructura de la pasta, pero sí puede tenerla en sus propiedades durables. (Carrasco, 2014). En primer lugar, se forma el trisulfoaluminato de calcio hidratado o fase Aft que tiene una gran influencia en la hidratación inicial del cemento, y a medida que se va consumiendo, comienza a aparecer el monosulfoaluminato o fase Afm. (Monteagudo, 2014)

### **Granos de cemento anhidro**

Dependiendo del tamaño y distribución de las partículas del cemento anhidro y del grado de hidratación, pueden encontrarse algunas partículas de clínker no hidratadas en la estructura. En los inicios del proceso de hidratación, se disuelven las partículas más pequeñas (desaparecen del sistema) y se reducen de tamaño las más grandes (Torres, 2017)

Dado el limitado espacio disponible entre las partículas, los productos de hidratación tienden a cristalizarse en las proximidades de las partículas de clínker en proceso de hidratación, apareciendo como capas que envuelven a las mismas. A edades avanzadas, debido a la ausencia de espacio, la hidratación de las partículas de clínker progresa internamente, resultando productos de hidratación muy densos, que a veces se asemejan en su morfología a la partícula de clínker original (Torres, 2017)

### **Estructura porosa**

La caracterización de la estructura porosa de los materiales cementicios endurecidos es de primordial importancia. Los factores que intervienen en su formación son: la relación agua/cemento, la compactación, la cantidad de cemento y el grado de hidratación del mismo. (Monteagudo, 2014)

- Poros de gel o microporos:

Son poros interlaminares que quedan entre las láminas de gel C-S-H. Su volumen aumenta a medida que crecen los productos de hidratación. Pueden afectar a la estabilidad de volumen modificando la retracción y la fluencia del hormigón, pero no influyen en la durabilidad ni en la capacidad resistente del material. (Monteagudo, 2014)

- Poros capilares o mesoporos:

## Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales

Los poros capilares son los espacios no ocupados por el cemento o por los productos de hidratación, cuyo volumen y tamaño viene determinado por la distancia original entre las partículas de cemento anhidro en la mezcla húmeda y el grado de hidratación, estos pueden contener agua o no. El volumen de poros capilares constituye lo que se conoce como porosidad (Torres, 2017)

Este tipo de poro tiene una gran influencia en la durabilidad y en la capacidad de transporte del hormigón, especialmente cuando forman una red capilar interconectada ya que favorece el transporte de sustancias líquidas y gaseosas en el interior del material debido a las fuerzas capilares y a la tensión de estos huecos. (Monteagudo, 2014)

- Huecos de aire o macroporos:

Su origen se debe a la formación de burbujas de aire que no afloran a la superficie, quedan atrapadas durante el amasado, para prevenir su formación es necesario compactar suficientemente. Normalmente se distribuyen de manera uniforme y no suelen tener conexión con otras burbujas de aire, por lo que no afectan la permeabilidad del material, sin embargo, influyen negativamente en las resistencias mecánicas. (Monteagudo, 2014)

### **Fase acuosa**

- Agua químicamente combinada:

Se conoce también como agua absorbida, interlaminar o de constitución. Forma parte integral de la estructura de los productos hidratados ya que reacciona químicamente con las partículas de cemento. (Monteagudo, 2014)

- Agua de gel:

También conocida como agua ligada físicamente o agua interlaminar, ocupa los poros de gel. Se considera agua estructural por estar asociada a la estructura laminar del gel C-S-H. Su eliminación implica la retracción de la estructura. (Monteagudo, 2014)

- Agua capilar:

Es el agua presente en los poros capilares y no tiene consideración estructural. Su eliminación no produce cambios sustanciales en las dimensiones de la pasta. (Monteagudo, 2014)

### **1.2.5 Cambios de volumen durante la hidratación de la pasta de cemento**

#### **Portland**

Un aspecto importante del desarrollo microestructural es el grado de porosidad durante la hidratación. Todos los productos de hidratación de los compuestos del cemento tienen densidades más pequeñas y volúmenes específicos más grandes que los compuestos de los cuales provienen. Por eso, cada reacción de hidratación va acompañada por un aumento en volumen de los sólidos, que lleva consigo una disminución de la porosidad. Un conocimiento de la porosidad puede ser muy ventajoso, ya que tiene gran influencia en las propiedades de la pasta del cemento, especialmente, en la resistencia y durabilidad. (Blanco, 2015)

No sólo tiene interés el cambio de volumen total, sino también la manera en que este cambio se manifiesta. El hidróxido de calcio (Portlandita) puede crecer alrededor de partículas sólidas y detiene su crecimiento en ciertas direcciones si se encuentra obstáculos, y lo mismo vale para C-S-H. Por esta razón, la hidratación de los silicatos de calcio no va acompañada por un aumento en el volumen total de la pasta. Los productos de la hidratación únicamente ocupan el espacio disponible dentro de la pasta, que es el volumen originalmente ocupado por el agua en la mezcla. Si este espacio está totalmente lleno antes de que se haya producido la hidratación completa, la hidratación prácticamente cesa. (Blanco, 2015)

Todo lo contrario, pasa cuando la ettringita se forma en la fase  $C_3A$  o la fase ferrítica. Los cristales de ettringita crean espacio para ellos mismos si se impide el crecimiento de los cristales por materia sólida. Si la materia que impide el crecimiento de los cristales es rígida, se desarrolla una presión de crecimiento de cristales en el punto donde el crecimiento ha parado. (Blanco, 2015)

Se ha estimado que la ettringita puede causar presiones de crecimiento de cristales tan elevadas como 240 MPa. En una pasta que todavía no está fraguada, la ettringita tiene mucho espacio donde se puede formar o puede procurar espacio adicional empujando a un lado los obstáculos de partículas de cemento. (Blanco, 2015)

## **Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales**

Sin embargo, cuando la pasta ha desarrollado rigidez, el espacio necesario para continuar la formación de cristales de ettringita se crea por expansión del volumen total de la pasta. (Blanco, 2015)

Normalmente, sólo se producen pequeñas expansiones durante la hidratación de pastas de cemento Portland debido a la cristalización de ettringita, ya que únicamente se forman pequeñas cantidades después del endurecimiento de la pasta. (Blanco, 2015) Es importante estudiar la estabilidad volumétrica al adicionar materiales cementicios suplementarios y aditivo al cemento, pues pueden afectar las propiedades físico- mecánicas del hormigón a preparar. (Martínez, 2017)

### **1.3 Adiciones al cemento Portland**

La inclusión de adiciones minerales durante la molienda del clínker Portland para obtener cementos mezclados, es una práctica que se realiza desde hace varios años por razones de índole tecnológicas. Algunas adiciones disminuyen el calor de hidratación, aumentan la resistencia frente al ataque por sulfatos, disminuyen la permeabilidad y los efectos adversos de la reacción álcali-agregado. Otras aumentan el grado de hidratación del cemento, incrementando la resistencia fundamentalmente a las primeras edades. (Carrasco, 2014)

La (NC:120, 2014), considera como adición un material mineral finamente molido que se utiliza en el hormigón con el objetivo de mejorar ciertas propiedades (reológicas, mecánicas, etc.) o de conferirle propiedades especiales.

#### **1.3.1 Materiales Cementicios Suplementarios (MSC)**

La definición general de MCS abarca un gran número de materiales, que varían ampliamente en término de origen, composición química y mineralógica y características morfológicas. Los MCS comprenden aquellos materiales que muestran comportamiento hidráulico, que se endurecen en presencia de agua para formar productos cementicios en una reacción de hidratación y aquellos que muestran comportamiento puzolánico. (Snellings, 2011, Almenares, 2017)

En la actualidad, es también aceptada la clasificación basada en su origen (Massazza, 1976, Almenares, 2017). En este sentido se pueden distinguir dos categorías, los materiales de origen natural y los de origen artificial (Papadakis,

## **Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales**

2002, Almenares, 2017). El primer grupo consiste en materiales que pueden ser utilizados como MCS en la forma que se presentan en la naturaleza; en muchos casos, ellos solo necesitan preparación para obtener un tamaño de partículas adecuado por medio de procesos de cribado, trituración y/o molienda. El segundo grupo incluye a los de origen artificial, materiales que han sido sometidos a modificaciones químicas y estructurales. (Scrivener, 2011, Almenares, 2017)

Las adiciones puzolánicas son materiales silico-aluminosos que se presentan en forma amorfa o pobremente cristalina, molidos muy finos que en presencia de humedad y a temperatura ambiente, reaccionan químicamente con el CH liberado durante la hidratación de los silicatos, para formar compuestos con propiedades cementantes. (Carrasco, 2014)

La distribución geográfica y calidad de las puzolanas naturales comúnmente empleadas también varían considerablemente, y su demanda en otros campos e industrias distintas a las del cemento también afecta su disponibilidad. En Cuba existe una amplia disponibilidad de estos materiales. (South, 2001, Almenares, 2017)

Entre los MCS de origen natural más abundantes se encuentra la roca caliza, utilizada habitualmente como fuente de calcio para la producción del clínker Portland, pero que adicionalmente puede ser usada en su estado natural, finamente molida, como adición mineral. (Almenares, 2017)

El empleo de cantidades de hasta el 5 % de caliza como material minoritario, es una práctica regular en la producción de cemento Portland ordinario en más de 25 países. Se ha demostrado que adiciones entre 2 – 5 % inter-molidas con el clínker no tienen efectos negativos sobre las propiedades físico-mecánicas del cemento, incluso las mejora. En este caso, el carbonato de calcio presente en la piedra caliza triturada tiene un doble papel, una parte reacciona sinérgicamente con el C<sub>3</sub>A del cemento formando fases AFm (monocarbo y hemicarbo-aluminatos), que contribuyen al refinamiento de la estructura de poros de la matriz cementicia. (Tironi, 2013), la otra parte de la caliza actúa como relleno inerte, proporcionando superficie específica adicional para la precipitación de los productos de reacción y favoreciendo con ello las resistencias iniciales. Como generalmente los cementos

## Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales

tienen poco contenido de  $C_3A$ , la mayor parte de la caliza se considera no reactiva, predominando su efecto físico, que además influye de manera positiva en la reología de pastas, morteros u hormigones. (Fragoso, 2017)

La caliza, al ser molida conjuntamente con el clínker que es más resistente, puede alcanzar valores muy altos de finura, lo cual acelera la hidratación de las fases de alita y alúmina, además de que suple las discontinuidades en la granulometría del clínker al actuar como material de relleno entre sus granos. (Fragoso, 2017)

Por otro lado, el estudio de las arcillas calcinadas, como fuente de MCS en la industria del cemento se ha incrementado en los últimos años, basado en sus favorables propiedades tecnológicas, reducción de los costos del cemento y del impacto negativo sobre el medio ambiente. (Juenger, 2015, Almenares, 2017).

Las arcillas en su estado natural no pueden ser usadas como puzolanas ya que presentan estructuras cristalinas estables que impiden la liberación de sílice y alúmina como especies químicas capaces de participar en la reacción puzolánica. (Fragoso, 2017, Frias, 2001). Las formas más comunes para lograr un incremento sustancial de la reactividad incluyen la molienda prolongada, la calcinación, el curado a elevadas temperaturas y la activación por medio de soluciones alcalinas (Castillo, 2010, Almenares, 2017) dentro de los cuales, la calcinación o activación térmica es la forma más común y efectiva para modificar la estructura cristalina de las arcillas y obtener el producto conocido como Metakaolín (Day, 1990, Almenares, 2017, Frias, 2001)

### **1.3.2 Cemento de Bajo Carbono**

El “Cemento de Bajo Carbono” es una formulación novedosa de cemento desarrollada por un equipo técnico del Centro de Investigaciones de Estructuras y Materiales y del Instituto Federal de Tecnología de Lausana, Suiza, que permite sustituir una buena parte del clínker –material más costoso del cemento- por una combinación de arcilla calcinada, conocida como “Metakaolín”, y carbonato de calcio en forma de piedra caliza. La fórmula de cemento desarrollada permite triplicar los niveles actuales de sustitución de clínker que logra la industria de cemento cubana (alrededor del 15-18% en el cemento PP 25), para producir un cemento de similar

## Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales

resistencia y una resistencia muy superior a la penetración de agentes como los cloruros, que pueden producir daños en la matriz de hormigón. (Martirena, 2013)

Varios estudios realizados anteriormente prueban que el metakaolín puede sustituir cemento en una proporción de un 30%. La piedra caliza molida es una fuente barata y ampliamente disponible de mineral calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). Es usada con frecuencia como relleno en la producción de cemento, en pequeñas proporciones. Cuando las adiciones son en el orden del 5% de clínker, el cemento resultante exhibe propiedades iguales o ligeramente superiores debido al aumento de compacidad. (Fernández, 2013, Fragoso, 2017)

De acuerdo con la naturaleza puzolánica del metakaolín, su efectividad sobre las propiedades de pastas de cemento, morteros y hormigones, está altamente influenciada por su interacción con el hidróxido de calcio y por tanto de su disponibilidad. (Martirena, 2012, Vizcaíno, 2015). La sinergia entre la alúmina del metakaolín y los carbonatos de la caliza consumen gran cantidad del hidróxido de calcio de la hidratación del cemento Portland desde el primer día, lo que brinda mayor resistencia a las mezclas en comparación con las series de cemento Portland ordinario, lo cual amplía las posibilidades de sustitución hasta un 45% sin comprometer el rendimiento mecánico del cemento. (Vizcaíno, 2015)

El cemento de bajo carbono, producido mediante la adición de arcilla calcinada y caliza, ha mostrado excelentes propiedades hasta el momento. En pruebas de resistencia a las 24 horas alcanzó 5 MPa, el 15% de la resistencia que se espera alcance en 28 días. Además, no incrementa la demanda de agua, y tiene un fraguado normal, similar a los cementos comerciales P 35 y PP 25. (Martirena, 2013)

### **1.3.3 Hidratación del cemento Portland con adiciones puzolánicas**

La ecuación de reacción del proceso de hidratación de un cemento con adiciones puzolánicas es la siguiente:



Un cemento con adición puzolánica produce lo mismo que un cemento portland (gel de tobermorita e hidróxido de calcio), pero el hidróxido de calcio producto de la reacción con los silicatos se combina con el material puzolánico produciendo más

## Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales

gel de tobermorita, este fenómeno otorga características adicionales al cemento con adición, que no tiene un cemento portland puro. (Munizaga, 2009, Hanna, 1997)

El mecanismo de reacción entre las puzolanas y el hidróxido de calcio en el cemento se puede explicar de la siguiente forma (Cruz, 2001):

1. Difusión de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  en solución liberados de la hidratación del clínker, hasta la superficie de los granos de puzolana.
2. Adsorción de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  en la superficie de las partículas de puzolana.
3. Difusión de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  a través de la capa de productos de reacción.
4. Interacción química entre los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y la puzolana.

Las características más importantes de la reacción puzolánica en la hidratación del cemento Portland son:

- Constituye reacción lenta, en consecuencia, la ganancia de resistencia de la pasta es diferida en el tiempo, debido a esto, para que la reacción prospere se hace necesario extender el tiempo de curado. Si bien los materiales puzolánicos se incorporan finamente divididos al cemento y esto produce una aceleración de la hidratación, el efecto de dilución inicial que sufre el cemento sumado a la tardía reacción de los materiales puzolánicos, hace que la ganancia de resistencia en las primeras edades sea menor que a edades más avanzadas. (Carrasco, 2014)
- Es una reacción en la cual se consume el CH, en consecuencia, se permite el reemplazo de cristales grandes y orientados de CH, por pequeños, numerosos y poco orientados de C-S-H. A este efecto se le denomina refinamiento de grano. (Carrasco, 2014, Bakolas, 2004)
- Los productos resultantes de la reacción se precipitan en los poros capilares, transformándolos en microporos discontinuos (segmentación de poros), y en consecuencia disminuye la permeabilidad del sistema. (Carrasco, 2014)
- La sustitución de una parte de cemento Portland por una cantidad equivalente de puzolana reducirá el calor de hidratación a cortos plazos en forma proporcional a la cantidad de cemento portland sustituida, puesto que en este período la puzolana no actúa, comportándose como un material inerte. A mediano y largo plazo, la reducción del calor es menor que la que

## Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales

corresponde a dicha proporcionalidad ya que intervienen, sumándose, el calor correspondiente a la formación de compuestos hidratados por acción puzolánica, y a la hidratación de los silicatos correspondientes del cemento Portland. (Munizaga, 2009, Bakolas, 2004, Pane, 2005)

- La composición de los C-S-H formados durante la reacción puzolánica es similar a la de los C-S-H formados durante la reacción de hidratación del cemento, pero con una relación Ca/Si generalmente más baja. En el caso de las arcillas calcinadas, que poseen en su composición cantidades apreciables de alúmina reactiva, favorecen no solo la formación de fases de aluminato de calcio, sino también la sustitución parcial del Si por Al en la estructura de los C-S-H, incrementando así la relación Al/Ca en los C-S-H. (Fernández, 2009, Alujas, 2010)

### **1.3.4 Efecto de la adición de puzolanas al cemento Portland**

La sustitución parcial de cemento Portland por un material de procedencia puzolánica se puede describir a partir de la combinación de varios efectos químicos y físicos. Dentro de los efectos físicos, el efecto de dilución implica, para una misma relación  $V_{H_2O} / V_{Aglomerante}$ , un mayor espacio para la formación y crecimiento de las fases hidratadas y un aumento de la relación  $V_{H_2O} / V_{CPO}$ , lo cual favorece además la reacción de hidratación. También se incluyen, dentro de los efectos físicos, el incremento de la compacidad debido al efecto filler y la nucleación heterogénea por el aporte de las puzolanas de una superficie adicional que favorece la nucleación y crecimiento a edades tempranas de los productos de hidratación del cemento Portland. Los efectos mencionados no dependen de la reactividad química de la adición mineral, sino de la cantidad de superficie disponible y del por ciento de sustitución. A edades tempranas se consideran muy importantes. (Cyr, 2006, Alujas, 2010)

Por otro lado, y a diferencia de los efectos físicos mencionados, el efecto químico fundamental sí está dado por la reactividad puzolánica de la adición mineral. El CH aportado durante la hidratación del cemento Portland puede representar en una pasta completamente hidratada hasta un 28% en masa respecto a la masa inicial

## **Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales**

de cemento Portland, este no posee propiedades cementicias, por lo que representa un grave problema en el concreto, ya que puede ser lixiviado por el agua y reaccionar con determinados agentes químicos como las aguas de ambientes marinos saturadas de cloruros, o las aguas subterráneas ricas en sulfatos, lo que puede provocar expansiones que debilita la estructura y la resistencia química del concreto. (Banfill, 2011) El CH puede ser extraído de la masa del hormigón en sucesivos ciclos de humedecimiento y secado, aumentando la porosidad e incrementando la permeabilidad y la susceptibilidad al ataque agentes químicos externos. (Taylor, 1990, Alujas, 2010, Cruz, 2001)

La sustitución parcial de cemento por un por ciento de material puzolánico posibilita densificar la microestructura de la pasta y refinar la estructura de poros, favoreciendo así el incremento de la impermeabilidad y la resistencia mecánica. Todo esto se debe fundamentalmente a que la puzolana reacciona con el CH presente en la pasta hidratada. (Zhang, 2000, Alujas, 2010). Al mismo tiempo, como la CH presente en la pasta es susceptible a formar fases con potencial expansivo al reaccionar con agentes externos como los sulfatos, su reducción favorece la resistencia al ataque químico. También se ha reportado la disminución en la aparición de grietas por retracción. (Souza, 2005, Alujas, 2010). Se puede afirmar que con la sustitución del cemento Portland por materiales puzolánicos, se mantienen o mejoran las propiedades físicas y de durabilidad. (Alujas, 2010)

Las principales desventajas reportadas para el empleo de puzolanas se deben a las bajas resistencias mecánicas que se alcanzan a edades tempranas y la necesidad del empleo de aditivos superplastificantes o de relaciones agua-aglomerante mayores que para la pasta que contiene solo cemento Portland, para lograr mantener una laborabilidad constante de la mezcla. (Martirena, 2003, Alujas, 2010)

### **1.4 Conclusiones Parciales**

1. Dentro de la composición de la pasta de cemento hidratada, es la Ettringita, fase formada por la hidratación del aluminato tricálcico, la principal responsable de los cambios de volumen que se producen en el proceso de hidratación del cemento.

## **Capítulo I: Proceso de hidratación del cemento Portland con adiciones minerales**

2. En la actualidad se ha generalizado la utilización de adiciones minerales, tanto en la molienda del clínker como en la propia elaboración del hormigón, debido a las importantes ventajas técnicas, económicas y ecológicas que posee esta práctica.
3. El uso de adiciones como es el caso de la arcilla calcinada más caliza, favorecen no solo la sustitución parcial del cemento portland, reduciendo la producción del clínker, sino que brinda ciertas propiedades que hacen más durable el hormigón.

## **Capítulo II: Uso de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones**

### **2.1 Materias primas. Caracterización**

Para la investigación se utilizan como materias primas: cemento P 35 producido en la fábrica Karl Marx de la provincia de Cienfuegos, aditivo SikaPlast, áridos provenientes de la Cantera Mariano Pérez de el Purio en Encrucijada y la adición mineral activa LC<sup>2</sup> compuesta por caliza, arcilla calcinada y yeso preparada en la Universidad central Marta Abreu de Las Villas.

#### **2.1.1 Cemento**

El cemento a utilizar se produce en la fábrica de cemento Karl Marx de la provincia de Cienfuegos, de acuerdo a la (NC:95, 2011) Cemento Portland- Especificaciones, clasificado como cemento Portland P 35, en la siguiente tabla 2.1 se muestran las propiedades físico-mecánicas del mismo.

**Tabla 2.1** Propiedades físico-mecánicas del cemento P 35 de Cienfuegos

Ensayo	Resultado	Especificaciones
Tiempo de fraguado inicial (min)	150	≥ 45
Tiempo de fraguado final (h)	4:20	≤ 10
Consistencia Normal (%)	24,6	-
Finura de molido (%)	6,5	-
P.E.Real del cemento (g/cm <sup>3</sup> )	3,08	-
Resistencia Comp. 7días (MPa)	35,5	≥25
Resistencia Comp. 28días (MPa)	42,4	≥35
Resistencia Flexo-Tracc. 7días (MPa)	8,6	-
Resistencia Flexo-Tracc. 28días (MPa)	9,5	-

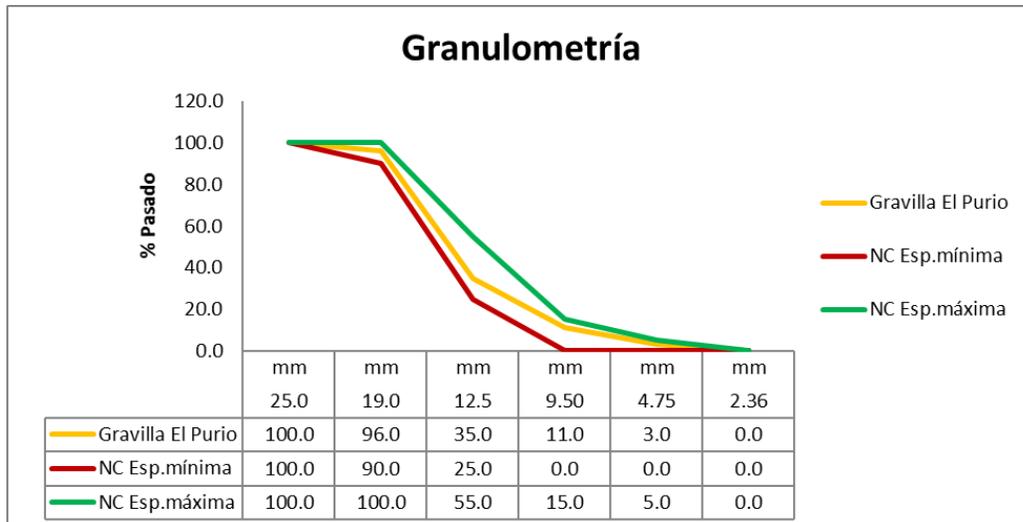
#### **2.1.2 Árido grueso (Gravilla), fracción 19.0- 9.50 mm**

El árido grueso es una gravilla que se obtiene de la trituración de las rocas calizas en la cantera Mariano Pérez, El Purio, ubicada en el municipio de Encrucijada, provincia Villa Clara.

**Capítulo II: Uso de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones**

**Tabla 2.2** Propiedades del árido grueso (gravilla). Cantera El Purio. Fuente: (Veiga, 2018)

Ensayos	Resultado	Especificaciones
Material más Fino que 0.074 mm (%)	0,51	≤ 1,0
Pesos Específicos Corriente	2,50	≥ 2,50
Pesos Específicos Saturado	2,55	-
Pesos Específicos Aparente	2,60	-
Absorción (%)	2,17	≤ 3,0
Masa Volumétrica Suelta (kg/m <sup>3</sup> )	14,206,580	-
Masa Volumétrica Compactada (kg/m <sup>3</sup> )	15,678,667	-
Porcentaje de Huecos (%)	32,70	-



**Gráfico 2.1** Granulometría del árido grueso (Gravilla)

Como se observa en el gráfico el árido grueso cumple con las especificaciones de la (NC:251, 2013) Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos.

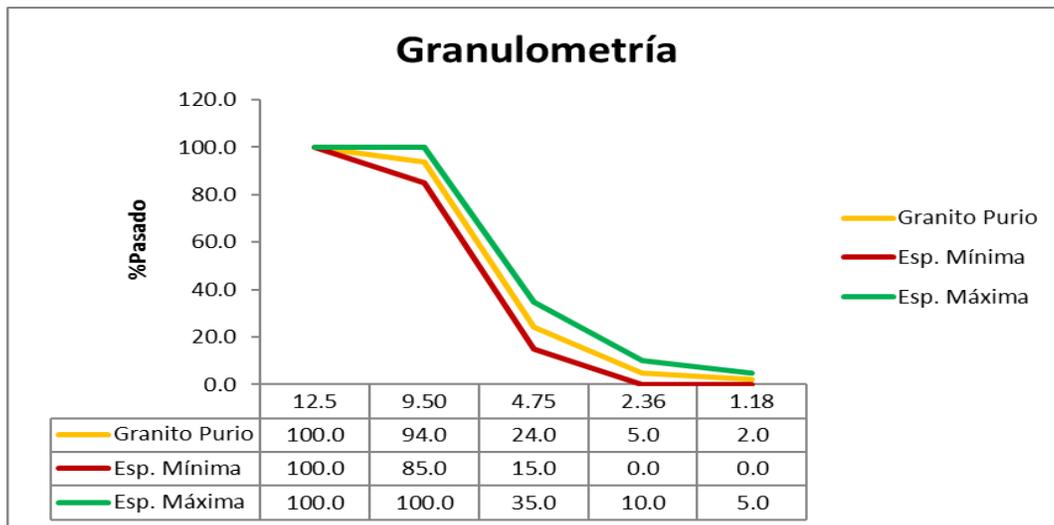
**2.1.3 Árido grueso (Granito), fracción 9.52- 4.76 mm**

El granito que se utiliza en la elaboración de hormigones, también procede de la cantera Mariano Pérez, de El Purio en Encrucijada, Villa Clara. Los ensayos que se realizan a estos áridos se realizan en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Construcciones de la Universidad Central Marta Abreu de las Villas.

**Capítulo II: Uso de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones**

**Tabla 2.3** Propiedades del árido grueso (granito). Cantera El Purio. Fuente: (Veiga, 2018)

Ensayos	Resultado	Especificaciones
Material más Fino que 0.074 mm (%)	0,84	≤ 1,0
Pesos Específicos Corriente	2,40	≥ 2,50
Pesos Específicos Saturado	2,47	-
Pesos Específicos Aparente	2,6	-
Absorción (%)	2,76	≤ 3,0
Masa Volumétrica Suelta (kg/m <sup>3</sup> )	13,883,186	-
Masa Volumétrica Compactada (kg/m <sup>3</sup> )	14,970,345	-
Porcentaje de Huecos (%)	37,50	-



**Gráfico 2.2** Granulometría del árido grueso (Granito)

Como se observa el árido fracción 9.52- 4.76 mm cumple con las especificaciones de la (NC:251, 2013).

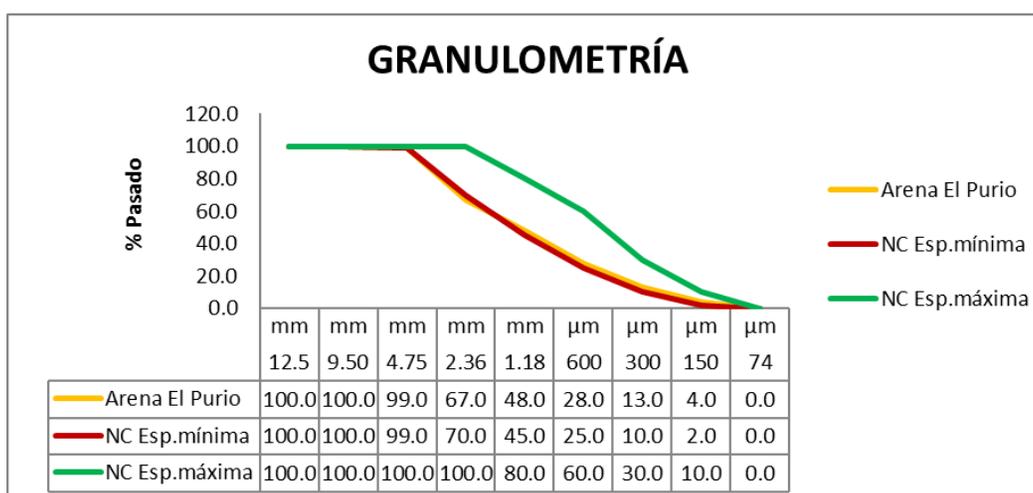
**2.1.4 Árido fino (Arena), fracción 4.76 - 0.147mm**

El árido fino también proviene de la cantera Mariano Pérez, El Purio, en Encrucijada. Los ensayos que se realizan a estos áridos se realizan en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Construcciones de la Universidad Central Marta Abreu de las Villas.

## Capítulo II: Uso de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones

**Tabla 2.4** Propiedades del árido grueso (gravilla). Cantera El Purio. Fuente: (Veiga, 2018)

Ensayos	Resultado	Especificaciones
Material más Fino que 0.074 mm (%)	2,3	≤ 5,0
Pesos Específicos Corriente	2,56	≤ 2,50
Pesos Específicos Saturado	2,61	-
Pesos Específicos Aparente	2,7	-
Absorción (%)	2,27	≤ 3,0
Masa Volumétrica Suelta (kg/m <sup>3</sup> )	14,955,321	-
Masa Volumétrica Compactada (kg/m <sup>3</sup> )	16,267,255	-
Porcentaje de Huecos (%)	36.33	-
Módulo de Finura	3.37	2.20 – 3.58



**Gráfico 2.3** Granulometría del árido fino (Arena)

Como se observa el árido fracción 4.75 - 0.147mm cumple con las especificaciones de la (NC:251, 2013), aunque hay que destacar que aunque cumplen con la norma, aumentan los por cientos de retenidos desde el tamiz de 4,75 al 1,18mm, lo que define que la arena tiene poco fino en la matriz. Esto puede influir en los resultados posteriores en los hormigones.

### 2.1.5 Aditivo SikaPlast

Este aditivo libre de cloruros, de rango medio y alta eficiencia, reduce la cantidad de agua y contribuye a la permanencia de la trabajabilidad.

## Capítulo II: Uso de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones

Se utiliza en la fabricación de hormigones para gran variedad de estructuras, específicamente donde uno de los objetivos que se persigue es optimizar la cantidad de cemento y se necesita el mantenimiento de la trabajabilidad en el tiempo.

Estado: Aditivo líquido

Color: Carmelita oscuro

Densidad: 1.13 kg/L

### **2.1.6 Adición mineral LC<sup>2</sup> (arcilla + caliza + yeso)**

La adición mineral activa se formula en la Facultad de Construcciones donde se desarrolla la activación térmica de la arcilla mediante la calcinación a 800°C, luego se procede a la molienda en un molino de bolas MB 800, y se mezcla la arcilla con la caliza en proporción 2:1 con un 7% de yeso del total a moler.

**Tabla 2.5** Materias primas para la elaboración de LC<sup>2</sup>

Materia Prima	Procedencia
Arcilla	Yacimiento Yaguajay
Caliza	Cantera Nieve Morejón, Sancti Spíritus
Yeso	Punta Alegre

**Tabla 2.6** Composición de la adición mineral activa LC<sup>2</sup>

Materiales	Cantidad (Kg)	%
Arcilla	19.8	62
Caliza	9.6	31
Yeso	0.6	7

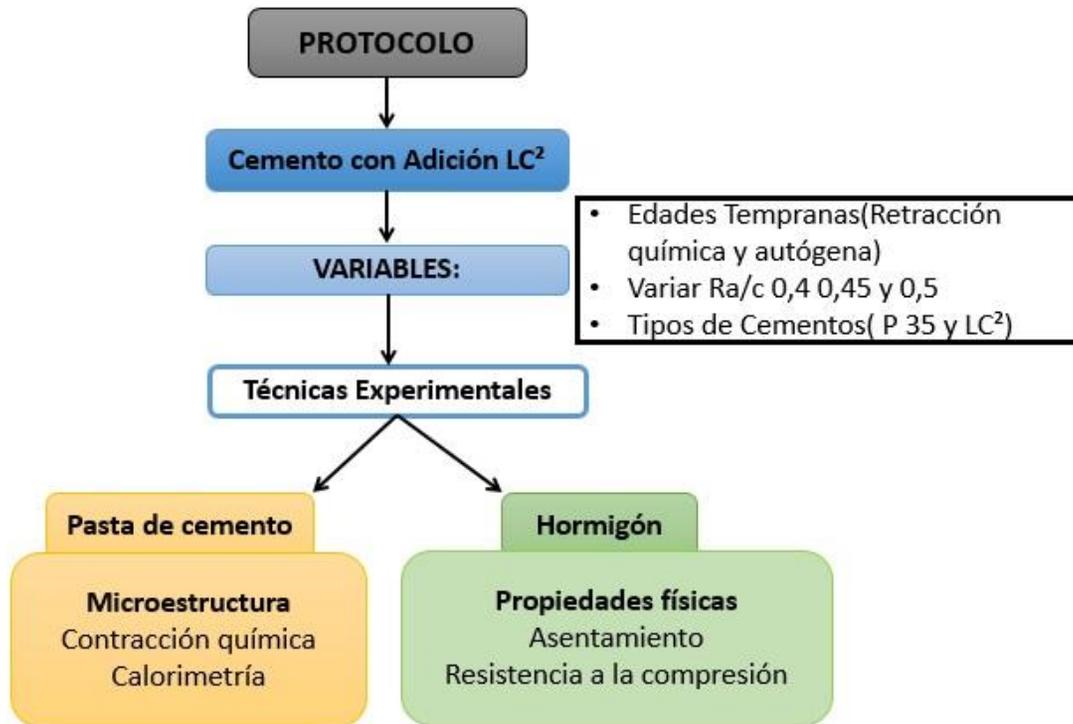
La molienda para la fabricación de LC<sup>2</sup> se realiza en dos etapas, primeramente las materias primas por separado y luego todas juntas hasta conseguir la finura necesaria para los tamices 90 y 45 µm cumpliendo con lo establecido en la norma (NC:528, 2013)

**Tabla 2.7** Ensayo de granulometría del LC<sup>2</sup> molido en UCLV

Tamiz	Cantidad a ensayar	Retenido acumulado	% que pasa
Tamiz de 45 µm	25g	88.80%	11.20%
Tamiz de 90 µm	25g	37.60%	62.40%

## 2.2 Diseño experimental

En este capítulo se expone el diseño experimental para la evaluación, en pastas y hormigones, de la utilización de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> al 30%. Se presenta, además una caracterización de cada uno de los materiales que se emplean, los métodos, procedimientos y ensayos.



**Figura 3** Diseño experimental

### 2.2.1 Declaración de las variables independientes

Se toma como variables independientes, en el desarrollo de la investigación, el tipo de cemento, donde se utiliza, como patrón, muestras con cemento Portland P 35 y para el estudio, muestras con cemento P 35 y un 30% de adición mineral (LC<sup>2</sup>). También se toma como variable independiente la relación agua/cemento para la cual serán evaluados los valores de 0,40, 0,45 y 0,50.

### **2.2.2 Declaración de las variables dependientes**

Contracción química:

El factor controlable más importante, que afecta la contracción por secado, es la cantidad de agua por unidad de volumen de hormigón por lo que en el experimento se emplean diferentes muestras de pastas que varía la composición agua/cemento y se emplea un set de contracción química, para medir la variación de volumen.(CIDEM, 2018)

Calorimetría:

El desarrollo de calor es rápido durante el fraguado y parte del endurecimiento, que disminuye progresivamente al hacerse la hidratación más lenta, hasta llegar a estabilizarse. Este método consiste en medir el calor de hidratación, en el caso de la investigación a edades tempranas con muestras con diferente composición agua/cemento para el P 35 y P 35 + LC2 (30%) y se utiliza un calorímetro isotérmico. (CIDEM, 2018)

Asentamiento por el cono de Abrams:

Mediante este ensayo se evalúa la consistencia del hormigón en estado fresco, parámetro que influye en la laborabilidad de mismo.

Resistencia a la compresión:

En este ensayo se determina la resistencia a la compresión a los 7 y a los 28 días que cumple con lo establecido en (NC:724, 2015) Ensayos del hormigón. Resistencia del hormigón en estado endurecido.

### **2.2.3 Parámetros de estado**

Los parámetros de estado se definen como las variables que se desean mantener constantes atendiendo a los fines prácticos de la investigación:

Cantidad de cemento: 50 g para 70 g de pasta y 420 kg para 1 m<sup>3</sup> de hormigón

Aditivo: 0,5%

Cantidad de árido fino: Arena procedente de la cantera El Purio

Condiciones ambientales: Temperatura 22 °C y humedad superficial 90%

## Capítulo II: Uso de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones

### 2.2.4 Procedimiento experimental

Con la caracterización de los materiales a utilizar inicia el plan experimental de la investigación, para luego pasar a la realización de los ensayos en pastas de cemento y hormigones.

**Primera etapa:** Estudios en pastas.

En esta etapa se definen las dosificaciones que se desean evaluar en la investigación. Para el análisis de la microestructura de la pasta de cemento se elaboran como patrón, 6 muestras con cemento P 35 variando la relación agua/cemento (0,40, 0,45 y 0,50) y la incorporación de aditivo SikaPlast. Luego, bajo las mismas condiciones, se elaboran las muestras de pasta con cemento P 35 y la adición mineral LC<sup>2</sup> al 30%. En el estudio de pastas de cemento se utilizan técnicas de calorimetría para estudiar la hidratación del cemento con adición mineral LC<sup>2</sup> y de contracción química para medir los cambios de volumen que se producen entre 0-7 días.

**Segunda etapa:** Ensayos en hormigones.

En esta etapa, se elaboran muestras de hormigones y morteros, tanto de cemento P 35, como de cemento P 35 con la adición mineral activa LC<sup>2</sup> al 30%, para la evaluación de las propiedades físicas (Asentamiento y resistencia a los 7 y 28 días)

**Tercera etapa:** Evaluación de los resultados obtenidos.

Se realiza el procesamiento de los resultados obtenidos en los ensayos y una valoración de los mismos.

### 2.3 Dosificaciones a emplear en la investigación

Para el desarrollo de la investigación se define una dosificación para los ensayos en pastas de cementos, donde se varía la relación agua/cemento, y otras dos dosificaciones para los ensayos en hormigón.

**Tabla 2.8** Dosificación para los ensayos en pastas de cemento

Muestra Patrón	Ra/c 0.40	Ra/c 0.45	Muestra con LC <sup>2</sup>	Ra/c 0.40	Ra/c 0.45	Ra/c 0.50
Cemento (g)	50	50	Cemento (g)	35	35	35
Agua (g)	20	22.5	Adición LC2 (g)	15	15	15
Aditivo SikaPlast(g)	2.5	2.5	Agua (g)	20	22.5	25
			Aditivo SikaPlast(g)	2.5	2.5	2.5

## Capítulo II: Uso de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones

**Tabla 2.9** Composición y nomenclatura de las pastas

Muestra	Composición
P 40	P 35, Ra/c=0.40
PA 40	P 35, Ra/c=0.40, 0.5% Aditivo
P 45	P 35, Ra/c=0.45
PA 45	P 35, Ra/c=0.45, 0.5% Aditivo
LC2-40	70%P 35+30% LC <sup>2</sup> , Ra/c=0.40
LC2(A)-40	70%P 35+30% LC <sup>2</sup> , Ra/c=0.40, 0.5%Aditivo
LC2-45	70%P 35+30% LC <sup>2</sup> , Ra/c=0.45
LC2(A)-45	70%P 35+30% LC <sup>2</sup> , Ra/c=0.45, 0.5%Aditivo
LC2-5	70%P 35+30% LC <sup>2</sup> , Ra/c=0.50
LC2(A)-5	70%P 35+30% LC <sup>2</sup> , Ra/c=0.50, 0.5%Aditivo
LC1-40	70%P 35+15% LC <sup>2</sup> , Ra/c=0.40
LC1(A)-40	70%P 35+15% LC <sup>2</sup> , Ra/c=0.40, 0.5%Aditivo
LC1-45	70%P 35+30% LC <sup>2</sup> , Ra/c=0.45
LC1(A)-45	70%P 35+15% LC <sup>2</sup> , Ra/c=0.45, 0.5%Aditivo
LC1-5	70%P 35+15% LC <sup>2</sup> , Ra/c=0.50
LC1(A)-5	70%P 35+15% LC <sup>2</sup> , Ra/c=0.50, 0.5%Aditivo

**Tabla 2.10** Dosificación para los ensayos en hormigón

Material	Para 1 m <sup>3</sup>	Para 20 Litros			
	MP1	MP1	M1	M2	M3
Cemento (kg)	165	8.4	5.88	5.88	5.88
Adición LC2 (kg)		0	2.52	2.52	2.52
Arena Purio (kg)	623	18.7	18.74	18.74	18.81
Gravilla Purio (kg)	927	17.82	17.82	17.82	17.82
Agua (l)	420	3.42	3.41	3.88	4.32
Aditivo SIKAPLAST (l)	2.8	0.055	0.084	0.084	0.084

**Tabla 2.11** Composición y nomenclatura de los hormigones

Muestras	Composición
MP1	P35 + Sika Plast 0,65%
M1	70% P35 + 30% LC2 + Sika Plast 1,00%
M2	70% P35 + 30% LC2 + Sika Plast 1,00%
M3	70% P35 + 30% LC2 + Sika Plast 1,00%

## **2.4 Estudios en pastas de cemento**

Para definir todo el proceso de investigación, como se refleja en las etapas, se realiza los ensayos a las pastas de cemento portland y las de cemento con la adición mineral activa LC<sup>2</sup>, para poder evaluar la mejor relación agua cemento para utilizar en los posteriores ensayos en hormigón.



**Figura 4** Materias primas para la elaboración de pastas.

### **2.4.1 Ensayo para la determinación del calor de hidratación**

Este ensayo se establece según (NC:525, 2014) Cemento hidráulico. Métodos de ensayos. Determinación del calor de hidratación. Se define todo un protocolo para evaluar las muestras y poder obtener los diferentes valores de liberación de calor y calor acumulado.

#### **Equipos y utensilios**

Calorímetro isotérmico, modelo TAM Air, conectado a una computadora donde se registran los datos cada un minuto, agitador mecánico, viales para la colocación de las muestras representativas de la pasta de cemento y pipetas.

#### **Procedimiento**

Para la determinación del calor de hidratación se pesa 10 gramos de pasta de cada tipo de muestra. Inicialmente se mezclan los componentes de la pasta con un agitador mecánico durante 2 minutos, luego se coloca en los viales que son correctamente sellados y ubicados en los canales del calorímetro de 3 a 6 días. Los datos se obtienen mediante un software PLW Recorder, las mediciones se expresan en mw/h. Con la ayuda de un documento Excel se procesan los datos mencionados para obtener las gráficas de calor liberado y calor total acumulado (Ver anexos I-IV)

## Capítulo II: Uso de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones



**Figura 5** Ensayo de Calorimetría

### Resultados

Después de realizar el ensayo se obtienen los siguientes resultados para la muestra patrón (Ver tablas de 2.12 a 2.15)

**Tabla 2.12** Calor acumulado en la hidratación de las muestras con P 35

Calor acumulado (mW/g cemento)				
Tiempo (h)	P 40	PA 40	P45	PA 45
0	0.01066	0.00908	0.019356	0.02226
12	2.53939	0.0938	2.3741	0.08255
24	0.95757	2.77217	0.953082	0.38299
36	0.59632	1.37811	0.56826	2.52526
48	0.39724	0.90454	0.415904	0.9843
60	0.25357	0.43615	0.298293	0.71836
72	0.17584	0.2273	0.21628	0.40236

**Tabla 2.13** Calor total acumulado en la hidratación de las muestras con P 35

Calor total acumulado (J/g cemento)				
Tiempo (h)	P 40	PA 40	P45	PA 45
0	0.053	0.013	0.051	0.011
12	142.365	5.711	134.119	4.388
24	206.117	52.167	199.042	17.510
36	237.225	174.161	228.843	122.041
48	258.043	216.203	249.406	182.375
60	271.440	241.409	264.340	215.546
72	280.343	253.658	275.078	236.076

## Capítulo II: Uso de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones

**Tabla 2.14** Calor acumulado en la hidratación de las muestras con la adición LC<sup>2</sup>

Calor acumulado (mW/g cemento)						
Tiempo (h)	LC2-40	LC2(A)-40	LC2-45	LC2(A)-45	LC2-50	LC2(A)-50
0	-0.0019	0.0026	0.0207	0.0162	0.0045	-0.0029
12	1.5836	2.1712	1.5842	2.0921	1.5913	1.9680
24	0.7458	0.8673	0.7704	0.8771	0.7333	0.8761
36	0.5072	0.5502	0.5348	0.5647	0.5249	0.5619
48	0.4420	0.4625	0.4547	0.4794	0.4268	0.4567
60	0.3527	0.3718	0.3744	0.3901	0.3512	0.3795
72	0.2773	0.2842	0.3065	0.3055	0.2879	0.3006

**Tabla 2.15** Calor total acumulado en la hidratación de las muestras con la adición LC<sup>2</sup>

Calor total acumulado (J/g cemento)						
Tiempo (h)	LC2-4	LC2(A)-4	LC2-45	LC2(A)-45	LC2-50	LC2(A)-50
0	0.104	0.061	0.104	0.067	0.098	0.064
12	135.117	132.256	130.820	135.902	132.665	129.527
24	179.346	180.947	173.323	185.144	173.730	177.697
36	205.040	208.485	199.627	213.398	199.234	205.975
48	225.147	229.527	220.353	235.184	219.149	226.872
60	242.151	247.038	237.874	253.507	235.478	244.534
72	255.618	260.635	252.187	267.987	248.970	258.769

### **2.4.2 Ensayo para la determinación de la contracción química**

Según (NC:504, 2013) Cemento. Estabilidad de volumen este ensayo se define para determinar la deformación que presenta la pasta de cemento con respecto al volumen de la muestra, lo que infiere en cuánto puede el hormigón contraerse o expandirse según los criterios de medida. Para ello se define una correlación entre contracción química producida en las pastas y el calor liberado en el proceso de hidratación del cemento.

#### **Equipos y utensilios**

Set de contracción, viales con pipetas graduadas para la colocación de la pasta, agitador mecánico, pipetas.

## Capítulo II: Uso de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones

### **Procedimiento**

Para la determinación de la contracción química se toman 5 gramos de pasta de cada muestra mezclada previamente 2 minutos con ayuda del agitador mecánico. Luego se coloca la pasta en los viales que son llenados lentamente con agua destilada, para no introducir aire, y sellados con las pipetas graduadas. Los viales son ubicados en el set de contracción que posee una webcam conectada a una computadora que registra fotos cada 5 minutos. A partir de esas fotos se establece una relación volumen/tiempo que se expresa en ml/g de cemento contra tiempo. Utilizando un Excel se conforman gráficas de volumen acumulado (Ver anexos V-VII)



**Figura 6** Contracción Química

### **Resultados**

Luego de realizar los ensayos, se obtienen los siguientes resultados para las distintas relaciones agua/cemento que se analizan (Ver tablas de 2.16 a 2.20)

## Capítulo II: Uso de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones

**Tabla 2.16** Cambio de volumen. Relación a/c = 0.40

Relación a/c = 0.40			
Tiempo (h)	P 40	Tiempo (h)	PA 40
0.16	0.0000	0.27	0.0000
6.26	0.0028	15.57	0.0029
9.26	0.0057	20.32	0.0057
11.51	0.0085	23.37	0.0086
18.56	0.0142	26.52	0.0114
24.01	0.0171	30.27	0.0143
31.26	0.0199	36.42	0.0171
40.51	0.0228	42.57	0.0200
50.07	0.0256	50.12	0.0228
61.42	0.0285	60.57	0.0257
70.47	0.0313	73.57	0.0285

**Tabla 2.17** Cambio de volumen. Relación a/c = 0.45

Relación a/c = 0.45			
Tiempo (h)	P 45	Tiempo (h)	PA 45
0.18	0	0.31	0
5.48	0.00284	15.41	0.00288
8.38	0.00568	26.41	0.00575
12.03	0.00852	30.21	0.00863
16.03	0.01135	38.11	0.01438
22.53	0.01419	42.51	0.01726
30.03	0.01703	48.16	0.02013
42.28	0.01987	54.27	0.02301
54.04	0.02271	61.07	0.02588
73.24	0.02555	71.12	0.02876

## Capítulo II: Uso de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones

**Tabla 2.18** Cambio de volumen con adición mineral LC<sup>2</sup>. Relación a/c = 0.40

Relación a/c = 0.40			
Tiempo (h)	LC2-40	Tiempo (h)	LC2(A)-40
0.1	0	0.25	0
2.1	0.0028	5.2	0.00286
5.05	0.00561	11.1	0.005721
10.05	0.01121	14.2	0.008581
15.21	0.01682	17.3	0.011442
19.06	0.01962	21.25	0.014302
24.21	0.02242	24.25	0.017162
32.47	0.02522	31.06	0.020023
40.47	0.02803	38.01	0.022883
58.02	0.03363	47.36	0.025743
65.52	0.03643	61.06	0.028604
71.57	0.03924	70.36	0.031464

**Tabla 2.19** Cambio de volumen con adición mineral LC<sup>2</sup>. Relación a/c = 0.45

Relación a/c = 0.45			
Tiempo (h)	LC2-45	Tiempo (h)	LC2(A)-45
0.2	0	0.33	0
2.25	0.00285	8.53	0.002848
5.15	0.00569	11.08	0.005696
7.35	0.00854	13.48	0.008544
11.1	0.01138	16.33	0.011392
15.05	0.01423	18.58	0.01424
18.05	0.01707	23.03	0.017088
23.55	0.01992	29.44	0.019936
32.05	0.02276	36.44	0.022784
46.45	0.02561	47.04	0.025632
61.55	0.02845	56.34	0.02848
71.85	0.0313	70.39	0.031328

## Capítulo II: Uso de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones

**Tabla 2.20** Cambio de volumen con adición mineral LC<sup>2</sup>. Relación a/c = 0.50

Relación a/c = 0.50			
Tiempo (h)	LC2-50	Tiempo (h)	LC2(A)-50
0.18	0	0.34	0.00000
2.23	0.00287	1.34	0.00287
5.33	0.00573	7.19	0.00575
8.18	0.0086	11.44	0.00862
11.13	0.01146	15.04	0.01150
14.23	0.01433	18.24	0.01437
17.18	0.01719	23.59	0.01725
22.43	0.02006	29.35	0.02012
31.19	0.02292	37.4	0.02300
43.29	0.02579	49.3	0.02587
56.49	0.02865	62.1	0.02874
71.74	0.03152	70.2	0.03162

### 2.5 Estudios en hormigones

Luego de establecer los criterios de medida en pastas de cemento con la adición mineral activa LC<sup>2</sup>, se define las muestras de hormigón a elaborar y se les determina las diferentes propiedades que infieren en el proceso, consistencia por el Cono de Abrams y Resistencia a la compresión. En el laboratorio de Hormigón de la Facultad de Construcciones de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, es donde se realiza la fabricación de probetas cilíndricas de 100 x 200 mm con moldes metálicos, para el ensayo de resistencia a la compresión, según lo establecido en la (NC:724, 2015)



**Figura 7** Materias primas para el hormigón

### **2.5.1 Ensayos para evaluar la consistencia**

Este ensayo se define para determinar la consistencia de las muestras, que según el protocolo de investigación debe ser superior a los 160mm, que lo clasifica como un hormigón fluido. Este ensayo se realiza según (NC.ISO1920-2, 2010) Ensayos al hormigón. Propiedades del hormigón fresco.

#### **Equipos y utensilios**

Molde en forma de cono truncado hueco, adecuado para conformar la muestra. Tendrá las dimensiones siguientes: Diámetro de la base 200 mm  $\pm$  2 mm, diámetro del extremo superior 100 mm  $\pm$  2 mm, altura 300 mm  $\pm$  2 mm. Otros utensilios son la varilla de compactación, el embudo que se utiliza de forma opcional, regla, superficie base para colocar el molde.

#### **Procedimiento**

Se humedece el molde y la base usando un paño absorbente. Durante la colocación del hormigón el cono se sostiene firmemente sobre dos piezas donde se apoyan los pies los pies. El molde se llena en tres capas, compactadas cada una con 25 golpes utilizando la varilla de forma tal que penetre ligeramente dentro de la capa subyacente. Después del llenado y la compactación de la última capa se apila el hormigón sobrante y se enrasa con la varilla por el borde superior del cono. Luego se alza el molde en un tiempo aproximado de 2 a 5 segundos con un movimiento firme evitando la torsión. Finalmente se determina el asentamiento midiendo la diferencia entre la altura del molde y la muestra de hormigón.



**Figura 8** Cono de Abrams

## Capítulo II: Uso de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones

**Tabla 2.21** Clasificación del asentamiento por el Cono de Abrams

Según NC 120:2014		
Tipo	Valoración cualitativa	Asentamiento (mm)
A1	seca	10 a 40
A2	plástica	50 a 90
A3	blanda	100 a 150
A4	fluida	160 a 210
A5	muy fluida	mayor de 220

### Resultados

Luego de realizar el ensayo para determinar el asentamiento por el Cono de Abrams se exponen los resultados en la tabla 2.22

**Tabla 2.22** Asentamiento por el Cono de Abrams

Muestras	Composición	Asentamiento (cm)	Valoración cualitativa
MP1- 40	P35 + SikaPlast 0,65%	20.2	fluida
M1- 40	70% P35 + 30% LC2 + SikaPlast 1,00%	16.2	fluida
M2- 45	70% P35 + 30% LC2 + SikaPlast 1,00%	19.2	fluida
M3- 50	70% P35 + 30% LC2 + SikaPlast 1,00%	18.5	fluida
M4- 40	85% P35 + 15% LC2 + SikaPlast 0,65%	16.4	fluida

### 2.5.1 Preparación y llenado de moldes para ensayo de resistencia

Según la norma (NC.ISO1920-3, 2010) Ensayos al hormigón. Elaboración y curado de probetas para ensayos, antes de proceder al llenado de los moldes, se cubre la superficie interna con una película delgada de aceite mineral o cualquier otro material para prevenir que el hormigón se adhiera al molde, colocado previamente en un área firme y nivelada. Las capas tendrán como máximo 100mm de espesor. Para la compactación de las probetas cilíndricas se utiliza la varilla metálica, dividiendo los moldes en dos capas y con veinticinco golpes en cada una de las capas, de tal forma que se produzca una compactación completa sin segregación excesiva ni exudación. Finalmente se enrasa con la misma varilla de compactación y se realiza el acabado de la superficie.

## Capítulo II: Uso de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones



**Figura 9** Moldes de probetas cilíndricas 100 x 200 mm

### **2.5.2 Desencofrado y curado de las probetas**

Según la norma (NC.ISO1920-3, 2010) luego de transcurrir 24 horas después de la colocación del hormigón en los moldes se realiza se procede al desencofre, se identifican las muestras y se colocan en el tanque de curado del laboratorio de Hormigón de la Facultad de Construcciones de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, cumpliendo con la (NC.ISO1920-3, 2010).



**Figura 10** Tanque de curado

### **2.5.2 Ensayos para evaluar la resistencia a la compresión**

Este ensayo es el más importante que definen todas las empresas de construcción de Cuba, a partir de él se diseñan todas las estructuras. Por lo que en la investigación se establece el ensayo según (NC:724, 2015)

#### **Equipos y utensilios**

Prensa o máquina estándar de ensayo a compresión, modelo Ibertest, ubicada en la Empresa Industrial de Instalaciones Fijas.

## Capítulo II: Uso de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones

### Procedimiento

Una vez que se realiza el curado de las probetas cilíndricas de 100 x 200 mm, se les quita la humedad en exceso de la superficie antes de colocarlas en la máquina de ensayo.

El tiempo transcurrido entre la extracción de la probeta tanque de curado hasta que es ensayada debe ser menor de tres horas. Durante el tiempo en que la probeta está fuera del cuarto o tanque de curado, se protege del secado, con un paño mojado. Las superficies de los platos de la prensa, se limpian y se remueve cualquier material extraño sobre las mismas. La probeta se centra en el plato inferior de una, con una exactitud inferior al 1% del diámetro de las probetas cilíndricas.

La carga se aplica sin saltos bruscos y se incrementa continuamente a una velocidad constante hasta que no pueda ser sostenida, por la probeta, una carga mayor y se deforme antes de la rotura.



**Figura 11** Ensayo de resistencia a compresión

### Resultados

Se toma como datos el valor máximo y la carga de rotura, de cada probeta ensayada, los resultados ya procesados anteriormente en un Excel se presentan en la tabla 2.23 y 2.24

**Tabla 2.23** Resistencia a la compresión a los 7 días.

Muestras	Composición	7 días			
		valor 1	valor 2	valor 3	Promedio
MP1-40	P35 + Sika Plast 0,65%	40.89	46.70	43.58	43.7
M1-40	70% P35 + 30% LC2 + Sika Plast 1,00%	40.24	38.74	35.98	38.3
M2-45	70% P35 + 30% LC2 + Sika Plast 1,00%	36.57	38.81	34.89	36.8
M3-50	70% P35 + 30% LC2 + Sika Plast 1,00%	33.26	35.69	34.83	34.6

## Capítulo II: Uso de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones

**Tabla 2.24** Resistencia a la compresión a los 28 días.

Muestras	Composición	28 días			
		valor 1	valor 2	valor 3	Promedio
MP1-40	P35 + Sika Plast 0,65%	56.15	52.67	56.00	54.9
M1-40	70% P35 + 30% LC2 + Sika Plast 1,00%	47.81	50.23	45.89	48.0
M2-45	70% P35 + 30% LC2 + Sika Plast 1,00%	46.84	45.71	47.95	46.8
M3-50	70% P35 + 30% LC2 + Sika Plast 1,00%	41.72	42.10	42.03	42.0

### 2.7 Conclusiones Parciales

1. Se logran determinar los valores de desprendimiento de calor debido a la hidratación de la pasta, con distintas relaciones agua/cemento, mediante la utilización de un calorímetro isotérmico, lo cual permite identificar las fases que se forman microestructuralmente.
2. Se obtienen los valores de cambio de volumen en una pasta de cemento con adición puzolánica, con la variación de la relación agua/cemento, donde se aprecia, además el efecto del aditivo SikaPlast.
3. Para las muestras de hormigón se determinan los valores de asentamiento por el Cono de Abrams y resistencia a la compresión a los 7 y 28 días, los cuales cumplen con los requerimientos exigidos en la investigación.

## **Capítulo III: Influencia de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones**

### **3.1 Introducción**

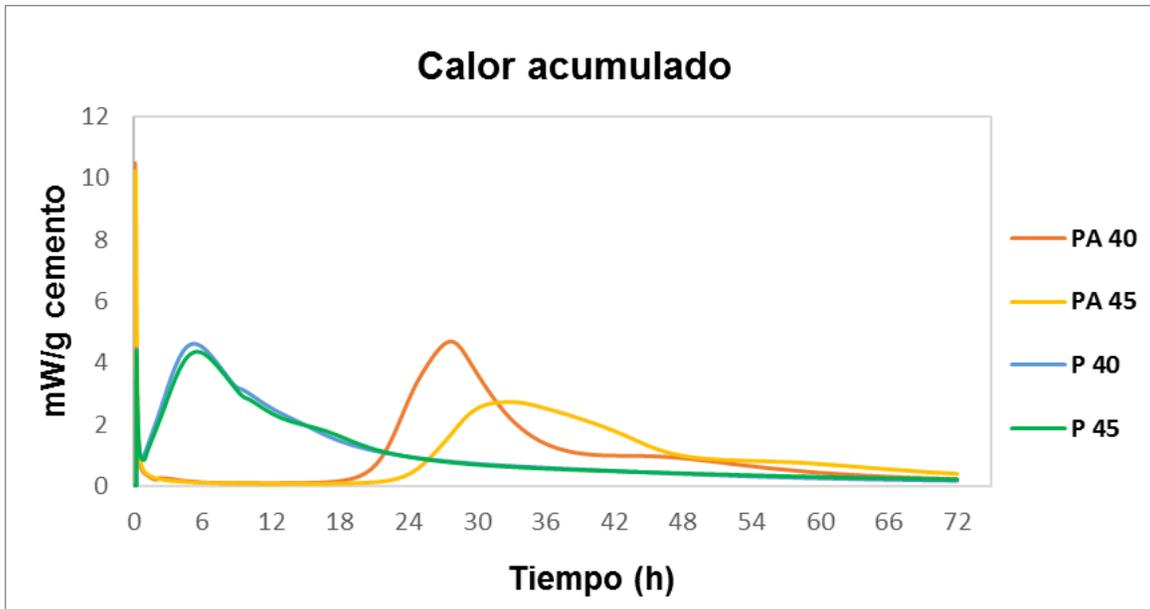
En este capítulo se analiza, de forma cualitativa y cuantitativa los resultados de los ensayos en pastas de cemento y hormigones, donde se utiliza la adición mineral LC<sup>2</sup>. En pastas se realiza el ensayo de calorimetría para evaluar el desprendimiento de calor durante la hidratación de los componentes del cemento e identificar la formación de las distintas fases de una pasta de cemento hidratada con adición puzolánica, con respecto al tiempo; se realiza, además, el ensayo de contracción química, para analizar los cambios de volumen en dicha pasta de cemento y la correlación que existe con el desprendimiento de calor durante la hidratación. En las muestras de hormigón se determina, en estado fresco, el asentamiento mediante el ensayo del Cono de Abrams y en estado endurecido, se realiza el ensayo de resistencia a la compresión a los 7 y 28 días.

### **3.2 Influencia de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en la hidratación de pastas de cemento**

El proceso de hidratación del cemento Portland con un 30% de adición mineral LC<sup>2</sup> se produce de forma lenta con respecto al cemento Portland puro. En estudios anteriores se plantea que estos cementos poseen mayor estabilidad química y una microestructura más densa. Con esta investigación se pretende evaluar la influencia LC<sup>2</sup> en la hidratación de pastas de cemento con un 30% de sustitución.

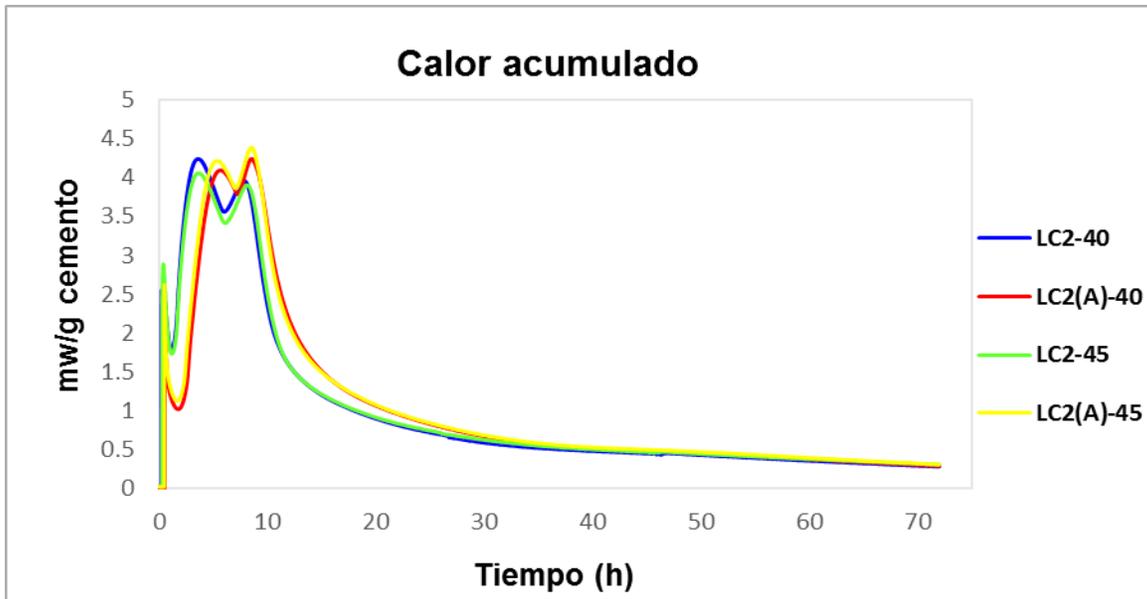
#### **3.2.1 Efecto del aditivo SikaPlast en la hidratación del cemento Portland**

La utilización del aditivo SikaPlast permite retardar el fraguado inicial del cemento, y de esta forma se prolonga la formación de las fases de una pasta hidratada. Por ello se realiza la comparación entre las muestras con y sin aditivo, para analizar el efecto de este en la hidratación de las pastas de cemento.



**Gráfico 3.1** Calor acumulado durante de la hidratación de la muestra patrón.

En el gráfico 3.1 se observa el Período de inducción de las muestras P 40 (Cemento Portland, Ra/c 0.40, sin aditivo) y P 45 (Cemento Portland, Ra/c 0.45, sin aditivo) que tiene una duración aproximada de dos horas. Las curvas de calor acumulado ascienden hasta un punto máximo que coincide con la formación de los silicatos de calcio hidratados (C-S-H) que ocupan entre el 50% y el 60% de la pasta de cemento hidratada. En las muestras PA 40 (Cemento Portland, Ra/c 0.40, con aditivo) y PA 45 (Cemento Portland, Ra/c 0.45, con aditivo) se observa un retraso en la etapa de fraguado inicial, debido al efecto del aditivo SikaPlast. La pasta se mantiene en un estado plástico durante 20 horas aproximadamente antes de pasar al Período de aceleración, donde la velocidad de hidratación alcanza el máximo valor a las 36 horas, lo cual indica que el fraguado inicial a concluido y comienza el endurecimiento de la pasta.

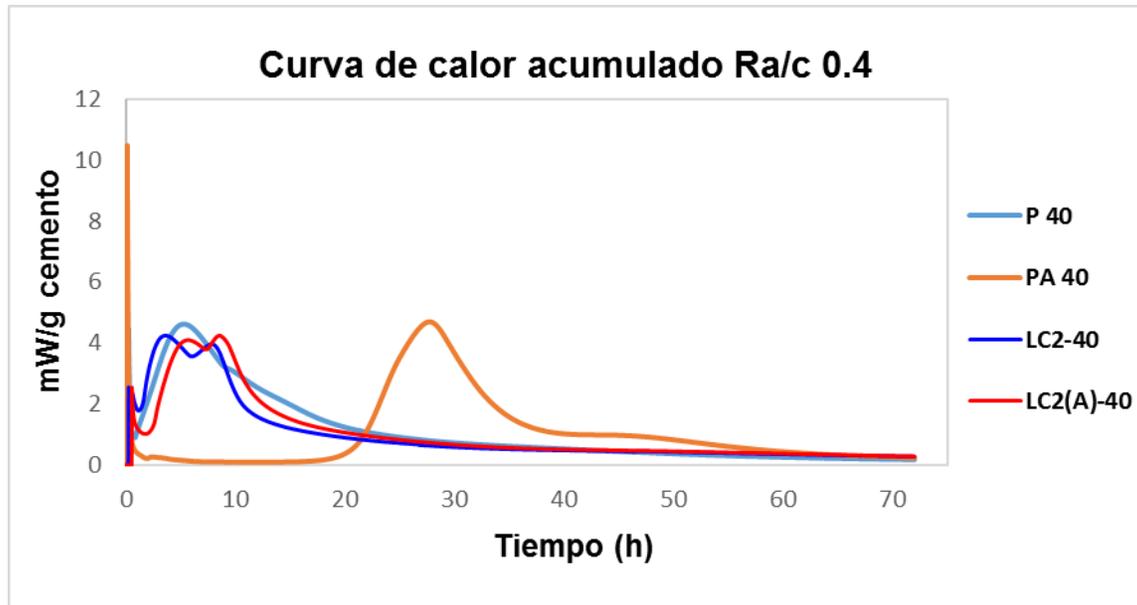


**Gráfico 3.2** Calor acumulado durante de la hidratación de la muestra estudio.

En el gráfico 3.2 se observa el comportamiento, durante la hidratación, de las muestras con P 35 y adición mineral LC<sup>2</sup>, con variación de la relación agua-cemento. Como se aprecia, el efecto del aditivo de retardar el fraguado inicial de la pasta es similar al que se observa en las muestras patrón (Ver anexo I). En las muestras LC2(A)-4 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.40, con aditivo) y LC2(A)-45 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.45, con aditivo) el Período de inducción se retarda aproximadamente entre cinco y siete horas; esto se debe a que, dentro de la composición de la pasta, la adición mineral LC<sup>2</sup> posee mayor superficie específica, una parte del aditivo es absorbido por esta y se limita así su función de retardador.

### **3.2.2 Efecto de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en la hidratación del cemento Portland**

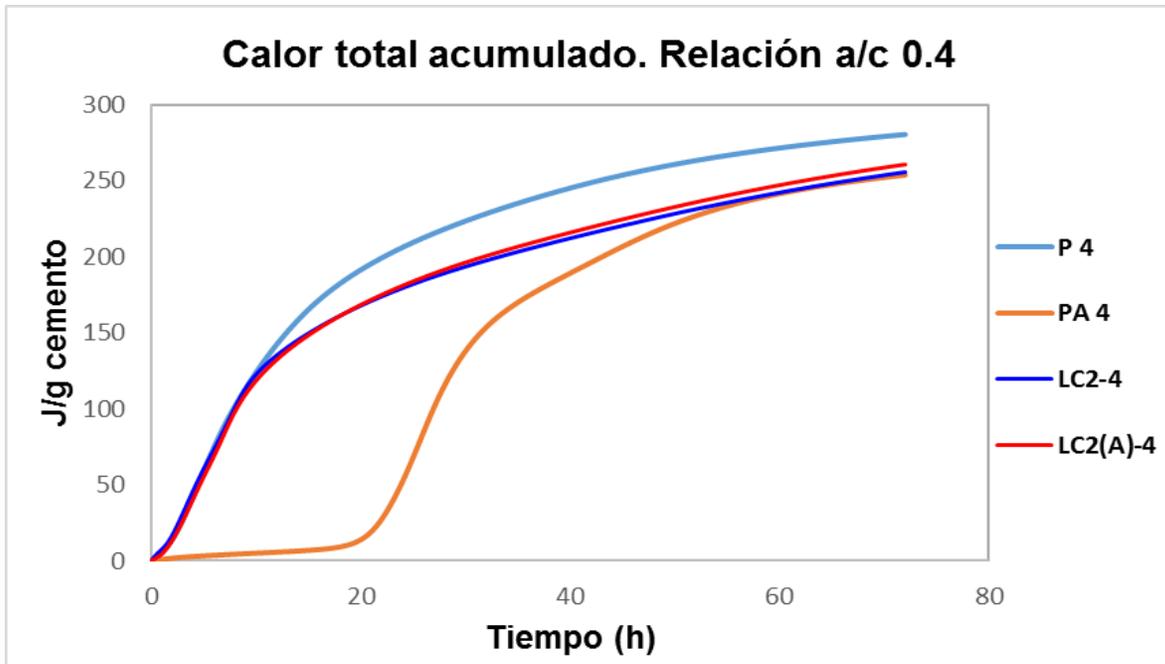
Se analiza la influencia de la adición mineral LC2 en la hidratación del cemento Portland. Se compara el calor liberado por las muestras con un 30% de sustitución con respecto a las muestras de P 35, para las relaciones agua-cemento 0.4 y 0.45.



**Gráfico 3.3** Calor acumulado durante de la hidratación

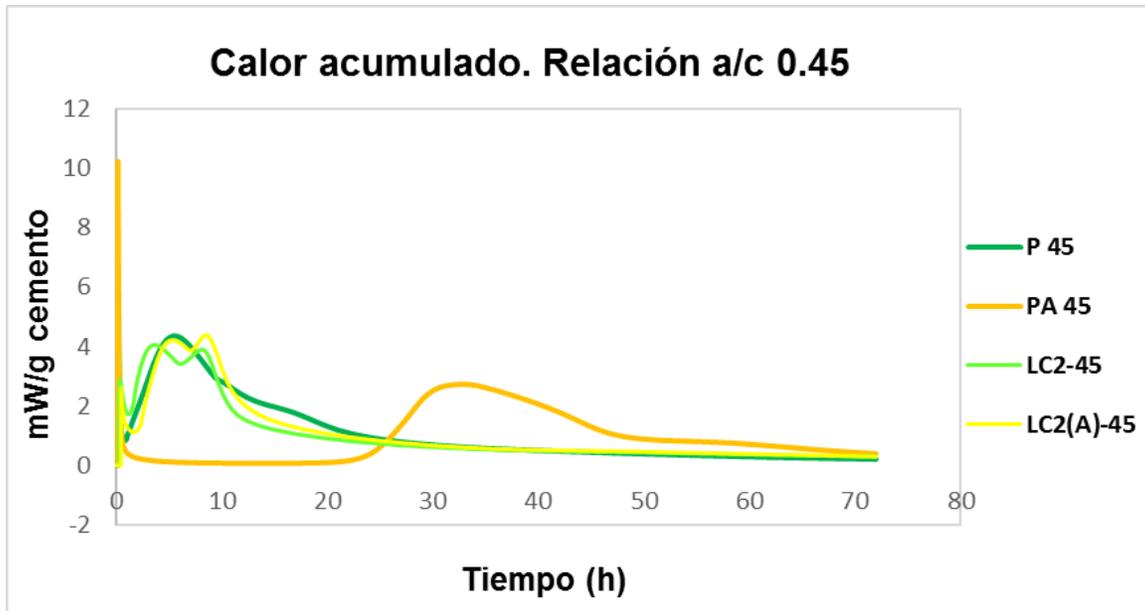
En el gráfico 3.3 se observan las muestras LC2-40 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.40, sin aditivo) y LC2(A)-40 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.40, con aditivo) en las cuales quedan bien definidas la etapa de formación del silicato de calcio hidratado (C-S-H) (Primer pico de la curva) y la etapa de reacción del aluminato tricálcico donde se forma la ettringita (Segundo pico de la curva). En la muestra LC2(A)-40 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.40, con aditivo) la etapa de formación de ettringita tiene mayores valores de desprendimiento de calor que LC2-40 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.40, sin aditivo).

Para ambas muestras se evidencia un Período de inducción más largo con respecto al patrón, debido a que la reacción puzolánica ocurre de forma más lenta. Luego de transcurrir diez horas aproximadamente, todas las muestras, excepto PA 40 (Cemento Portland, Ra/c 0.4, con aditivo), que se encuentra bajo el efecto del aditivo SikaPlast, comienzan a estabilizarse. Las pendientes de las curvas decrecen y coinciden a las 72 horas. Se puede afirmar que, en la hidratación de los componentes de la pasta, tanto patrón como las muestras con adición mineral LC<sup>2</sup> se comportan de manera similar para una misma relación agua-cemento.



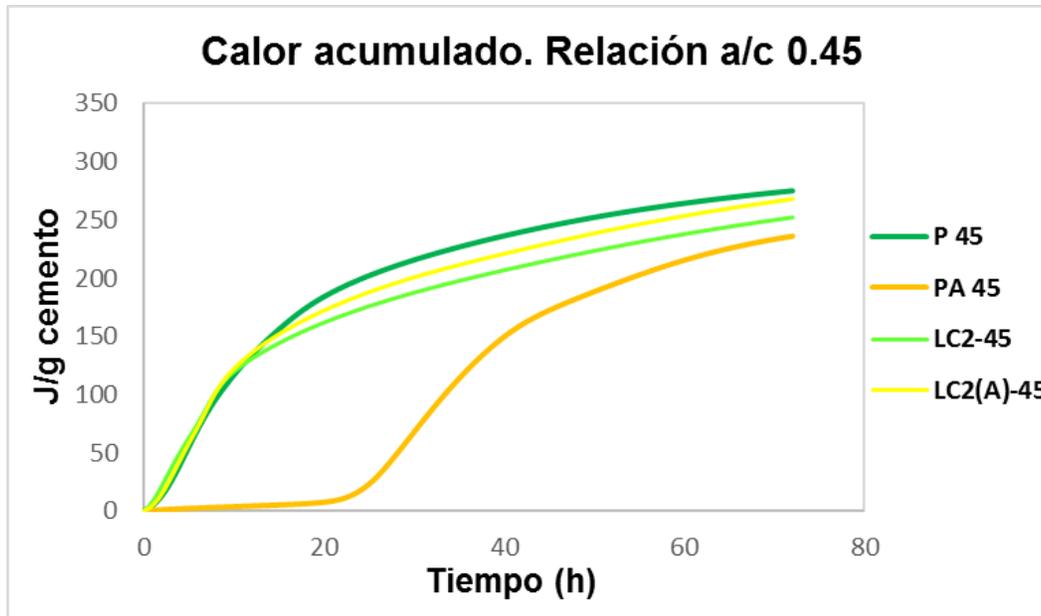
**Gráfico 3.4** Calor total acumulado durante de la hidratación

El gráfico 3.4 muestra la variación del calor total acumulado (J/g cemento) para una misma relación agua-cemento de 0.40. Se puede apreciar, para las muestras P 40 (Cemento Portland, Ra/c 0.40, sin aditivo), LC2-4 (30% LC2, Ra/c 0.40, sin aditivo) y LC2(A)-4 (30% LC2, Ra/c 0.4, con aditivo), cómo los valores incrementan rápidamente hasta aproximadamente las diez horas. En la muestra PA 40 (Cemento Portland, Ra/c 0.40, con aditivo) no se produce desprendimiento de calor con respecto a las demás hasta las 20 horas, a partir de aquí existe un aumento del calor total generado. La muestra P 40 (Cemento Portland, Ra/c 0.40, sin aditivo) presenta los mayores valores con una diferencia de 19.79 J/g cemento, lo cual representa un 80 por ciento, aproximadamente, del calor total acumulado. Después de las 60 horas, el calor evolucionado tiende a estabilizarse. En este gráfico se demuestra que, la sustitución de una parte de cemento Portland por una cantidad equivalente de puzolana, reduce el calor de hidratación.



**Gráfico 3.5** Calor acumulado durante de la hidratación

En el gráfico 3.5 se aprecian las curvas de calor acumulado para 0.45 de relación agua-cemento. Se observa un comportamiento similar al que presentan las muestras con relación agua-cemento 0.40 (Ver anexo I-III) A partir de las diez horas los valores todas las muestras, excepto PA 45 (Cemento Portland, Ra/c 0.45, con aditivo), que se encuentra bajo el efecto del aditivo SikaPlast, comienzan a decrecer y a partir de las 60 horas tienden a estabilizarse. En la muestra LC2-45 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.45, sin aditivo) se observa que tiene menor desprendimiento de calor en la etapa de formación de los silicatos (C-S-H), comienza este proceso dos horas después que la muestra P 45 (Cemento Portland, Ra/c 0.45, sin aditivo).



**Gráfico 3.6** Calor total acumulado durante de la hidratación

En el gráfico 3.6 se observa la variación del calor total acumulado (J/g cemento) para una relación agua-cemento 0.45. Las muestras se comportan de forma similar a las muestras con relación agua-cemento 0,40 y de igual forma se demuestra que las pastas de cemento con adición mineral LC<sup>2</sup> liberan menor calor en el proceso de hidratación que las pastas con cemento Portland.

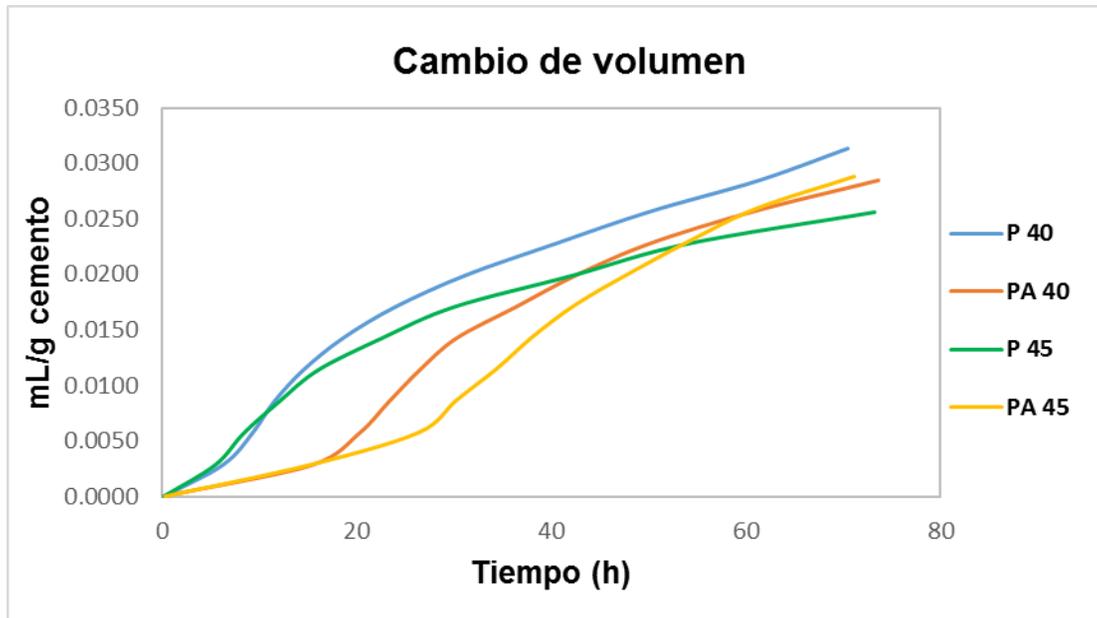
Se puede afirmar, que la variación de la relación agua-cemento no tiene gran influencia en la cinética de hidratación de las pastas con LC<sup>2</sup>, aunque los valores de calor disminuyen con el incremento de la cantidad de agua, lo que favorece la completa formación de los componentes de la pasta.

### **3.3 Influencia de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en la contracción química de pastas de cemento**

Los cambios de volumen que se producen en una pasta de cemento están asociados a la formación de la ettringita, producto de la reacción de los aluminatos durante la hidratación. En este estudio se pretende analizar la influencia de la adición mineral LC<sup>2</sup> en la contracción química de pastas de cemento.

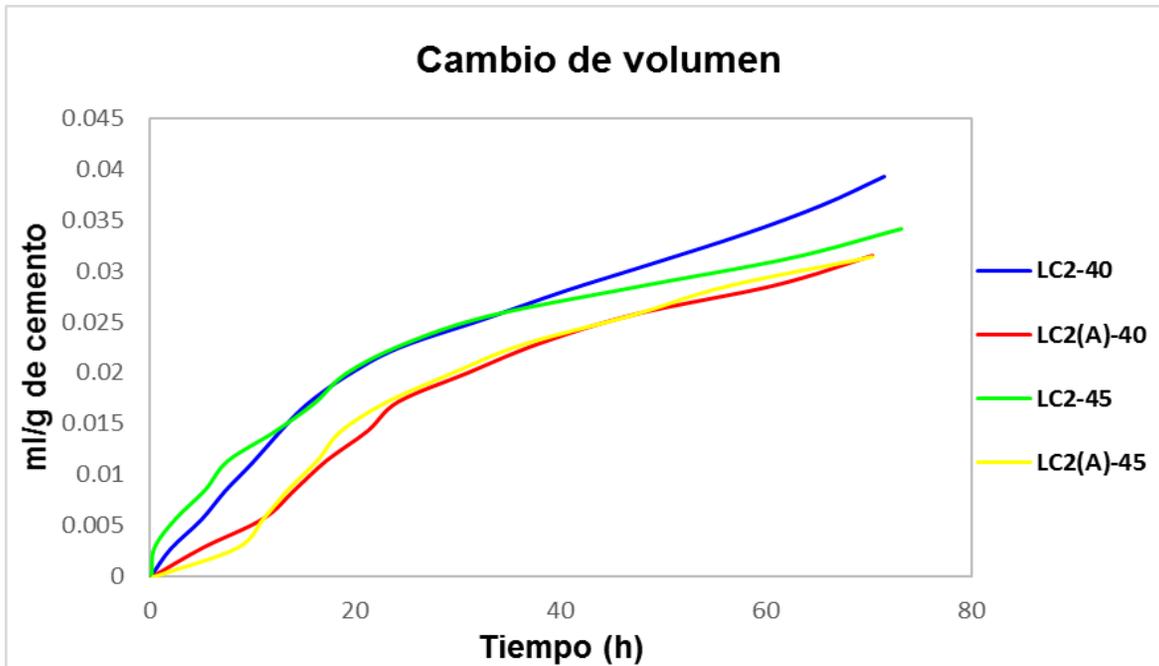
### **3.3.1 Efecto del aditivo SikaPlast en la contracción química de pastas de cemento Portland**

En los gráficos 3.7 y 3.8 se muestra la evolución de la variación de volumen contra el tiempo de hidratación de las pastas de cemento P 35, con y sin aditivo (Muestras patrón) y las pasta con cemento P 35 y 30% de adición mineral LC<sup>2</sup>, con y sin aditivo.



**Gráfico 3.7** Cambios de volumen. Muestras con P 35

Se puede apreciar, en el gráfico 3.7 el efecto retardador del aditivo SikaPlast en las muestras PA 40 (Cemento Portland, Ra/c 0.40, con aditivo) y PA 45 (Cemento Portland, Ra/c 0.45, con aditivo) durante las primeras 20 horas aproximadamente, luego hay un cambio de pendiente en estas dos curvas y el volumen de la pasta tiende a variar 0.010 ml/g entre las 20 y 30 horas. Las muestras con aditivo SikaPlast tienen menores valores de contracción, que disminuyen con respecto a la muestra patrón en un 15 por ciento a los tres días, pero en las primeras 24 horas disminuye un 40 por ciento.

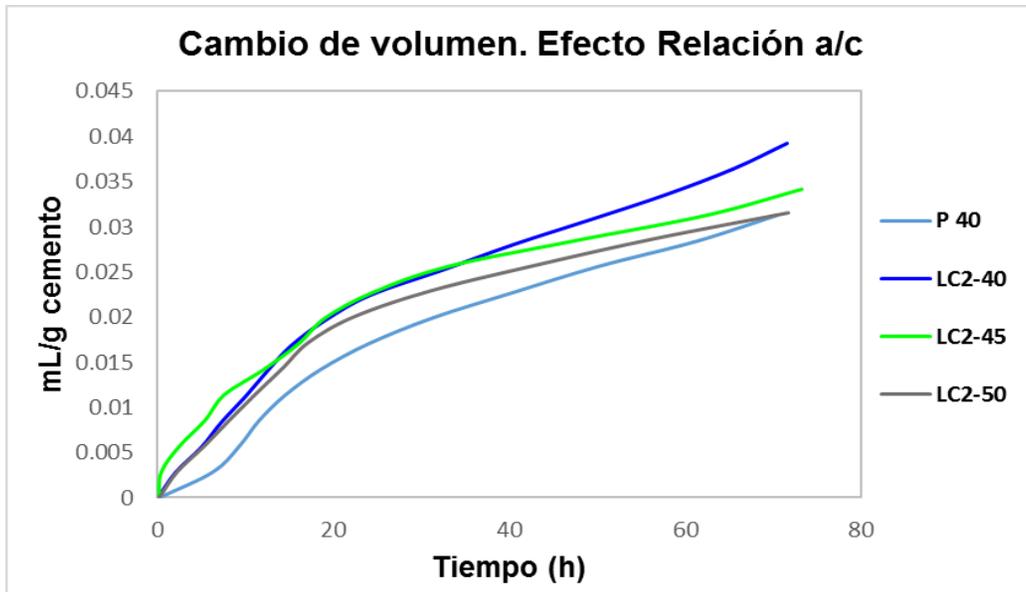


**Gráfico 3.8** Cambios de volumen. Muestras con LC<sup>2</sup>

En las muestras LC2(A)-40 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.40, con aditivo) y LC2(A)-45 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.45, con aditivo) (Ver anexo VI) el efecto del aditivo se evidencia en las primeras 10 horas. Las curvas tienen un comportamiento similar a las muestras que no poseen aditivo, con la diferencia que en estas últimas se produce un aumento de variación de volumen en 0.005 ml/g. Se demuestra así que el aditivo posee una pequeña influencia sobre la contracción química de las pastas, las cuales disminuyen los cambios de volumen en un 40 por ciento.

### **3.3.2 Efecto de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> al 30% y de la relación agua-cemento en la contracción química de pastas de cemento**

Se realiza un análisis de la variación de volumen que se produce en las muestras con adición mineral LC<sup>2</sup>, con respecto a las muestras patrones, para distintas relaciones agua-cemento.



**Gráfico 3.9** Efecto de la variación de la relación agua-cemento en los cambios de volumen

En el gráfico 3.9 se observa la influencia de la adición mineral LC<sup>2</sup> y de la variación de la relación agua-cemento en la contracción química de las pastas de cemento. Cuando se compara las pastas con adición mineral LC<sup>2</sup>, con la muestra patrón P 40 (Cemento Portland, Ra/c 0.40, sin aditivo) se aprecia un aumento, de 0.005 ml/g cemento, en la contracción durante las primeras 72 horas. Respecto a la variación agua-cemento, las muestras con adición LC<sup>2</sup> con menor contenido de agua presentan mayor variación de volumen en función del tiempo.

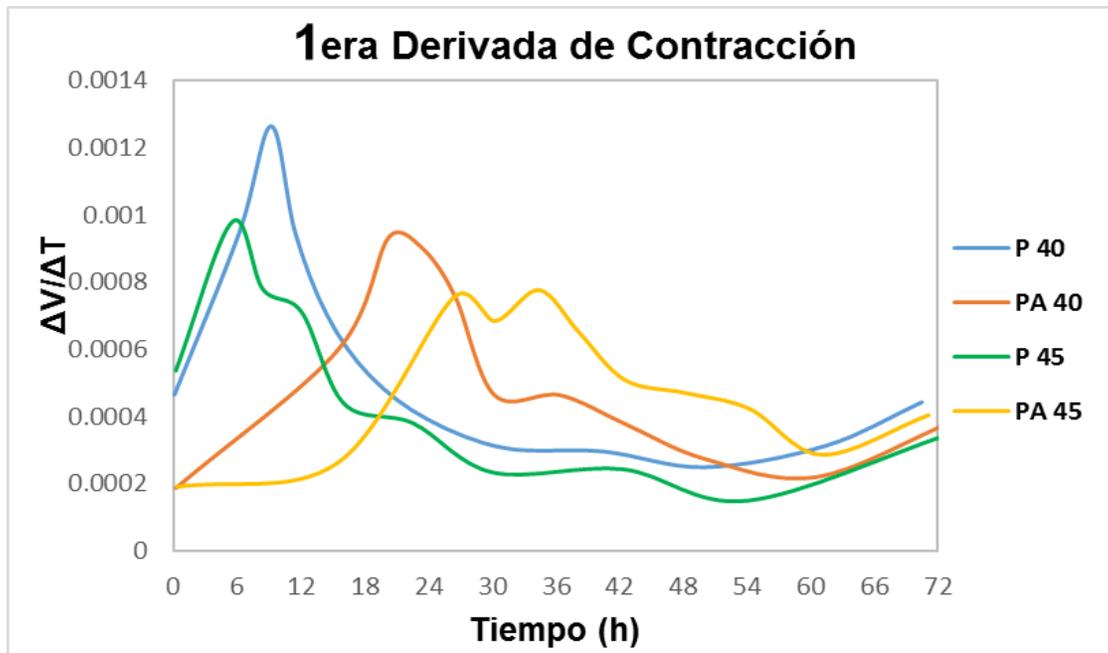
Se observa que las muestras LC2-40 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.40, sin aditivo) y LC2-50 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.50, sin aditivo) son las de mejor comportamiento, aunque la muestra LC2-45 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.45, sin aditivo) en las primeras 8 horas tiene variaciones en las deformaciones con respecto a las otras muestras. Luego de las 30 horas se estabilizan las muestras, donde la LC2-50 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.50, sin aditivo) es la de menores valores de contracción química y semejante a la muestra P 40 (Cemento Portland, Ra/c 0.40, sin aditivo)

### **3.3.3 Relación entre calor liberado y cambios de volumen en pasta de cemento con adición mineral activa LC<sup>2</sup>**

Los resultados del ensayo de contracción pueden correlacionarse con las curvas obtenidas en los ensayos de calorimetría (Ver anexo VIII-IX) Por esta razón se halla

### Capítulo III: Influencia de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones

la primera derivada de las variaciones de volumen y se obtiene un gráfico similar al de calorimetría. No necesariamente tienen que coincidir los mayores valores de cambio de volumen con los mayores valores de liberación de calor. Los mayores valores de liberación de calor se deben a la formación de los silicatos de calcio (C-S-H) que ocupan entre el 50 y el 60 por ciento del volumen en la pasta hidratada. Por otro lado, los mayores valores de cambios de volumen se deben a la formación de la ettringita, fase que requiere especial atención debido a que puede provocar expansiones en la pasta.



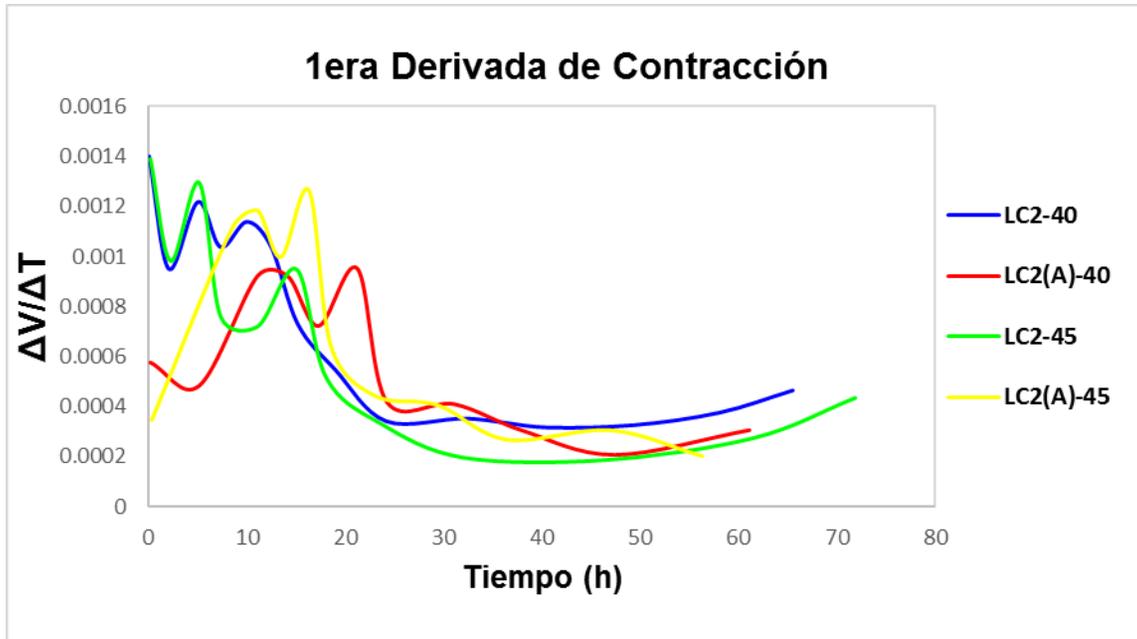
**Gráfico 3.10** Primera derivada de la variación de volumen. Muestra con P 35

En el gráfico 3.10 aparecen las curvas de la Primera derivada de la variación de volumen con respecto al tiempo. Se puede apreciar que para las muestras P 40 (Cemento Portland, Ra/c 0.40, sin aditivo) y P 45 (Cemento Portland, Ra/c 0.45, sin aditivo) el máximo de la curva se alcanza entre las seis y las diez horas, con un mayor valor para P 40 (Cemento Portland, Ra/c 0.40, sin aditivo) de 0.01264  $\Delta V/\Delta T$ , esto coincide en el gráfico 3.1 con la formación de la fase trisulfoaluminato hidratado (ettringita  $C_6AS_3H_{32}$ ), producto de la hidratación del cemento.

Se observa en el gráfico como la muestra P 45 (Cemento Portland, Ra/c 0.45, con aditivo) es la que tiene más definidas las etapas de hidratación ya que al tener mayor

### Capítulo III: Influencia de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones

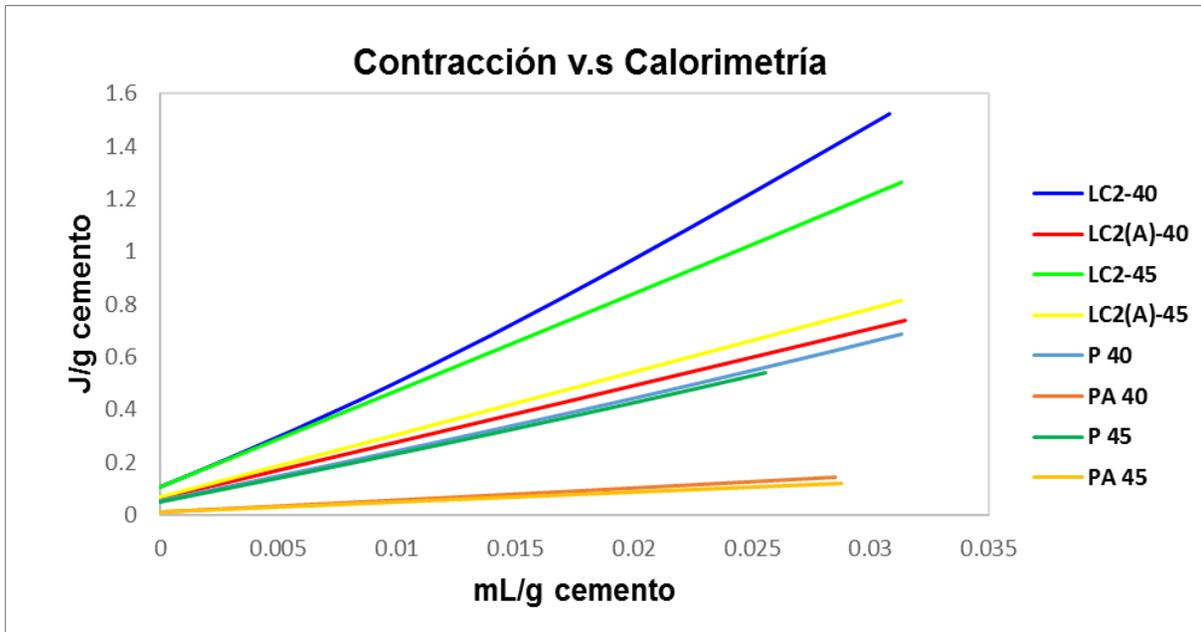
cantidad de agua se forman todos los componentes de la pasta. El aditivo, como se observa, retarda el proceso entre seis y diez horas como se refleja en el ensayo de calorimetría.



**Gráfico 3.11** Primera derivada de la variación de volumen. Muestra con LC<sup>2</sup>

En las muestras LC2-40 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.40, sin aditivo) y LC2-45 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.45, sin aditivo) se observa la formación de los silicatos a las seis horas, mientras que las muestras LC2(A)-40 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.40, con aditivo) y LC2(A)-45 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.45, con aditivo) entre las seis y las diez horas, lo que coincide con los resultados de calorimetría. Se puede observar la reacción de los aluminatos en la tercera etapa de la hidratación en las muestras con aditivo, las cuales liberan mayor calor que las muestras sin aditivos.

Si se tiene en cuenta las variaciones de volumen con respecto al tiempo, la muestra LC2(A)-40 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.40, con aditivo), es la que mejor comportamiento presenta. Esta muestra se define con menor calor liberado durante el proceso de hidratación y con mejor formación de los componentes de la pasta de cemento hidratada.



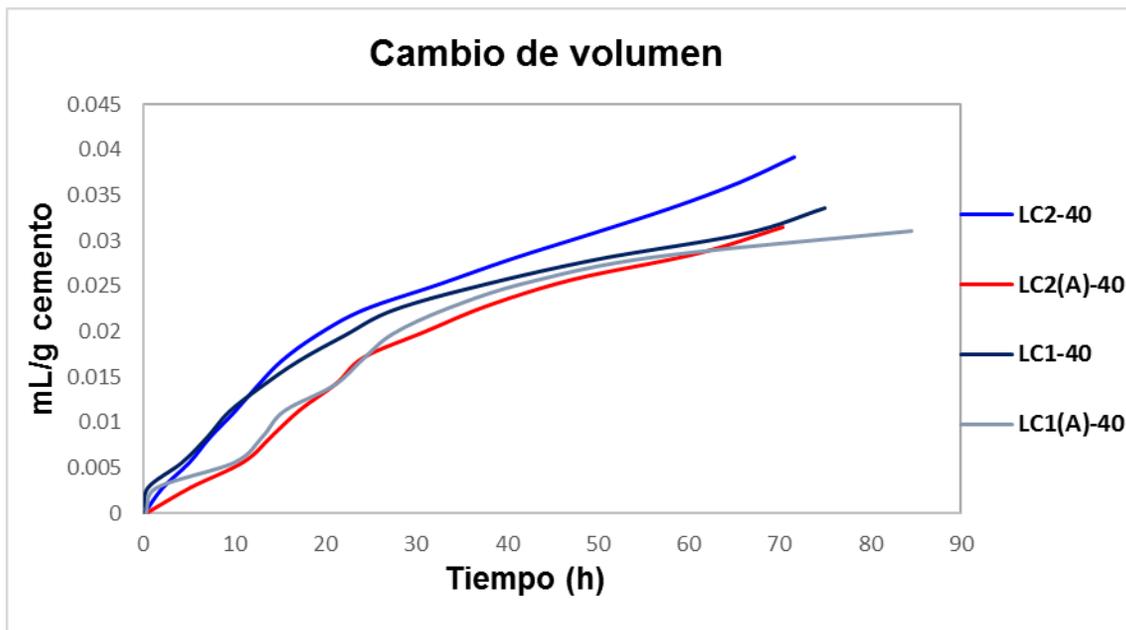
**Gráfico 3.12** Comparación valores de contracción contra calorimetría

En los gráficos 3.12 referente a la comparación entre los valores de contracción (ml/g cemento) y los de calorimetría (J/g cemento) para las muestras con P 35 y las muestras con 30% de adición de LC<sup>2</sup> al cemento Portland, se puede apreciar que existe una correlación lineal entre los valores obtenidos por ambos métodos, por lo cual es factible emplearlos en el análisis de los procesos de hidratación de las pastas de cemento.

Se observa que las muestras con aditivo SikaPlast, al variar su volumen durante los tres días, desprenden más calor en el proceso de hidratación que las muestras sin aditivo. Para el caso de las muestras con LC<sup>2</sup>, la de mejor relación entre los cambios de volumen y la liberación de calor en el proceso de formación de los componentes, la presenta la muestra LC2(A)-40 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.40, con aditivo).

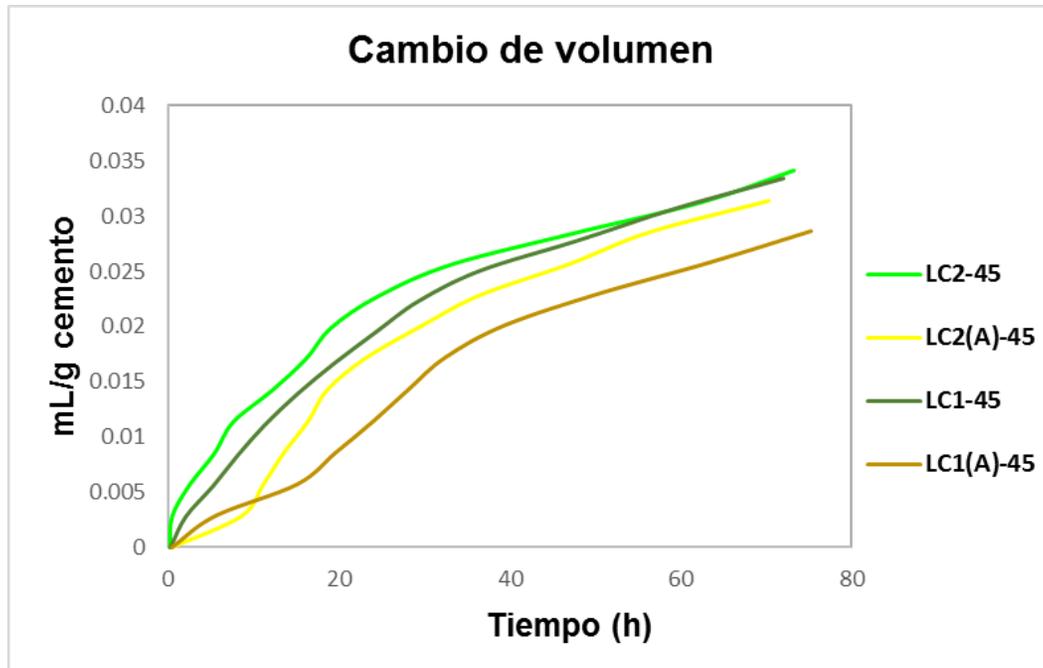
### **3.3.4 Efecto de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> al 15% en la contracción química de las pastas de cemento**

Se evalúa la influencia en la contracción química, de reducir el porcentaje de sustitución, de adición mineral LC<sup>2</sup> al cemento Portland, de un 30 a un 15%. Se elaboran seis muestras en total, con y sin aditivo SikaPlast, y se varía la relación agua-cemento (0.40-0.45-0.50) (Ver anexo VII)



**Gráfico 3.13** Cambio de volumen. Relación a/c 0.40

En el gráfico 3.13 se observa que la muestra LC1-40 (15% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.40, sin aditivo) reduce los valores de contracción química en un 15 por ciento aproximadamente, con respecto a LC2-40 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.40, sin aditivo). La muestra LC1(A)-40 (15% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.40, con aditivo) es la que mejor comportamiento presenta, después de las 60 horas comienza a estabilizarse y muestra los menores valores de contracción química. Con respecto a LC1 (15% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.40, sin aditivo) la muestra LC1(A)-40 (15% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.40, con aditivo) disminuye en un 8 por ciento los valores de contracción química. Se puede afirmar que al adicionar solamente un 15 % de LC<sup>2</sup> al cemento Portland mejora al comportamiento de la pasta respecto a los cambios de volumen que sufre durante su hidratación.



**Gráfico 3.14** Cambios de volumen. Ra/c 0.45

En el gráfico 3.14 se comparan los valores de contracción química entre las muestras que poseen 15% de adición mineral LC<sup>2</sup> (LC1-45 y LC1(A)-45) y las que tienen 30% de LC<sup>2</sup> (LC2-45 y LC2(A)-45). Como se aprecia la muestra LC1(A)-45 (15% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.45, con aditivo) es la que menores valores de contracción química presenta, con respecto a LC2 (A)-45 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.45, con aditivo) disminuyen un 8.5 por ciento y con relación a LC2-45 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.45, con aditivo) un 19 por ciento. Esto demuestra que la sustitución al cemento Portland por un 15% de adición mineral LC<sup>2</sup>, con el uso del aditivo SikaPlast, mejora el comportamiento de la pasta en cuanto a los cambios de volumen que sufre durante su hidratación.

### **3.4 Influencia de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en hormigones fluidos**

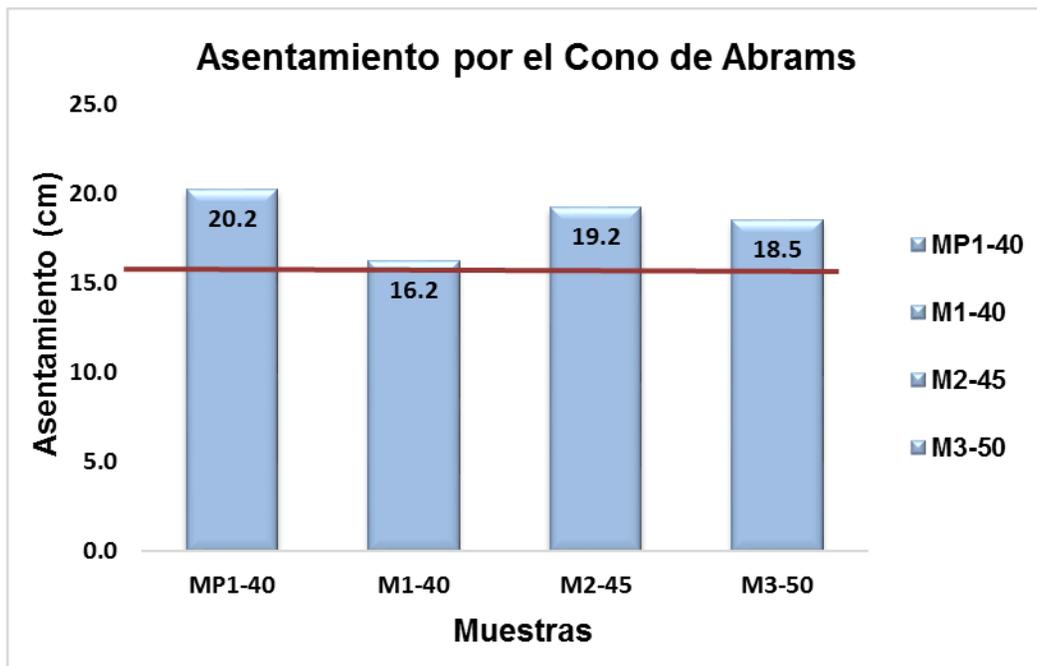
En estudios anteriores se demuestra que los cemento con adiciones minerales pueden mejorar y/o mantener las propiedades físico-mecánicas de los hormigones. En un cemento con adición puzolánica, el hidróxido de calcio, producto de la reacción con los silicatos se combina con el material puzolánico produciendo más gel de tobermorita, principal responsable del endurecimiento y de la ganancia de

### Capítulo III: Influencia de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones

resistencias mecánica. Por ello es necesario analizar las características que alcanza un hormigón fabricado con cemento y adición mineral LC<sup>2</sup> al 30% de sustitución.

#### **3.4.1 Efecto de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en el asentamiento**

Se realiza un análisis del asentamiento en hormigones fluidos con 30% de adición mineral LC<sup>2</sup> y 1% de aditivo SikaPlast. Se comparan las muestras M1-40 (LC2 30%, Ra/c=0.40), M2-45 (LC2 30%, Ra/c=0.45), M3-50 (LC2 30%, Ra/c=0.50) con respecto a MP1-40 (P 35, Ra/c= 0.40)

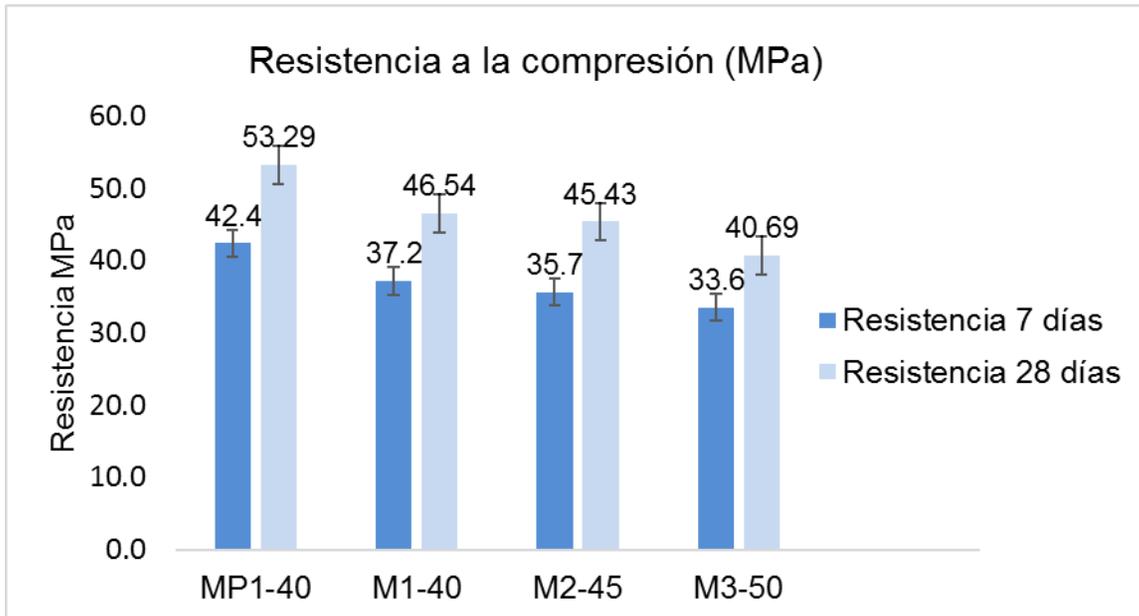


**Gráfico 3.15** Asentamiento por el cono de Abrams

En el gráfico 3.14 se presentan los valores de asentamiento por el Cono de Abrams. Como se observa, todas las muestras cumplen con el asentamiento mínimo de 16 cm establecido en la norma (NC.ISO1920-2, 2010). La mezcla M1-40 (LC2 30%, Ra/c=0.40) es la que menor valor presenta con 16.2 cm. La mezcla M2-45 (LC2 30%, Ra/c=0.45) con un valor de 19.2 cm es la que más se acerca a MP1-40 (P 35, Ra/c= 0.40) con 20.2 cm de asentamiento. Se puede afirmar que los hormigones con adición mineral al 30% de sustitución, cumplen con lo establecido en la norma.

### 3.4.2 Efecto de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en la resistencia a compresión

En la investigación se evalúa el efecto de la adición mineral LC<sup>2</sup> en la resistencia de muestras de hormigón. Se realiza una dosificación sin la presencia de granito y con 1% de aditivo SikaPlast.



**Gráfico 3.16** Resistencia a la compresión (7 y 28 días)

En el gráfico 3.15 se observa que todas las muestras alcanzan más de 35 MPa a los 7 días, excepto M3-50 (LC2 30%, Ra/c=0.50) que posee un valor de 33.2 MPa. Se puede apreciar que al aumentar el contenido de agua en la mezcla la resistencia mecánica disminuye 2 MPa aproximadamente, lo que representa un 6 por ciento. Al aumentar la relación agua-cemento en una dosificación de hormigón, aumentan la cantidad de poros interconectados, lo que provoca la disminución de resistencia. La muestra con LC<sup>2</sup> que mayor resistencia alcanza tanto a los 7 como a los 28 días es M1-40 (LC2 30%, Ra/c=0.40).

### 3.5 Conclusiones Parciales

- La muestra LC2(A)-40 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.40, con aditivo), es la que mejor comportamiento presenta ya que libera menor cantidad de calor, durante el proceso de hidratación, lo que le permite una mejor formación de los componentes de la pasta de cemento.

### **Capítulo III: Influencia de la adición mineral activa LC<sup>2</sup> en pastas y hormigones**

- Cuando se correlaciona los ensayos de calorimetría y contracción, dentro de las muestras con LC<sup>2</sup>, la de mejor relación entre los cambios de volumen y la liberación de calor en el proceso de formación de los componentes, la presenta LC2(A)-40 (30% LC<sup>2</sup>, Ra/c 0.40, con aditivo).
- El uso del aditivo SikaPlast, mejora el comportamiento de la pasta en cuanto a los cambios de volumen que sufre durante su hidratación.
- Las muestras con LC<sup>2</sup> al 15% son las que mejor resultados de resistencia alcanzan para hormigones fluidos, debido a que la adición mineral al cemento produce más gel de tobermorita y densifica la microestructura de la pasta.

## CONCLUSIONES GENERALES

- En las reacciones entre el LC<sup>2</sup>, como adición mineral activa, con el cemento Portland, la interacción que ocurre entre la alúmina del metakaolín y los carbonatos de la caliza hacen que se consuma gran cantidad del hidróxido de calcio, lo que brinda mayor estabilidad química a las mezclas en comparación con las de cemento Portland.
- El LC<sup>2</sup> como adición mineral activa presenta menor variación de volumen y liberación de calor en el proceso de hidratación, para una determinada masa de pasta, donde la mejor sustitución es el 15% del peso del cemento y con una relación agua-cemento de 0.40
- La adición arcilla+caliza+yeso denominada LC<sup>2</sup> se puede utilizar como una medida de mitigación de las fisuras producidas por la retracción, ya que estos cambios de volumen se producen en la pasta de cemento y la sustitución, tanto del 30% como del 15%, se logra disminuir este fenómeno.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar ensayos de Porosimetría por intrusión de mercurio (MIP) por sus siglas en inglés, para hacer un estudio de la porosidad en las pastas de cemento con la adición mineral activa LC<sup>2</sup>.
- Hacer ensayos de contracción química con otras sustituciones, incluyendo 10% y 20% y con otras relaciones agua-cemento entre 0.40 y 0.45, para definir con claridad cuál es la muestra más adecuada para la implementación del LC<sup>2</sup>.
- Aplicar los mismos ensayos de esta investigación en arcillas provenientes de otros yacimientos, para evaluar la reacción puzolánica de estas en la hidratación de la pasta de cemento.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALMENARES, R. S. 2017. *Potencialidades de las arcillas caoliníticas cubanas para la obtención de MCS*. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
- ALUJAS, A. 2010. *Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente*. Tesis de Doctorado, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
- ARTEGA, J. C. 2009. *Comportamiento mecánico y caracterización de morteros elaborados con cemento portland ultrafinos*.
- BAKOLAS, A. A. M., A 2004. Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis. *Science and direct*.
- BANFILL, P. F. G. 2011. Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures. *Constructio and building materials*.
- BLANCO, F. 2015. Hidratación del cemento portland.
- CARRASCO, M. F. 2014. Materiales cementicios. Cátedra de Tecnología del Hormigón, Universidad Tecnológica Nacional, Santa Fe, Argentina.
- CASTILLO, R. 2010. *Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica de una arcilla caolinítica de baja pureza*. Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas.
- CIDEM 2018. Reporte Final.
- CRUZ, J. 2001. *Activación mecánica de arcillas*. Universidad autónoma de Nuevo León.
- CYR, M., P. LAWRENCE, AND E. RINGOT 2006. Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. *Cement and Concrete Research*.
- DAY, R. L. 1990. *Pozzolans for use in low-cost housing. A state of the art report*. Universidad de Calgary, Ottawa, Canadá.
- FERNÁNDEZ, L. 2013. *Obtención de cementos ternarios con altos niveles de sustitución del clínker a partir de la utilización de fuentes de materias primas nacionales.*, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- FERNÁNDEZ, L. R. 2009. *Calcined Clays Soils as a Potential Replacement for Cement in Developing Countries*. École Polytechnique Federale de Lausanne.
- FRAGOSO, A. D. 2017. *Formulación de cementos de bajo carbono con sustituciones del 60 y 75 por ciento de clínker por adiciones de caliza- arcilla calcinada en la planta de cemento de Siguaney*. Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- FRIAS, M. A. C., J. 2001. Influence of MK on the reaction kinetics in MK/lime and MKblended cement systems at 20[degree sign]C. *Cement and Concrete Research*, 519-527.
- HANNA, G. B. A. M., M.S. 1997. *Microstructure and hydration characteristics of artificial pozzolana-cement pastes containing burnt kaolinite clay* [Online].
- JUENGER, M. A. S., R. 2015. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*.
- MARTÍNEZ, A. 2017. *Influencia del tipo de cemento en la cinética de hidratación.*, Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- MARTÍNEZ, B. 2015. *Fisuración originada por cambios de volumen en estructuras de hormigón hidráulico*. Universidad de Matanzas.
- MARTIRENA, J. F. 2003. *Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa*. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
- MARTIRENA, J. F. 2012. Activación de Arcillas de Bajo Grado para la Producción y Uso de

- Puzolanas como Sustitutos de Clinquer en Sistemas Cementicios Ternarios ClínquerMetakaolín-Carbonato.
- MARTIRENA, J. F. 2013. Nota para la prensa. Molienda de cemento de bajo carbono.
- MASSAZZA, F. 1976. Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements. *ILCemento*, 3–38.
- MEJÍA, S. 2016. Anexo A. Hidratación del cemento Portland.
- MONTEAGUDO, S. 2014. *Estudio microestructural y de los procesos de hidratación del cemento con adiciones*. Universidad Politécnica de Madrid.
- MORALES, G. 2010. Influencia del empleo de sulfato de sodio como activador químico en morteros de cemento con adiciones cal-puzolana. Tesis de Diploma, Universidad Central “Marta Abreu” De Las Villas.
- MUNIZAGA, G. A. 2009. *Fisuración por retracción en hormigones: Influencia del tipo de cemento.*, Universidad de Chile.
- NC.ISO1920-2 2010. Ensayos al hormigón-Parte 2: Propiedades en estado fresco.
- NC.ISO1920-3 2010. Ensayos al hormigón. Parte 3. Elaboración y curado de probetas para ensayos.
- NC:95 2011. Cemento Portland. Especificaciones.
- NC:120 2014. Hormigón Hidráulico. Especificaciones.
- NC:251 2013. Aridos para Hormigones Hidráulicos – Requisitos. .
- NC:504 2013. Cemento. Estabilidad de volumen.
- NC:525 2014. Cemento hidráulico. Métodos de ensayos. Determinación del calor de hidratación.
- NC:526 2012. Cemento hidráulico. Términos y definiciones.
- NC:528 2013. Cemento hidráulico. Puzolanas. Especificaciones.
- NC:724 2015. Ensayos de hormigón. Resistencia del hormigón en estado endurecido.
- PANE, I. A. H. W. 2005. Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis. *Cement and Concrete Research*.
- PAPADAKIS, V. G. A. T., S. 2002. Supplementary cementing materials in concrete Part I : efficiency and design. *Cement and Concrete Research*.
- SCRIVENER, K. A. L., B. 2011. Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*.
- SILVA, O. J. 2017. *¿Cómo se produce el proceso de hidratación del cemento?* [Online].
- SNELLINGS, R. 2011. *Mineralogical study of the pozzolanic properties of natural zeolites*. Katholieke Universiteit Leuven.
- SOUTH, W. A. H., I. 2001. *New Zeland Pozzolans-An ancient to a modern dilemma*, en: V.M. Malhotra.
- SOUZA, P. S. L. A. D. C. C. D. M. 2005. Viability of using calcined clays, from industrial by-products, as pozzolans of high reactivity. *Cement and Concrete Research*.
- TAYLOR, H. F. W. 1990. *Cement Chemistry*.
- TIRONI, A. A. T., M.A. 2013. Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays. *Cement & Concrete Composites*.
- TORRES, C. 2017. Tema 8: Hormigón.
- TOVAR, G. 2017. Lección 10 Cementos, Materiales de adición.
- VEIGA, J. 2018. Informe de ensayo de áridos. Laboratorio de materiales, Facultad de Contruccionen.
- VILLARINO, A. 2015. Tema 5: El cemento.
- VIZCAÍNO, L. M. 2015. *Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer – arcilla calcinada – caliza* Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- ZHANG, Y. M., W. SUN, AND H.D. YAN 2000. Hydration of high-volume fly ash cement pastes. *Cement and Concrete Composites*.

## ANEXOS

### Anexo I Determinación del calor de hidratación de las muestras con P 35

Calor acumulado (mW/g cemento)				
Time	P 4	PA 4	P 45	PA 45
0	0.01066	0.00908	0.01936	0.02226
1	1.09353	0.39767	0.91923	0.44328
2	2.13249	0.21679	1.89576	0.25446
3	3.24176	0.24375	2.88128	0.18747
4	4.17819	0.19029	3.78878	0.1502
5	4.59965	0.15625	4.29097	0.12853
6	4.50885	0.12308	4.31774	0.11313
7	4.12685	0.10724	4.01945	0.10208
8	3.64761	0.10228	3.58655	0.09348
9	3.21186	0.09805	3.12077	0.08841
10	3.02736	0.095	2.82815	0.08481
11	2.77509	0.09395	2.60193	0.08286
12	2.53939	0.0938	2.3741	0.08255
13	2.34025	0.09406	2.19889	0.08144
14	2.15887	0.09565	2.0723	0.07974
15	1.97749	0.10189	1.97373	0.08041
16	1.79248	0.11069	1.87661	0.08126
17	1.61757	0.12943	1.76032	0.08275
18	1.46824	0.16617	1.62024	0.08595
19	1.34331	0.23745	1.46804	0.09334
20	1.23812	0.37234	1.32516	0.10421
21	1.14789	0.63743	1.20074	0.12687
22	1.07714	1.13175	1.10353	0.16659
23	1.01407	1.89428	1.02138	0.24158
24	0.95757	2.77217	0.95308	0.38299
25	0.90735	3.52412	0.89444	0.62155
26	0.86308	4.11343	0.84422	0.96152
27	0.82421	4.56182	0.79955	1.35936
28	0.7872	4.66924	0.76128	1.79146
29	0.75451	4.25878	0.72781	2.22171
30	0.72562	3.66273	0.6966	2.51435
31	0.70057	3.09798	0.66925	2.66002
32	0.6751	2.59354	0.64546	2.71606
33	0.65457	2.17135	0.62373	2.73081

34	0.63449	1.83691	0.60355	2.69825
35	0.61501	1.57483	0.58549	2.62187
36	0.59632	1.37811	0.56826	2.52526
37	0.57855	1.2348	0.55269	2.41962
38	0.56138	1.13246	0.53741	2.30944
39	0.54503	1.06443	0.524	2.19208
40	0.52823	1.02193	0.51106	2.06858
41	0.51154	0.99853	0.49772	1.93573
42	0.49464	0.98986	0.48493	1.79142
43	0.4781	0.98559	0.47214	1.63556
44	0.46182	0.98164	0.46177	1.46955
45	0.44524	0.97393	0.44929	1.30863
46	0.42907	0.95863	0.43841	1.17153
47	0.4129	0.93531	0.42718	1.06324
48	0.39724	0.90454	0.4159	0.9843
49	0.38276	0.86772	0.40486	0.92916
50	0.36872	0.82665	0.39395	0.89181
51	0.35523	0.78353	0.38365	0.86547
52	0.34219	0.7365	0.37444	0.84444
53	0.32759	0.69093	0.36347	0.83192
54	0.31565	0.64828	0.35302	0.82116
55	0.30418	0.60551	0.34303	0.80873
56	0.29301	0.56739	0.33273	0.79659
57	0.28205	0.53071	0.32414	0.78166
58	0.2736	0.497	0.31595	0.76388
59	0.26353	0.46597	0.30754	0.7424
60	0.25357	0.43615	0.29829	0.71836
61	0.24574	0.41068	0.28941	0.69195
62	0.23681	0.38616	0.28163	0.66406
63	0.23097	0.36346	0.27448	0.63482
64	0.22273	0.34232	0.26709	0.60516
65	0.21615	0.3236	0.26071	0.57538
67	0.20248	0.2899	0.24715	0.51873
68	0.1977	0.27596	0.24011	0.49328
69	0.19076	0.26266	0.23381	0.46791
70	0.18627	0.25035	0.22869	0.44375
71	0.18087	0.23834	0.22196	0.42172
72	0.17584	0.2273	0.21628	0.40236

## Anexo II Calor total acumulado por las muestras con P 35

Calor total acumulado (J/g cemento)				
Time	P 40	PA 40	P 45	PA 45
0	0.0534	0.0128	0.0511	0.0112
1	5.0736	0.9151	4.8544	0.6114
2	13.903	1.724	13.104	1.1086
3	26.648	2.3478	24.889	1.5393
4	42.261	2.8572	39.41	1.9241
5	58.816	3.2682	55.019	2.2753
6	74.684	3.6454	70.185	2.6025
7	89.047	4.006	84.036	2.9135
8	101.67	4.3547	96.259	3.215
9	113.07	4.6953	106.96	3.5121
10	123.71	5.0318	116.82	3.8073
11	133.44	5.3695	125.85	4.0987
12	142.36	5.711	134.12	4.3883
13	150.6	6.0646	141.84	4.6796
14	158.18	6.4439	149.15	4.9747
15	165.11	6.8695	156.12	5.2778
16	171.37	7.3866	162.71	5.5982
17	177.03	8.0834	168.85	5.9522
18	182.18	9.1252	174.45	6.3655
19	186.9	10.837	179.53	6.8866
20	191.26	13.837	184.11	7.6101
21	195.32	19.058	188.28	8.7134
22	199.13	27.276	192.13	10.495
23	202.72	38.517	195.7	13.33
24	206.12	52.167	199.04	17.51
25	209.34	67.746	202.19	23.181
26	212.4	84.49	205.16	30.438
27	215.33	100.77	207.98	39.024
28	218.13	115.15	210.67	48.378
29	220.81	127.42	213.24	58.074
30	223.4	137.75	215.71	67.89
31	225.89	146.39	218.08	77.678
32	228.3	153.65	220.37	87.262
33	230.64	159.83	222.59	96.527
34	232.9	165.17	224.74	105.43

35	235.1	169.89	226.82	113.94
36	237.23	174.16	228.84	122.04
37	239.29	178.12	230.81	129.71
38	241.29	181.88	232.72	136.91
39	243.23	185.52	234.59	143.62
40	245.12	189.1	236.41	149.79
41	246.94	192.65	238.18	155.38
42	248.7	196.19	239.91	160.37
43	250.4	199.72	241.6	164.82
44	252.04	203.2	243.24	168.83
45	253.63	206.62	244.84	172.51
46	255.16	209.94	246.4	175.94
47	256.63	213.14	247.92	179.22
48	258.04	216.2	249.41	182.37
49	259.41	219.11	250.85	185.45
50	260.72	221.86	252.25	188.47
51	261.98	224.44	253.62	191.44
52	263.2	226.85	254.95	194.37
53	264.37	229.12	256.24	197.26
54	265.49	231.24	257.5	200.11
55	266.57	233.22	258.72	202.89
56	267.62	235.08	259.9	205.6
57	268.62	236.82	261.06	208.23
58	269.6	238.44	262.18	210.77
59	270.53	239.97	263.28	213.21
60	271.44	241.41	264.34	215.55
61	272.31	242.76	265.37	217.78
62	273.16	244.04	266.38	219.9
63	273.98	245.24	267.35	221.92
64	274.77	246.38	268.31	223.83
65	275.55	247.45	269.23	225.65
66	276.29	248.47	270.14	227.38
67	277.02	249.45	271.02	229.02
68	277.72	250.37	271.87	230.58
69	278.4	251.25	272.7	232.06
70	279.07	252.09	273.52	233.47
71	279.71	252.89	274.31	234.8
72	280.34	253.66	275.08	236.08

Anexo III Determinación del calor de hidratación de las muestras con P 35 y 30% de LC<sup>2</sup>

Calor acumulado (mW/g cemento)						
Time	LC2-40	LC2(A)-40	LC2-45	LC2(A)-45	LC2-50	LC2(A)-50
0	-0.001908	0.0025571	0.020679	0.0162328	0.0044793	-0.002876
1	1.8232628	1.2146368	1.780522	1.3167085	1.7184815	1.279533
2	3.0033289	1.0415911	2.848869	1.1823766	2.5646294	1.1169
3	4.1021821	2.0682483	3.903401	2.4486953	3.8006041	2.2382
4	4.1988325	3.2904724	4.025075	3.6348803	4.0687685	3.331373
5	3.8796647	3.9822606	3.739501	4.1841365	3.8552366	3.864073
6	3.5581752	4.0713575	3.420542	4.1347626	3.5368573	3.853743
7	3.7844314	3.8436114	3.607998	3.8664245	3.6477276	3.627251
8	3.9460279	4.0802566	3.893767	4.2309511	3.975997	3.862226
9	3.2648773	4.1222158	3.471685	4.2130815	3.7428684	4.271334
10	2.3523297	3.3878913	2.496318	3.2881302	2.6907858	3.528599
11	1.8427406	2.6352067	1.882823	2.5131933	1.974203	2.48215
12	1.5835742	2.1712102	1.584164	2.0921263	1.5912551	1.968016
13	1.4182087	1.8756277	1.4175	1.8224387	1.3927801	1.712335
14	1.296985	1.6669097	1.300038	1.6339087	1.2709497	1.54847
15	1.2000331	1.5078048	1.20979	1.4935427	1.1815871	1.430113
16	1.1220465	1.3815019	1.13418	1.3804774	1.1059972	1.335695
17	1.0569496	1.2806813	1.068519	1.2858711	1.0410923	1.256194
18	0.9961643	1.1973702	1.010609	1.2071023	0.9825312	1.186178
19	0.9433993	1.1264055	0.959675	1.136741	0.9305125	1.121749
20	0.8952928	1.0624416	0.912206	1.0744922	0.8821473	1.065911
21	0.8524325	1.0076501	0.869248	1.0163231	0.8379856	1.012229
22	0.8135673	0.957293	0.831518	0.9658633	0.7994341	0.962087
23	0.7781394	0.9095174	0.797313	0.9193901	0.7643677	0.917072
24	0.7458171	0.8673	0.770382	0.8770739	0.7332451	0.876136
25	0.7156959	0.8272391	0.738671	0.8386978	0.7073352	0.83908
26	0.6909114	0.7922199	0.71422	0.8026175	0.6771451	0.803795
27	0.6486542	0.7587345	0.681972	0.7698256	0.6551331	0.770819
28	0.6333373	0.7232294	0.659716	0.7369096	0.637768	0.741753
29	0.605402	0.6952566	0.64091	0.7080887	0.6190578	0.715458
30	0.5842055	0.6663118	0.62215	0.6791127	0.6019374	0.687224
31	0.5677579	0.643153	0.603658	0.6561398	0.5870945	0.660559
32	0.5527727	0.6191438	0.587975	0.633989	0.572909	0.637051
33	0.5402448	0.5979288	0.572097	0.6140409	0.5602368	0.617345
34	0.5284405	0.5835475	0.558221	0.5961093	0.5477022	0.597393
35	0.5167116	0.5640637	0.544763	0.5807061	0.535458	0.578411

36	0.5072441	0.5501532	0.53483	0.5646514	0.5248647	0.561908
37	0.4981986	0.5374728	0.524688	0.5523816	0.5147606	0.545219
38	0.4911583	0.5264325	0.515816	0.5432141	0.5040756	0.53161
39	0.4834998	0.5176853	0.505688	0.5334572	0.4954084	0.520418
40	0.4784796	0.5085129	0.49934	0.5258254	0.4844024	0.509888
41	0.4706855	0.5029092	0.490812	0.519295	0.4769428	0.500527
42	0.4646552	0.4953466	0.483746	0.5121286	0.4682755	0.493538
43	0.4589566	0.4963488	0.476248	0.5067925	0.4602197	0.484378
44	0.4521574	0.4848681	0.470483	0.500867	0.4508035	0.477496
45	0.4450869	0.4798719	0.465135	0.4964617	0.4505895	0.473063
46	0.4363732	0.4736456	0.459056	0.4915444	0.4444292	0.466766
47	0.4488709	0.4689379	0.464627	0.4867513	0.4334843	0.461578
48	0.4419964	0.4624838	0.45465	0.4793522	0.4267737	0.456713
49	0.4336746	0.4557715	0.448526	0.4731475	0.4180759	0.449739
50	0.4239055	0.4493934	0.440938	0.4656088	0.4104176	0.443966
51	0.4176491	0.4419218	0.432528	0.458675	0.4038904	0.438316
52	0.409463	0.4355892	0.427808	0.4529822	0.3964002	0.432651
53	0.4029805	0.4271305	0.419683	0.4451487	0.3908819	0.426154
54	0.3935883	0.4199019	0.411288	0.4384166	0.3847216	0.420596
55	0.3880555	0.4103954	0.407554	0.430273	0.3775524	0.414931
56	0.3805629	0.4038047	0.399085	0.4218346	0.3719882	0.407895
57	0.3720753	0.3998411	0.392752	0.4172586	0.3672801	0.400429
58	0.3694672	0.3877226	0.387016	0.4055937	0.3592091	0.393732
59	0.3579946	0.3806914	0.380907	0.3981326	0.3556168	0.388036
60	0.3527181	0.371762	0.37441	0.390113	0.3511533	0.379538
61	0.3456023	0.3643967	0.368943	0.3829155	0.3442287	0.372687
62	0.3382755	0.3557406	0.361788	0.3758111	0.3391995	0.368114
63	0.3330593	0.3490891	0.355858	0.3673417	0.3334214	0.359847
64	0.3252501	0.3416479	0.35072	0.3621918	0.3280712	0.355414
65	0.3190992	0.3340852	0.34358	0.3514732	0.3236077	0.345576
66	0.314079	0.3262036	0.33774	0.345951	0.3181047	0.340203
67	0.3062396	0.3199166	0.332303	0.3399945	0.3115316	0.334507
68	0.2996516	0.3130069	0.325597	0.332161	0.3072821	0.327764
69	0.2940434	0.3055505	0.319951	0.325491	0.304072	0.320929
70	0.2879377	0.2989901	0.314514	0.3181694	0.2983856	0.313416
71	0.2826612	0.291473	0.311989	0.3106617	0.2929743	0.307227
72	0.2773094	0.2841988	0.306448	0.3055428	0.2879146	0.300592

## Anexo IV Calor total acumulado por las muestras con P 35 y 30% de LC<sup>2</sup>

Calor total acumulado (J/g cemento)						
Time	LC2-40	LC2(A)-40	LC2-45	LC2(A)-45	LC2-5	LC2(A)-5
0	0.103508	0.060996	0.10391	0.06736	0.097923	0.06448
1	7.401018	4.448899	8.38097	5.00241	7.806373	4.79595
2	16.67625	13.26304	21.5205	14.6208	20.54565	13.7967
3	30.80508	25.98215	36.0424	28.1411	35.09145	26.3285
4	45.96078	40.51668	49.8633	43.2103	49.2122	40.287
5	60.19267	54.96714	62.5027	57.9208	62.24566	53.9851
6	73.22648	68.81267	75.1941	72.0475	75.15407	67.1109
7	86.63057	83.79288	88.9272	87.453	89.1598	81.4235
8	100.7625	97.98487	102.165	102.064	103.0809	96.4207
9	113.1829	109.3087	112.196	113.352	113.7649	108.189
10	122.2913	118.2559	119.565	122.114	121.4496	116.64
11	129.2429	125.7373	125.546	129.464	127.4884	123.501
12	135.1174	132.2557	130.82	135.902	132.6645	129.527
13	140.337	138.0814	135.624	141.694	137.3442	135.002
14	145.0908	143.3694	140.075	146.996	141.6736	140.071
15	149.4804	148.2317	144.238	151.905	145.7217	144.812
16	153.5774	152.7507	148.157	156.485	149.527	149.274
17	157.431	156.9826	151.858	160.786	153.1164	153.491
18	161.0642	160.9687	155.369	164.837	156.5132	157.484
19	164.5007	164.7371	158.702	168.664	159.7316	161.276
20	167.7604	168.3087	161.878	172.291	162.7892	164.881
21	170.8598	171.7018	164.914	175.736	165.7025	168.312
22	173.8143	174.9312	167.826	179.018	168.4876	171.58
23	176.6387	178.0091	170.628	182.15	171.1591	174.704
24	179.3462	180.9473	173.323	185.144	173.7299	177.697
25	181.9491	183.7576	175.92	188.01	176.1973	180.568
26	184.4553	186.4474	178.4	190.757	178.5813	183.321
27	186.8314	189.0247	180.8	193.391	180.8936	185.966
28	189.105	191.4971	183.13	195.922	183.1371	188.511
29	191.2994	193.8733	185.386	198.357	185.3221	190.96
30	193.418	196.1615	187.579	200.705	187.4482	193.321
31	195.4782	198.3702	189.711	202.974	189.5246	195.6
32	197.4787	200.5068	191.787	205.173	191.5527	197.806
33	199.4315	202.5818	193.813	207.308	193.535	199.94
34	201.3394	204.5988	195.792	209.387	195.473	202.009

35	203.2067	206.5638	197.729	211.416	197.3732	204.019
36	205.0404	208.4853	199.627	213.398	199.2343	205.975
37	206.8421	210.3707	201.491	215.346	201.0597	207.884
38	208.6164	212.2235	203.323	217.259	202.8496	209.748
39	210.364	214.0488	205.127	219.146	204.6053	211.575
40	212.0874	215.851	206.902	221.008	206.3283	213.37
41	213.7891	217.6292	208.652	222.848	208.0194	215.137
42	215.4676	219.3906	210.378	224.67	209.6804	216.877
43	217.1239	221.131	212.08	226.471	211.3115	218.594
44	218.758	222.851	213.758	228.253	212.9208	220.291
45	220.3678	224.5524	215.411	230.018	214.5246	221.966
46	221.9518	226.2342	217.082	231.763	216.0942	223.622
47	223.5509	227.8915	218.73	233.484	217.6355	225.259
48	225.1468	229.5268	220.353	235.184	219.1489	226.872
49	226.7125	231.1352	221.949	236.856	220.6333	228.467
50	228.249	232.7192	223.515	238.504	222.0932	230.041
51	229.759	234.2784	225.06	240.129	223.53	231.593
52	231.2396	235.8104	226.58	241.728	224.942	233.126
53	232.6977	237.3159	228.073	243.3	226.3339	234.636
54	234.123	238.79	229.546	244.843	227.7014	236.12
55	235.5261	240.2368	230.993	246.356	229.0512	237.585
56	236.9038	241.6555	232.415	247.845	230.3772	239.025
57	238.255	243.0443	233.813	249.302	231.6798	240.439
58	239.5801	244.404	235.187	250.733	232.9653	241.831
59	240.8768	245.7348	236.54	252.133	234.2323	243.194
60	242.1506	247.0377	237.874	253.507	235.4782	244.534
61	243.4011	248.3115	239.185	254.854	236.7044	245.85
62	244.6263	249.5601	240.473	256.173	237.912	247.144
63	245.8293	250.7821	241.743	257.472	239.101	248.416
64	247.0069	251.9766	242.986	258.736	240.2693	249.657
65	248.161	253.1445	244.21	259.979	241.4204	250.878
66	249.2947	254.2877	245.413	261.198	242.5516	252.078
67	250.4032	255.4067	246.59	262.39	243.6627	253.254
68	251.4883	256.4988	247.747	263.56	244.7577	254.405
69	252.5531	257.568	248.886	264.7	245.8365	255.527
70	253.5947	258.6109	250.007	265.814	246.8974	256.626
71	254.615	259.6327	251.106	266.911	247.9417	257.706
72	255.6176	260.6352	252.187	267.987	248.9695	258.769

## Anexo V Determinación de la contracción química de las muestras con P 35

Relación a/c = 0.40			
Tiempo (h)	P 40	Tiempo (h)	PA 40
0.16	0	0.27	0
6.26	0.00284	15.57	0.00285
9.26	0.00569	20.32	0.0057
11.51	0.00853	23.37	0.00856
14.51	0.01138	26.52	0.01141
18.56	0.01422	30.27	0.01426
24.01	0.01707	36.42	0.01711
31.26	0.01991	42.57	0.01996
40.51	0.02276	50.12	0.02282
50.07	0.0256	60.57	0.02567
61.42	0.02845	73.57	0.02852
70.47	0.03129		
Relación a/c = 0.45			
Tiempo (h)	P 45	Tiempo (h)	PA 45
0.18	0	0.31	0
5.48	0.00284	15.41	0.00288
8.38	0.00568	26.41	0.00575
12.03	0.00852	30.21	0.00863
16.03	0.01135	34.41	0.0115
22.53	0.01419	38.11	0.01438
30.03	0.01703	42.51	0.01726
42.28	0.01987	48.16	0.02013
54.04	0.02271	54.27	0.02301
73.24	0.02555	61.07	0.02588
		71.12	0.02876

Fracción de cemento en la pasta	
P 40	3.515139
PA 40	3.506389
P 45	3.522917
PA 45	3.476944

Masa de pasta (g)	
P 4	5.0618
PA 4	5.0492
P 45	5.073
PA 45	5.0068

Anexo VI Determinación de la contracción química de las muestras con P 35 y 30% de LC<sup>2</sup>

Relación a/c = 0.40			
Tiempo (h)	LC2-40	Tiempo (h)	LC2(A)-40
0.1	0	0.25	0
2.1	0.0028	5.2	0.00286
5.05	0.00561	11.1	0.005721
7.35	0.00841	14.2	0.008581
10.05	0.01121	17.3	0.011442
12.51	0.01401	21.25	0.014302
15.21	0.01682	24.25	0.017162
19.06	0.01962	31.06	0.020023
24.21	0.02242	38.01	0.022883
32.47	0.02522	47.36	0.025743
40.47	0.02803	61.06	0.028604
49.37	0.03083	70.36	0.031464
58.02	0.03363		
65.52	0.03643		
71.57	0.03924		
Relación a/c = 0.45			
Tiempo (h)	LC2-45	Tiempo (h)	LC2(A)-45
0.2	0	0.33	0
2.25	0.00285	8.53	0.002848
5.15	0.00569	11.08	0.005696
7.35	0.00854	13.48	0.008544
11.1	0.01138	16.33	0.011392
15.05	0.01423	18.58	0.01424
18.05	0.01707	23.03	0.017088
23.55	0.01992	29.44	0.019936
32.05	0.02276	36.44	0.022784
46.45	0.02561	47.04	0.025632
61.55	0.02845	56.34	0.02848
71.85	0.0313	70.39	0.031328
Relación a/c = 0.50			
Tiempo (h)	LC2-50	Tiempo (h)	LC2(A)-50
0.18	0	0.34	0

2.23	0.00287	1.34	0.002874
5.33	0.00573	7.19	0.005749
8.18	0.0086	11.44	0.008623
11.13	0.01146	15.04	0.011498
14.23	0.01433	18.24	0.014372
17.18	0.01719	23.59	0.017247
22.43	0.02006	29.35	0.020121
31.19	0.02292	37.4	0.022995
43.29	0.02579	49.3	0.02587
56.49	0.02865	62.1	0.028744
71.74	0.03152	70.2	0.031619

Fracción de cemento en la pasta	
LC2-40	3.5681
LC2(A)-40	3.496
LC2-45	3.5146
LC2(A)-45	3.5112
LC2-50	3.4899
LC2(A)-50	3.479

Masa de pasta (g)	
LC2-40	5.138
LC2(A)-40	5.0343
LC2-45	5.061
LC2(A)-45	5.0561
LC2-50	5.0254
LC2(A)-50	5.0097

Anexo VII Determinación de la contracción química de las muestras con P 35 y  
15% de LC<sup>2</sup>

Relación a/c = 0.40			
Time (h)	LC2-40	Time (h)	LC2(A)-40
0.28	0	0.32	0
0.48	0.0028	1.42	0.002823
4.24	0.0056	10.08	0.005646
7.04	0.0084	13.13	0.008469
9.44	0.01119	15.53	0.011292
13.04	0.01399	21.03	0.014115
17.14	0.01679	24.13	0.016938
22.19	0.01959	27.48	0.01976
27.59	0.02239	33.58	0.022583
37.59	0.02519	42.33	0.025406
50.19	0.02799	56.53	0.028229
66.29	0.03078	84.54	0.031052
75.04	0.03358		
Relación a/c = 0.45			
Time (h)	LC2-45	Time (h)	LC2(A)-45
0.25	0	0.36	0
2.05	0.00279	5.48	0.002866
5.26	0.00557	15.08	0.005732
8.16	0.00836	19.58	0.008598
11.36	0.01115	24.03	0.011464
15.16	0.01393	28.13	0.01433
19.51	0.01672	32.38	0.017196
24.31	0.01951	39.18	0.020062
29.26	0.02229	50.13	0.022929
36.56	0.02508	63.28	0.025795
48.21	0.02787	75.28	0.028661
59.16	0.03065		
72.06	0.03344		
Relación a/c = 0.50			
Time (h)	LC2-50	Time (h)	LC2(A)-50
0.16	0	0.39	0
2.01	0.00281	11.29	0.002867

5.07	0.00561	15.49	0.005734
8.32	0.00842	17.59	0.0086
11.27	0.01123	21.29	0.011467
15.12	0.01403	24.29	0.014334
20.07	0.01684	28.29	0.017201
24.27	0.01964	33.49	0.020068
30.27	0.02245	43.04	0.022935
37.47	0.02526	52.04	0.025801
48.47	0.02806	71.39	0.028668
64.32	0.03087		
75.52	0.03368		

Fracción de cemento en la pasta	
LC2-40	3.5733
LC2(A)-40	3.5424
LC2-45	3.5886
LC2(A)-45	3.4891
LC2-50	3.5633
LC2(A)-50	3.4882

Masa de pasta (g)	
LC2-40	5.1456
LC2(A)-40	5.1011
LC2-45	5.1676
LC2(A)-45	5.0243
LC2-50	5.1311
LC2(A)-50	5.023

Anexo VIII Primera derivada de los valores de contracción química de las muestras con P 35

P 40			PA 40		
Tiempo	P 40	1era Deriv	Tiempo	PA 40	1era Deriv
0.16	0	0.0004664	0.27	0	0.000186
6.26	0.002845	0.0009483	15.57	0.0029	0.0006
9.26	0.00569	0.0012644	20.32	0.0057	0.000935
11.51	0.008535	0.0009483	23.37	0.0086	0.000905
14.51	0.011379	0.0007024	26.52	0.0114	0.000761
18.56	0.014224	0.000522	30.27	0.0143	0.000464
24.01	0.017069	0.0003924	36.42	0.0171	0.000464
31.26	0.019914	0.0003076	42.57	0.02	0.000378
40.51	0.022759	0.0002976	50.12	0.0228	0.000273
50.07	0.025604	0.0002506	60.57	0.0257	0.000219
61.42	0.028448	0.0003143	73.57	0.0285	0.000388
70.47	0.031293	0.000441			
P 45			PA 45		
Tiempo	P 45	1era Deriv	Tiempo	PA 45	1era Deriv
0.18	0	0.0005356	0.31	0	0.00019
5.48	0.002839	0.0009788	15.41	0.0029	0.000261
8.38	0.005677	0.0007777	26.41	0.0058	0.000757
12.03	0.008516	0.0007096	30.21	0.0086	0.000685
16.03	0.011354	0.0004367	34.41	0.0115	0.000777
22.53	0.014193	0.0003785	38.11	0.0144	0.000654
30.03	0.017031	0.0002317	42.51	0.0173	0.000509
42.28	0.01987	0.0002414	48.16	0.0201	0.000471
54.04	0.022708	0.0001478	54.27	0.023	0.000423
73.24	0.025547	0.0003488	61.07	0.0259	0.000286
			71.12	0.0288	0.000404

Anexo IX Primera derivada de los valores de contracción química de las muestras con P 35 y 30% de LC<sup>2</sup>

Time (h)	LC2-40	1era Deriv	Time (h)	LC2(A)-40	1era Deriv
0.1	0	0.001401	0.25	0	0.000578
2.1	0.0028	0.00095	5.2	0.00286	0.000485
5.05	0.0056	0.001219	11.1	0.005721	0.000923
7.35	0.0084	0.001038	14.2	0.008581	0.000923
10.05	0.0112	0.001139	17.3	0.011442	0.000724
12.51	0.014	0.001038	21.25	0.014302	0.000953
15.21	0.0168	0.000728	24.25	0.017162	0.00042
19.06	0.0196	0.000544	31.06	0.020023	0.000412
24.21	0.0224	0.000339	38.01	0.022883	0.000306
32.47	0.0252	0.00035	47.36	0.025743	0.000209
40.47	0.028	0.000315	61.06	0.028604	0.000308
49.37	0.0308	0.000324	70.36	0.031464	
58.02	0.0336	0.000374			
65.52	0.0364	0.000463			
71.57	0.0392				
Time (h)	LC2-45	1era Deriv	Time (h)	LC2(A)-45	1era Deriv
0.2	0	0.001388	0.33	0	0.000347
2.25	0.0028	0.000981	8.53	0.002848	0.001117
5.15	0.0057	0.001293	11.08	0.005696	0.001187
7.35	0.0085	0.000759	13.48	0.008544	0.000999
11.1	0.0114	0.00072	16.33	0.011392	0.001266
15.05	0.0142	0.000948	18.58	0.01424	0.00064
18.05	0.0171	0.000517	23.03	0.017088	0.000444
23.55	0.0199	0.000335	29.44	0.019936	0.000407
32.05	0.0228	0.000198	36.44	0.022784	0.000269
46.45	0.0256	0.000188	47.04	0.025632	0.000306
61.55	0.0285	0.000276	56.34	0.02848	0.000203
71.85	0.0313	0.000436	70.39	0.031328	