



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE ADICIONES PUZOLÁNICAS Y DEL
PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA MEZCLA EN LA RESISTENCIA
MECÁNICA DEL HORMIGÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

VERÓNICA VALERIA LATORRE OYANADEL

PROFESOR GUÍA:
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ERNESTO GÓMEZ GAZZANO
VÍCTOR ÁGUILA OLAVE

SANTIAGO DE CHILE
OCTUBRE 2009

**RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL
POR: VERÓNICA LATORRE O.
FECHA: 05 / 11 / 2009
PROF. GUÍA: Sr. FEDERICO DELFÍN A.**

“INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE ADICIONES PUZOLÁNICAS Y DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA MEZCLA EN LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL HORMIGÓN”

La preocupación por los altos requerimientos de energía y la fuerte emisión de gases contaminantes, problemas que enfrenta la industria cementera, ha impulsado, en forma creciente, una tendencia mundial a buscar y estudiar métodos más eficientes, tanto en la fabricación del cemento como en la elaboración del hormigón, que permitan utilizar como aglomerante, materiales cementíceos suplementarios de menor costo económico y ambiental.

El objetivo del presente trabajo de título es estudiar la posibilidad de incorporar contenidos mayores de puzolana a la mezcla, para obtener un determinado nivel de resistencia, a través de una optimización del proceso de mezclado de los componentes del hormigón. Para esto, se elaboraron hormigones de razones agua/material cementíceo 0.4, 0.5 y 0.6 y proporción de puzolana en el material aglomerante de 0%, 20% y 40% mediante dos métodos de mezclado. El primero de ellos corresponde al mezclado convencional de una etapa, donde el orden de adición de los componentes al mezclador es áridos, cemento, parte del agua y finalmente el resto de ella, y el segundo corresponde a un mezclado en etapas, que inicialmente mezcla a alta velocidad la pasta cementicia para luego ser combinada en distintas fases con los áridos. El diseño de las mezclas contempló el ajuste de las fracciones gruesas y finas de los áridos a la banda granulométrica entregada por la RILEM y del contenido de agua al requerido para obtener asentamiento de cono entre 12 y 16 [cm].

En forma complementaria, se estudió el efecto de utilizar áridos presaturados y a temperaturas significativamente mayores a la de la pasta aglomerante, para verificar el efecto de una posible alteración en la calidad de la pasta en la zona de transición árido/pasta (ITZ), que justifique el control de la temperatura de los áridos en la etapa de mezclado.

El comportamiento de los hormigones estudiados frente a la inclusión de puzolana en el material cementíceo para ambos sistemas de mezclado fue el esperado, apreciándose un aumento de la resistencia al disminuir la razón agua/cemento y el contenido de puzolana en el material cementíceo. El mezclado en etapas disminuyó el descenso de cono del hormigón, la densidad y la exudación, y aumentó el contenido de aire y la consistencia de éste, convirtiéndolo en un material más aglomerado y homogéneo.

Comparando las resistencias a 7, 28 y 56 días, se concluye que los beneficios entregados por el mezclado en etapas, que permite mejorar la zona interfacial árido/pasta del hormigón mediante una más eficiente hidratación y aprovechamiento del cemento Pórtland y la puzolana utilizados y una mayor homogeneización del hormigón, aumenta la resistencia del hormigón a temprana edad, en promedio, en un 14%. A los 28 y 56 días, el aumento de resistencia producido por uso del mezclado en etapas es del orden de un 4% y un 1% respectivamente. Esta diferencia se debe a que a los 7 días el hormigón fue más susceptible a los cambios en la hidratación que se produjeron por la previa mezcla de la pasta, no así a los 28 y 56 días cuando la hidratación se encuentra estabilizada.

A partir de las resistencias de los hormigones elaborados en etapas con áridos a temperaturas altas y normales se concluye que esta alteración disminuye las resistencias en un 16, 11 y 1% en los hormigones elaborados con material cementíceo con 0, 20 y 40% de adición puzolánica respectivamente, lo que se explicaría por el deterioro de la zona interfacial. La incorporación de puzolana redujo significativamente la pérdida de resistencia, lo que sería atribuible a una menor susceptibilidad de los cementos puzolánicos a la aceleración del proceso de hidratación por efecto de altas temperaturas.

A mis padres...

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar esta memoria quiero agradecer el apoyo incondicional de mi familia, especialmente a mi madre Teresa y a mi padre Rafael, por todo el amor y confianza que han depositado en mí. Al término de esta etapa de mi vida les dedico este triunfo ... esto es para ustedes.

Agradezco a mi profesor guía, Don Federico Delfín, por todo el apoyo, colaboración y disposición entregados para que este Trabajo de Título llegara a su fin.

Agradezco también a Don Ernesto Gómez y a Don Víctor Águila, que en el transcurso del proceso no dudaron en ayudar y responder a todas mis inquietudes.

Agradezco a las empresas SIKA, Polpaico e IDIEM, por apoyar y aportar con materiales y sus instalaciones para la realización de esta memoria.

Agradezco además, a todas las personas que desinteresadamente me ayudaron a realizar la etapa experimental de este trabajo, a todo el personal de la Sección de Hormigones, especialmente a Gonzalo López y Don Carlos Arcos.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis amigos, quienes con sus palabras y alegrías apoyaron mis logros y aliviaron mis fracasos. Gracias por estar ahí y compartir sus vidas conmigo.

Y a ti mi amor, que aun en la distancia, te sentí muy cerca. Gracias por estar a mi lado siempre, por el apoyo y la comprensión que me has brindado.

Finalmente, agradezco a Dios por guiarme y acompañarme en cada paso...

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	Introducción.....	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivos generales	2
1.2.2	Objetivos específicos.....	2
1.3	Alcances.....	2
CAPÍTULO 2	Antecedentes.....	3
2.1	Materiales cementíceos	3
2.1.1	Introducción	3
2.1.2	Cemento Pórtland.....	3
2.1.3	Cemento con adición puzolánica.....	5
2.2	Microestructura del hormigón.....	6
2.2.1	Introducción	6
2.2.2	Microestructura de la pasta cementicia	6
2.2.3	Microestructura de la zona interfacial.....	16
2.3	Hormigones con alto contenido de adiciones puzolánicas	23
2.3.1	Introducción	23
2.3.2	Propiedades de los hormigones con contenido de adiciones puzolánicas.....	24
2.3.3	Eficiencia de adiciones	30
2.4	Mezclado del hormigón	31
2.4.1	Introducción	31
2.4.2	Antecedentes de los actuales sistemas de mezclado.....	31
2.4.3	Normativa chilena de mezclado de hormigones de laboratorio	37
2.4.4	Efectos del mezclado en las propiedades del hormigón.....	37

2.5 Resistencia mecánica del hormigón	44
2.5.1 Introducción	44
2.5.2 Factores que afectan la resistencia mecánica del hormigón	45
2.5.3 Análisis del desarrollo de la resistencia a la compresión del hormigón con la edad	47
CAPÍTULO 3 Planteamiento del programa experimental	49
3.1 Introducción.....	49
3.2 Planteamiento de la investigación.....	49
3.3 Definición de las variables	50
3.4 Programa de ensayos	51
CAPÍTULO 4 Desarrollo experimental	53
4.1 Introducción.....	53
4.2 Caracterización de materiales.....	53
4.2.1 Cemento	53
4.2.2 Puzolana.....	54
4.2.3 Áridos.....	56
4.2.4 Agua.....	58
4.3 Elaboración de cementos Pórtland puzolánicos y puzolánicos de laboratorio	59
4.3.1 Caracterización de cementos Pórtland puzolánicos y puzolánicos de laboratorio ...	59
4.4 Dosificación.....	60
4.4.1 Dosificación de hormigones elaborados con mezclado convencional y mezclado en etapas	61
4.4.2 Dosificación de pastas de hormigones elaborados con mezclado en etapas.....	63
4.5 Metodología de ensayo	65
4.5.1 Elaboración de hormigones.....	65
4.5.2 Fabricación de probetas cúbicas.....	69
4.5.3 Ensayos de caracterización de comportamiento.....	70

CAPÍTULO 5 Resultados	75
5.1 Introducción.....	75
5.2 Mezclado convencional.....	75
5.2.1 Propiedades del hormigón fresco.....	75
5.2.2 Propiedades del hormigón endurecido.....	78
5.3 Mezclado en etapas	79
5.3.1 Áridos a temperatura normal	79
5.3.2 Áridos a alta temperatura	83
 CAPÍTULO 6 Análisis de resultados	 86
6.1 Introducción.....	86
6.2 Mezclado convencional.....	86
6.2.1 Propiedades del hormigón fresco.....	86
6.2.2 Propiedades del hormigón endurecido.....	96
6.3 Mezclado en etapas	104
6.3.1 Áridos a temperatura normal	104
6.3.2 Áridos a alta temperatura	122
6.4 Comparación de métodos de elaboración del hormigón.....	128
6.4.1 Propiedades del hormigón fresco.....	128
6.4.2 Propiedades del hormigón endurecido.....	137
6.5 Efecto de la temperatura de los áridos	145
6.5.1 Propiedades del hormigón fresco.....	145
6.5.2 Propiedades del hormigón endurecido.....	148
6.6 Rendimiento de la puzolana en el material cementíceo al mezclar en etapas	152
6.6.1 Razón agua/material cementíceo 0.4.....	154
6.6.2 Razón agua/material cementíceo 0.5.....	156
6.6.3 Razón agua/material cementíceo 0.6.....	158
6.7 Implementación del sistema de mezclado en etapas	160

CAPÍTULO 7 Conclusiones y recomendaciones	163
7.1 Conclusiones.....	163
7.2 Recomendaciones	164
CAPÍTULO 8 Referencias bibliográficas.....	165
ANEXO I.....	168
ANEXO II.....	174
ANEXO III.....	196

CAPÍTULO 1 Introducción

1.1 Introducción

El cemento, resultado innegable del desarrollo histórico de la humanidad, es en la actualidad uno de los materiales más empleados en la vida moderna. Este material se fabrica en la mayoría de los países, aún en etapas incipientes de desarrollo.

La producción de cemento Pórtland se incrementa conforme aumenta la población mundial y con esto, se está generando un alto impacto en los requerimientos energéticos y en la emisión de contaminantes asociados a la industria cementera. La producción de cemento es un proceso de alta demanda energética de combustibles (aproximadamente 4.000 kJ/kg de cemento, con 25% de pérdidas) y con alta emisión de contaminantes (entre 0.5 kg y 0.6 kg de CO₂/kg cemento) por descarbonatación de materia prima y uso de combustibles.¹

Desde el punto de vista de la sustentabilidad del proceso constructivo, numerosos estudios se han realizado para mejorar las propiedades del hormigón tanto en su resistencia como en su durabilidad. Algunos utilizando otros materiales cementíceos en distintas proporciones y de distintos orígenes y otros, variando los procedimientos de fabricación del hormigón.

Aumentar significativamente el porcentaje de adiciones dentro del material cementíceo total, permitiría disminuir los costos energéticos, las emisiones de dióxido de carbono y mejoraría el desempeño del hormigón en cuanto a su vida útil. Las puzolanas naturales tienen la capacidad de formar productos de hidratación a través de una reacción secundaria a la reacción de hidratación del cemento. Este proceso disminuye la porosidad de la pasta, lo que mejora las características de durabilidad del hormigón, como son la permeabilidad, la resistencia a los sulfatos, disminuye la potencial reacción álcali-agregado y la tendencia a la fisuración debido a retracción plástica, alabeo térmico y contracción por secado, pero hace más lento el desarrollo de la resistencia en el tiempo.

Otra forma de mejorar las propiedades del hormigón sería a través del mejoramiento de su proceso de fabricación. La resistencia de un hormigón depende de manera importante del proceso de hidratación del cemento y particularmente de la homogeneidad de su estructura. El estudio de un proceso que permita hacer más eficiente la hidratación, producir una mezcla homogénea, con sus partículas suficientemente dispersadas y con los áridos completamente recubiertos, permitiría obtener hormigones más resistentes.

La verificación de éste comportamiento en hormigones confeccionados con los cementos y adiciones puzolánicas disponibles en el país mediante un procedimiento especial de mezclado, que permitiría mejorar las propiedades del hormigón, tanto en sus etapas de elaboración, transporte y colocación, como después de curado, se estima puede significar un mejor aprovechamiento de los materiales y la obtención de hormigones de mejor desempeño.

En el presente trabajo de título se aborda un estudio sobre la influencia del método de mezclado en la elaboración de hormigones de cemento con miras a permitir la utilización de mayores cantidades de puzolana para obtener una resistencia determinada, mejorando las propiedades del hormigón fresco y también su desempeño en resistencia y durabilidad.

¹ Reporte de Desarrollo Sostenible, Grupo Polpaico, 2004-2005.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos generales

Estudiar y analizar la influencia de algunas variables de composición de la pasta cementicia y del proceso de mezclado, en las propiedades de trabajabilidad y resistencia mecánica del hormigón.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar la eficiencia de la puzolana molida a finura superior a 5000 [cm^2/g], incorporada en distintas proporciones, como fracción cementicia de la pasta aglomerante, variando la relación agua/material cementíceo.
- Verificar la efectividad del procedimiento de mezclado en dos etapas en las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido, optimizando la energía de mezclado y el tiempo de mezcla, examinando las propiedades del hormigón fresco y la resistencia del hormigón.
- Verificar el efecto de la incorporación de áridos temperaturas superiores a las de la pasta en la resistencia mecánica de las distintas mezclas.

1.3 Alcances

En este estudio se consideró el uso de la puzolana volcánica que se obtiene en los yacimientos de la zona de Pudahuel, en la Región Metropolitana. Cualquier análisis o conclusión resultantes de esta investigación, sobre material puzolánico sin generalizar, se refiere sólo a este tipo de material.

El cemento Pórtland utilizado corresponde al producto elaborado por la Planta Cerro Blanco de Polpaico, que cumple con la norma chilena NCh 148 Of. 68.

CAPÍTULO 2 Antecedentes

2.1 Materiales cementíceos

2.1.1 Introducción

Los materiales cementíceos comprenden la variedad de materiales cerámicos finamente molidos que al mezclarse con agua forman una pasta con capacidad aglomerante y son la base para la obtención de mortero y hormigón. Las propiedades mecánicas de estos materiales se alcanzan a través de las reacciones químicas que se producen en una masa compacta. ⁽²⁴⁾

Los cementos hidráulicos más complejos adquieren sus propiedades de la formación de nuevos compuestos químicos durante el proceso de fabricación. El término hidráulico aplicado a los cementos, significa que es capaz de desarrollar resistencia mecánica y endurecer en presencia de agua.

Según la norma chilena NCh 148 Of. 68, el cemento es un material pulverizado que por adición de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire. El tipo de cemento más importante es el cemento Pórtland, no sólo por ocupar el primer lugar en la producción mundial, sino también por ser la base de fabricación de los otros conglomerantes llamados cementos con adiciones (puzolánicos, siderúrgicos, con cenizas volantes, etc). ⁽²⁵⁾

La fabricación del cemento Pórtland se realiza a partir del clínker correspondiente, producto constituido principalmente por silicatos de calcio. El clínker de cemento Pórtland se obtiene por calentamiento hasta una temperatura de fusión incipiente, de una mezcla homogénea de materias primas finamente molidas, formada principalmente por óxidos de calcio (CaO) y silicio (SiO₂), y por óxidos de aluminio (Al₂O₃) y hierro (Fe₂O₃) en menor medida. En la fabricación del cemento se distinguen dos etapas: producción del clínker y su molienda conjunta con yeso y otras adiciones. ⁽⁹⁾

En Chile, los materiales cementíceos mas utilizados son los cementos Pórtland puzolánicos y Puzolánico. Estos cementos se obtienen del proceso de molienda conjunta de clínker, puzolana y yeso.

2.1.2 Cemento Pórtland

El cemento es un material finamente pulverizado desarrolla la propiedad conglomerante como resultado de la hidratación (es decir, por las reacciones químicas entre los minerales constituyentes (silicatos y ferroaluminatos de calcio) y el agua).

El cemento hidráulico más comúnmente usado para hacer hormigón es el cemento Pórtland, que está formado principalmente de silicatos de calcio hidráulicos. Los hidratos de silicato de calcio que se forman con la hidratación del cemento Pórtland son los responsables principales de sus características adherentes y son estables en un medio acuoso.

Los principales compuestos del cemento Pórtland son el silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) y ferroaluminato tetracálcico (C_4AF).⁽⁹⁾

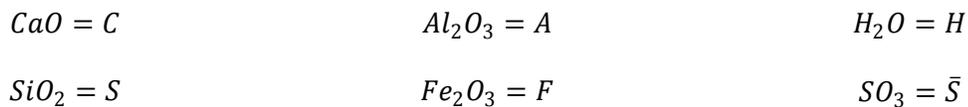
2.1.2.1 Hidratación del cemento Pórtland

Los silicatos y aluminatos presentes en el cemento Pórtland forman productos de hidratación al mezclarse con agua, los cuales son los responsables de que, con el paso del tiempo, la pasta se transforme en una masa firme y resistente.

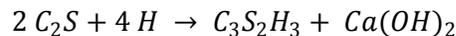
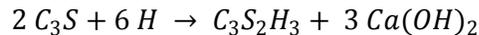
- Hidratación de los silicatos

Los silicatos tricálcico (C_3S) y dicálcico (C_2S) son los componentes principales, que están presentes en mayor proporción en el cemento Pórtland, y cuyos productos de hidratación son los responsables de las propiedades mecánicas y del desarrollo de la resistencia del hormigón a lo largo del tiempo.⁽⁸⁾

Considerando la nomenclatura:



las ecuaciones de reacción entre los silicatos y el agua pueden escribirse como se muestra a continuación.

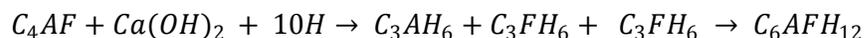
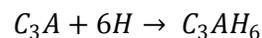
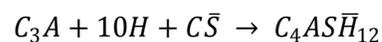
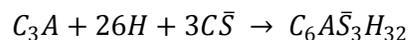


Ambos silicatos no se hidratan al mismo tiempo, y se sabe que el C_3S reacciona primero, con lo cual le contribuye resistencia mecánica a corto y mediano plazo al cemento. Por su parte el C_2S le concede al cemento resistencia mecánica a mediano y largo plazo.

Los productos de ambas reacciones son similares, el $C_3S_2H_3$ es conocido como gel de tobermorita (llamado así por poseer una estructura aparentemente similar al mineral tobermorita) y el otro producto es el $Ca(OH)_2$, el cual es la cal liberada como hidróxido de calcio.⁽⁸⁾

- Hidratación de los aluminatos

Las ecuaciones de hidratación de los aluminatos son las siguientes:



El aluminato tricálcico (C_3A) y el ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) son considerados los aluminatos del cemento. Están presentes en el cemento en menores proporciones y actúan durante la fabricación como fundentes, de modo tal que logran reducir la temperatura de cocción del clínker, facilitando la combinación de cal y sílice. ⁽⁸⁾

En el proceso de hidratación, el aluminato tricálcico reacciona casi inmediatamente con el agua, es por este motivo que se agrega yeso, el cual actúa como un retardante. El yeso reacciona con el aluminato tricálcico y forma etringita ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$) y monosulfoaluminato (C_4ASH_{12}). ⁽⁸⁾

Los productos del ferroaluminato tetracálcico al reaccionar con el yeso poseen estructuras similares a la etringita y al monosulfoaluminato. Al disminuir en la pasta la concentración de sulfato, la concentración de aluminato sube lo que provoca que la etringita se vuelva inestable y se convierta gradualmente en monosulfoaluminato. ⁽⁸⁾

2.1.3 Cemento con adición puzolánica

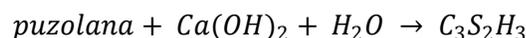
Un cemento con adición puzolánica presenta varias cualidades que están relacionadas con el proceso de hidratación. Esto pues las puzolanas tienen la capacidad de formar productos de hidratación a través de una reacción secundaria a la reacción de hidratación de los componentes del cemento.

Los cementos con adiciones producidos en Chile se clasifican en la norma chilena NCh 148 Of. 68 de acuerdo a la cantidad de adición en peso respecto al cemento Pórtland: ⁽²⁵⁾

- ✓ Cemento Pórtland puzolánico (hasta 30% de puzolana).
- ✓ Cemento puzolánico (entre 30 % y 50% de puzolana).
- ✓ Cemento Pórtland siderúrgico (hasta 30% de escoria de alto horno).
- ✓ Cemento siderúrgico (entre 30% y 75% de escoria de alto horno).

2.1.3.1 Hidratación del cemento con adición puzolánica

Cuando hay puzolana dentro de los materiales cementíceos, esta actúa de la siguiente forma:



Básicamente, un cemento Pórtland en el proceso de hidratación produce gel de tobermorita e hidróxido de calcio. Un cemento con adición puzolánica hace lo mismo, pero el hidróxido de calcio, producto de la reacción con los silicatos, es consumido por el material puzolánico produciendo más gel de tobermorita; este fenómeno otorga características adicionales al cemento con adición que no tiene el cemento Pórtland puro. ⁽⁸⁾

Este proceso disminuye la porosidad de la pasta, ya que los poros capilares son eliminados o reducidos en tamaño, y los densos cristales de hidróxido de calcio son sustituidos por $C_3S_2H_3$ adicional de una densidad menor, lo que mejora las características de durabilidad del hormigón. ⁽⁸⁾

2.2 Microestructura del hormigón

2.2.1 Introducción

En general, la completa caracterización de la microestructura de un sólido lleva consigo la determinación de los tipos, cantidades y distribución de todos los constituyentes presentes.

Desde el punto de vista macroscópico, el hormigón se compone de dos fases, de partículas de árido y de una matriz de pasta de cemento. A nivel microscópico, la complejidad del sistema aumenta, porque ambas fases no están distribuidas homogéneamente una respecto a la otra, ni son homogéneas en sí mismas.

Se describirá la microestructura de la pasta de cemento, incidiendo en los distintos tipos de elementos estructurales (sólidos, poros, etc.), así como en la disposición especial de éstos en el volumen de hormigón, su relación con el comportamiento mecánico y durable del hormigón y la morfología de la interfaz pasta de cemento – árido, resaltando la destacada influencia de dicha zona sobre las características mecánicas del hormigón.

Puesto que el hormigón, como ya se ha indicado, se puede modelar como un material compuesto de partículas de árido dispersas en una matriz de pasta de cemento endurecida, resulta lógico pensar que las características de tal material son el resultado de sumar las propiedades independientes de cada uno de los componentes y de la naturaleza de la interacción entre ellos o, lo que es lo mismo, de la naturaleza de la interfaz.

Hoy día está ampliamente reconocido que la estructura de la matriz de cemento en las proximidades de los áridos es muy distinta a la del resto de la pasta, aunque dicha microestructura de la zona interfacial es variable en función de la naturaleza del cemento, del tipo de árido, de las condiciones de curado, etc.

2.2.2 Microestructura de la pasta cementicia

La fase pasta de cemento del hormigón es el resultado directo de la hidratación del cemento Pórtland con una cantidad determinada de agua.

Desde el contacto del cemento con el agua, se desarrollan en cuestión de minutos u horas diferentes compuestos que experimentan cambios continuos en su estructura cristalina. A medida que va pasando el tiempo, estos cambios se van haciendo más lentos; aunque en la mayoría de los sistemas cementíceos los procesos de hidratación rara vez se completan en la práctica. Esto quiere decir que incluso después de transcurridos años se producen transformaciones de productos de hidratación que originan cambios microestructurales. ⁽²⁶⁾

De este modo, una pasta de cemento que se está hidratando genera no una microestructura simple, sino una sucesión de microestructuras en las distintas etapas de su desarrollo. Además hay que añadir que para una pasta dada a una edad determinada, algunos aspectos microestructurales varían de una zona a otra de la pasta, debido a las variaciones en su composición y en la distribución de las distintas fases.

2.2.2.1 Elementos microestructurales ⁽²⁷⁾

Los elementos que caracterizan la microestructura de la pasta de cemento son fases sólidas con distinto grado de cristalinidad, poros y agua.

2.2.2.1.1 Fases sólidas en la pasta de cemento endurecida

La hidratación del cemento Pórtland origina diferentes formas morfológicas de silicatos cálcicos hidratados (denominados genéricamente gel de CSH), hidróxido cálcico (CH), etringita (fase AF_f), monosulfoaluminato hidratado (fase AF_m), y ocasionalmente pequeñas cantidades de otras fases.

Todos estos compuestos, junto con los granos del cemento no hidratado, forman la fase microestructural sólida de la pasta de cemento.

Fase CSH

Esta fase constituye entre un 50 y 60 % del volumen de sólidos de una pasta de cemento Pórtland completamente hidratada, siendo la que aporta la mayor parte de las propiedades resistentes de la pasta de cemento endurecida.

El gel CSH se caracteriza por ser una fase pobremente cristalina y tener una composición química y una morfología variable.

Aun no está completamente establecida la composición química del CSH en la pasta de cemento endurecida. Esto se debe no sólo a las diferencias reales en la composición de los cementos y a las condiciones de curado, sino también a las técnicas experimentales de análisis, ya que éstas sólo permiten analizar un área pequeña de la muestra, que como es sabido, tiene un alto grado de heterogeneidad.

La estructura cristalina del CSH es de gran importancia, ya que es ésta la que determina las fuerzas de enlace, y por lo tanto su cohesión interna y propiedades. En la actualidad existe un desacuerdo evidente en relación a la estructura del CSH; aunque existe coincidencia en cuanto a que es predominantemente amorfa.

Las diferencias existentes entre los distintos autores en torno a la estructura del CSH se explican principalmente por los siguientes aspectos:

- ✓ Dificultad inherente en la caracterización de estructuras de sólidos pobremente cristalinos.
- ✓ Preparación de las muestras a estudiar.
- ✓ Estructura cambiante (es conocido que ciertos monómeros SiO_4 , presentes inicialmente en el CSH, evolucionan con el tiempo hacia la formación de grupos dímeros).

Aunque como se desprende de estos datos, la estructura de CSH no es del todo conocida, se han propuesto varios modelos que pretenden explicar las propiedades inherentes del material. Según el modelo de Power - Brunauer, el material tiene una estructura laminar con una elevada superficie específica (del orden de 100 - 700 [m^2/g]). La resistencia del material es atribuida a las fuerzas de Van der Waals que unen dichas láminas. ⁽⁹⁾

Hidróxido Cálculo CH

Los cristales de hidróxido cálcico constituyen el 20 - 25 % del volumen de sólidos en la pasta hidratada.

En contraste con el CSH, el hidróxido cálcico es un compuesto con una estequiometría definida, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Sus cristales se presentan muy definidos con formas planas y hexagonales (figura 2.1). Debido a diferencias locales en la relación agua/cemento, tipo y concentración de iones extraños y condiciones de curado, se sabe que la morfología y el tamaño de los cristales de CH varían dentro de una misma pasta de cemento.

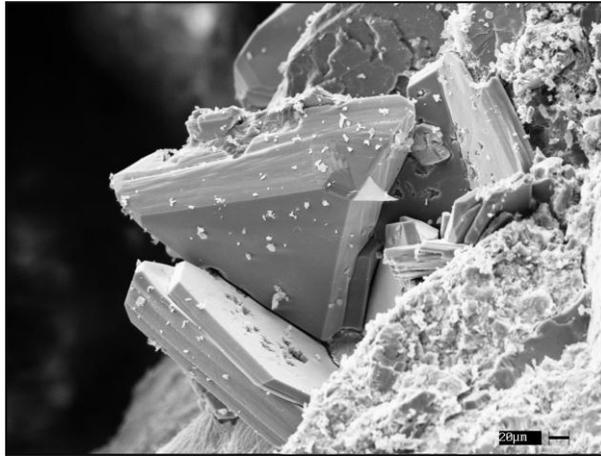


Figura 2.1: Cristales de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. (9)

Por el gran tamaño de los cristales, y por tanto, por su baja superficie específica, las fuerzas de enlace entre los cristales de CH o entre cristales de éstos con otros sólidos son relativamente débiles. Esto hace que comparado con el CSH, la contribución de los cristales de CH a la resistencia de la pasta del hormigón sea mínima. Por otra parte, altos contenidos de hidróxido cálcico en la pasta de cemento hidratado puede tener un efecto adverso para la durabilidad del hormigón, debido a la elevada solubilidad del CH en medios acuosos.

Fases AF_t Y AF_m

Los sulfoaluminatos cálcicos suponen entre un 15 y 20 % del volumen de sólidos en la pasta de cemento. Ambas fases aportan características de gran significado para explicar el desarrollo de la microestructura de la pasta de cemento, y muy especialmente en algunos cementos especiales, como los cementos expansivos, aunque contribuyen en muy pequeña proporción a las resistencias del producto final.

En las primeras etapas del proceso de hidratación se produce la formación de la fase AF_t ($\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{32}$), denominada etringita, que se presenta en forma de agujas prismáticas. En la figura 2.2 aparece una micrografía en la que se aprecia la morfología de los cristales de AF_t .

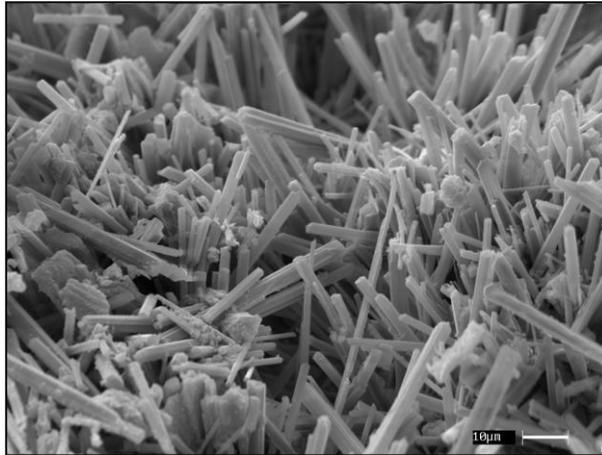


Figura 2.2: Cristales de etringita. (9)

La etringita puede, en condiciones determinadas (descenso de la concentración de iones SO_4^{2-} ó Ca^{2+} en la fase acuosa de la pasta), transformarse en monosulfoaluminato (AF_m) ($\text{C}_4\text{A}\bar{\text{S}}\text{H}_{12}$), que se manifiesta en forma de cristales hexagonales (ver figura 2.3). La presencia de este hidrato en el hormigón lo hace vulnerable al ataque por sulfatos.

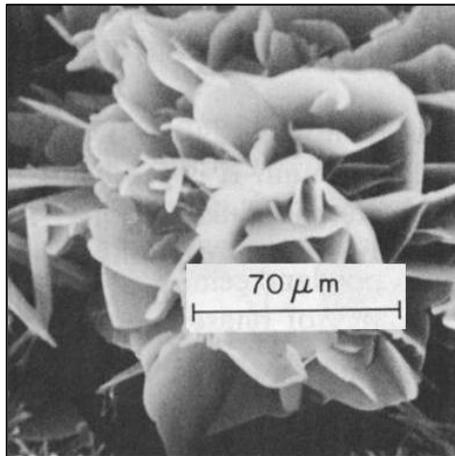


Figura 2.3: Cristales de monosulfoaluminato cálcico hidratado. (9)

2.2.2.1.2 Poros de la pasta de cemento hidratada

Además de las fases sólidas ya descritas, la pasta de cemento contiene varios tipos de poros, que juegan un papel importante en las propiedades del hormigón. Estos poros pueden clasificarse en los siguientes tipos.

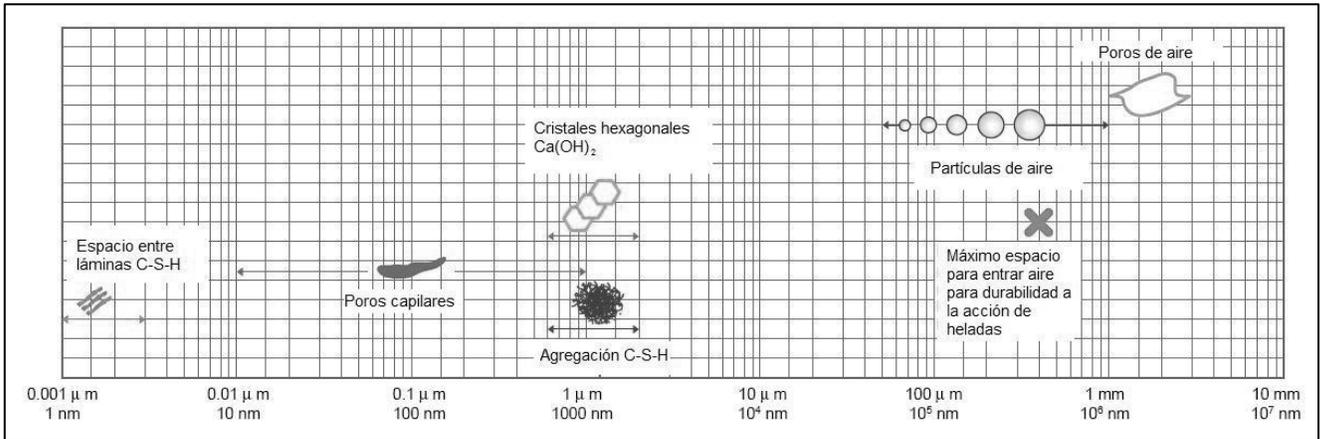


Figura 2.4: Distribución de tamaños de fases sólidas y poros presentes en la pasta de cemento.⁽⁹⁾

Poros interlaminares en el CSH

El ancho de los espacios interlaminares dentro del CSH puede variar entre 5 y 25 Å; constituyendo estos poros un 28 % del volumen total del CSH.

El tamaño de estos poros es tan pequeño que no influye en las resistencias y la permeabilidad de la pasta de cemento. Sin embargo, la eliminación del agua absorbida en dichos poros puede afectar a la estabilidad dimensional del sistema (retracción y fluencia), ya que esta agua está ligada mediante enlaces de hidrógeno.

Poros capilares

Los poros capilares representan el volumen de huecos ocupado por el agua libre de la pasta de cemento. El volumen y tamaño de estos poros viene determinado por la relación agua/cemento y el grado de hidratación del cemento. Para una cierta razón agua/cemento, el volumen de poros capilares de la pasta se reduce a medida que el material cementíceo se hidrata.

En pastas 100 % hidratadas de distinta razón agua/cemento para un volumen dado, todas presentan igual cantidad de productos de hidratación, sin embargo el volumen de poros capilares aumenta desde la relación agua/cemento 0.4 a la relación agua/cemento 0.7.

En pastas bien hidratadas y con relaciones agua/cemento bajas, del orden de 0.4, los poros capilares tienen tamaños entre 10 y 50 [nm]. En pastas con altas relaciones agua/cemento y en las primeras edades de la hidratación, los poros capilares pueden estar sobre los 3 a 5 [μm].

Los poros capilares de tamaño superior a 50 [nm] tiene efectos negativos sobre la resistencia e impermeabilidad, mientras que los inferiores a 50 [nm] influyen más sobre la estabilidad dimensional del hormigón.

Poros de aire

Estos poros, que son generalmente de forma esférica, pueden ser de dos tipos:

- ✓ Los que se generan durante el amasado de la pasta fresca, cuyo tamaño suele estar en torno a los 3 [mm].
- ✓ Los que se introducen con aditivos específicos, que pueden tener un tamaño entre 20 y 500 [μm].

Tanto unos como otros pueden tener efectos adversos sobre la resistencia y la impermeabilidad de la pasta, no obstante, los últimos mejoran significativamente el comportamiento del hormigón frente a ciclos de congelamiento y deshielo.

2.2.2.1.3 El agua en la pasta de cemento endurecida

Por su porosidad e higroscopicidad con respecto a la humedad ambiente, la pasta es capaz de retener una cierta cantidad de agua. Al igual que ocurre con la presencia de poros capilares, el agua que normalmente se aloja en la pasta de cemento se puede encontrar en varias formas.

La siguiente clasificación está basada en la facilidad o dificultad que existe para evaporar o desplazar esa agua, dando origen a diferentes tipos de agua en la pasta.

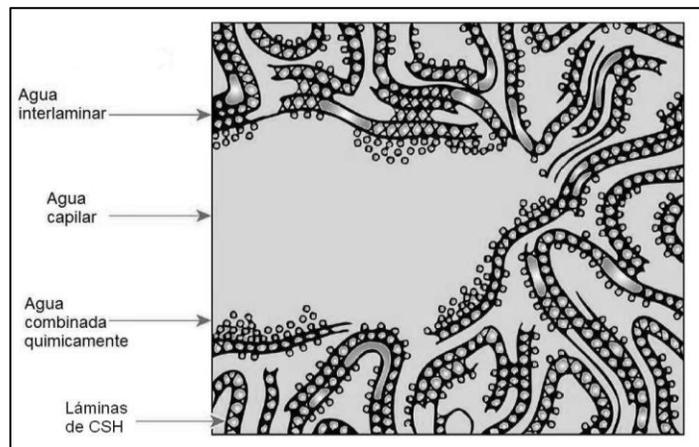


Figura 2.5: Distintos tipos de agua en el cemento hidratado. ⁽⁹⁾

Agua capilar

Es el agua presente en los poros con tamaño superior a 50 Å. Desde el punto de vista de su comportamiento, esta agua se puede subdividir en:

- El agua contenida en poros de tamaño superior a 50 [nm], que se puede considerar como agua libre, y su eliminación no altera el volumen.
- El agua contenida en poros de tamaño entre 5 - 50 [nm], que está ligada por la tensión capilar. Su eliminación puede originar inestabilidad volumétrica (retracción).

Agua adsorbida

Esta agua está ligada a la superficie del sólido por fuerzas moleculares atractivas. La energía de enlace de las moléculas individuales de agua decrece con la superficie del sólido. Así, una gran proporción de agua adsorbida puede ser eliminada secando la pasta hasta un 30 % de humedad relativa. La pérdida del agua adsorbida es la principal responsable de la retracción de la pasta de cemento.

Agua interlaminar

Es el agua asociada a la estructura del gel de CSH. Hay teorías que dicen que entre dos capas CSH hay una capa de moléculas de agua fuertemente retenida por enlaces de hidrógeno. El agua interlaminar sólo se pierde por un secado muy intenso (por debajo de un 11% de humedad relativa) y cuando esto ocurre la estructura del CSH se retrae considerablemente.

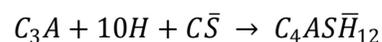
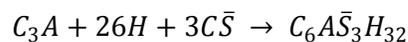
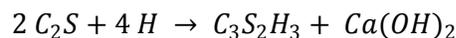
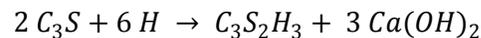
Agua combinada químicamente

Este agua forma parte integral de la estructura de varios de los productos de hidratación del cemento. No se pierde por secado sino por descomposición de los productos a los que está ligada.

2.2.2.2 Origen y desarrollo de la microestructura ⁽²⁷⁾

La pasta de cemento es el resultado de una serie de reacciones de hidratación que tienen lugar cuando una cantidad determinada de cemento se mezcla con una cantidad limitada de agua.

Las reacciones más importantes que ocurren son:



Las reacciones de hidratación del cemento comienzan inmediatamente luego del contacto del cemento con el agua, incluso de modo violento, disminuyendo su actividad en un corto período de tiempo. Posteriormente, la velocidad de hidratación experimenta un nuevo incremento, seguido ya por el fraguado de la pasta, en donde la movilidad del sistema, hasta ese momento plástica, se pierde. Este comportamiento se observa en la figura 2.6, que representa la evolución calorífica respecto al tiempo del proceso de hidratación del cemento Pórtland.

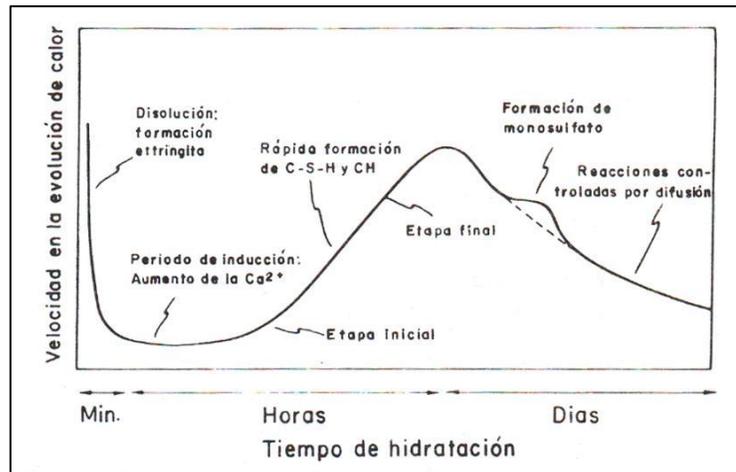


Figura 2.6: Evolución del calor de hidratación del cemento Pórtland. (27)

El desarrollo de la estructura de los productos de hidratación se puede dividir en tres etapas fundamentales:

Etapa inicial: el foco de actividad está fundamentalmente concentrado en la superficie de granos de cemento y en el agua de mezcla más cercana a estas superficies.

Etapa intermedia: los productos de hidratación se desarrollan y depositan en las superficies de los granos de cemento y en el interior de los espacios inicialmente rellenos de agua, y comienza a conformarse una estructura coherente.

Etapa final: el esqueleto estructural se rellena con productos de hidratación que provienen del interior de los granos de cemento por un mecanismo de difusión del agua a través de los productos de hidratación.

Las dos primeras etapas se dan durante las primeras horas de hidratación, mientras que la última comprende la mayoría del período real de hidratación activa.

Un esquema de estas tres etapas puede ser visualizado en la figura 2.7.

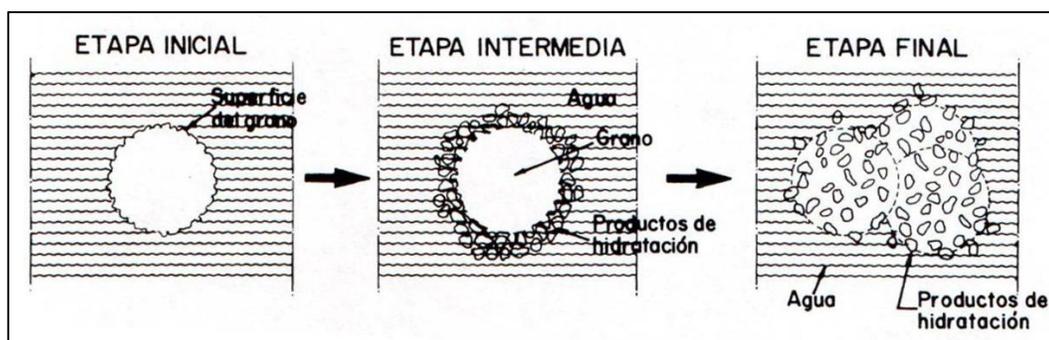


Figura 2.7: Etapas en la hidratación del cemento. (27)

A continuación se va a profundizar en cada una de las etapas indicadas.

Etapas inicial

La pasta de cemento fresca tiene una estructura denominada floculante, por acción de tensiones superficiales que producen flóculos de granos. Dicha estructura es el resultado del contacto entre porciones de granos de clínker y moléculas de agua.

A la vista de esto, se comprende que la naturaleza de las superficies de los granos de cemento influyen de modo tan profundo en esta etapa inicial. Realmente no es mucho lo que se conoce sobre estas superficies. En principio, se podría esperar que estuvieran constituidas de los compuestos C_3S y C_2S , más o menos dispersas en la matriz vítrea del clínker. Además, parte de las superficies de los granos podrían estar contaminadas con depósitos de yeso debido a la molienda conjunta del yeso con el clínker.

La disponibilidad local de yeso impregnado sobre la superficie del cemento, junto con alguna exposición superficial de C_3A , puede hacer que la primera respuesta reconocible de la hidratación sea la formación de una película amorfa de composición próxima a la de AF_t . Así mismo, en esta etapa se inicia la hidratación de los silicatos cálcicos, y muy especialmente del C_3S , que tiene como consecuencia el desarrollo de gel CSH y cristales hexagonales de CH.

Etapas intermedia y final

Al cabo de 1 día de hidratación, los granos de cemento en el seno de la pasta y fundamentalmente en las zonas próximas a los áridos presentan a su alrededor una pequeña corteza de aproximadamente 1 $[\mu m]$ de espesor, que recubre la superficie de los granos y que dificulta la hidratación en el interior de los granos, disolviéndose hacia el exterior, generando un "gap" en esta corteza (en algunos casos puede quedar una esfera completamente hueca).

Las cortezas están constituidas de una capa interna de cristales de CH en una estructura abierta, depositados sobre el grano de cemento, con una capa externa de gel CSH. Además se encuentran en esa zona cristales de las fases AF_t y AF_m orientados hacia el interior de la corteza.

El desarrollo de la microestructura que concierne a la deposición de productos de hidratación en los espacios capilares y entre los granos de clínker es el siguiente: inicialmente fibras de CSH y varillas de etringita se complementan rápidamente con cristales de CH; entonces empiezan a aparecer zonas de CSH tipo II y las cortezas adyacentes empiezan a enredarse unas con otras. Los planos delgados de CH crecen y se hacen gruesos y empieza a observarse la característica capa de $Ca(OH)_2$.

Posteriormente, comienza la deposición de gel CSH tipo III que se superpone sobre los depósitos masivos de CH, encajándose unos con otros, con lo que se dificulta la posibilidad de distinguir los contornos de las partículas, especialmente si la relación agua/cemento es baja.

Estos procesos descritos varían en los detalles microestructurales de un sitio a otro dentro de la misma pasta. Además, la velocidad de deposición de los productos está condicionada con el cemento usado y las condiciones ambientales locales.

En definitiva, la extensión a la cual la morfología adquiere cierta estabilidad no es con frecuencia uniforme sobre la totalidad de la pasta; consecuentemente en un momento dado pueden coexistir en una misma pasta varias morfologías.

2.2.2.3 Relación entre microestructura y la resistencia mecánica de la pasta de cemento (27)

La resistencia que adquiere la pasta de cemento endurecido es una consecuencia de la existencia de las fuerzas atractivas de Van der Waals. Los pequeños cristales de CSH, los de AF_t , AF_m y los hidratos hexagonales de aluminato cálcico tienen elevadas superficies específicas que favorecen la existencia de este tipo de fuerzas atractivas, de modo que tienen un gran poder adhesivo, no sólo entre sí, sino también con cristales de baja superficie específica como el CH, granos de clinker anhidro y partículas inertes de árido.

Es un hecho conocido que en los sólidos hay una relación inversa entre porosidad y resistencia. La resistencia reside en la parte sólida del material; mientras que los poros afectan negativamente a la misma.

Powers estableció la relación $S = kx^3$; donde S corresponde a la resistencia a compresión, x a la relación sólidos/espacio disponible, y k es una constante (34.000 [psi]). (37)

Mediante esta relación es posible calcular el efecto del incremento de la relación agua/cemento sobre la porosidad, y consecuentemente sobre las resistencias mecánicas. La relación entre resistencia a compresión y porosidad puede ser visualizada en la figura 2.8.

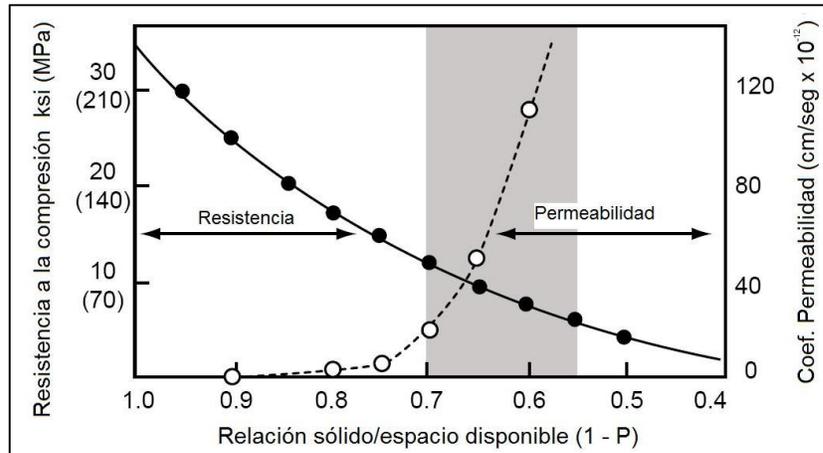


Figura 2.8: Influencia de la razón agua/cemento y del grado de hidratación sobre las resistencias mecánicas y permeabilidad de la pasta. (9)

La modelización de las relaciones porosidad - resistencia es de difícil solución en la actualidad. Varios son los motivos, entre ellos cabría destacar:

- Las fuerzas atractivas que unen los distintos productos de hidratación son de naturaleza variable y permanecen indeterminadas.
- Es difícil establecer una frontera exacta entre los tipos de poros que afectan y los que no afectan a la resistencia. Unido a esto, está la dificultad de determinar con exactitud el tamaño de los poros con las técnicas de investigación disponibles en la actualidad.
- La información disponible sobre la concentración de microfisuras y tensiones en las zonas de inhomogeneidades (por ejemplo, interfaz CSH y CH) es poca. Dichas microfisuras pueden incrementarse por fenómenos ambientales tales como cambios de humedad y temperatura.
- En materiales homogéneos, sometidos a cargas de tracción, las fisuras se propagan de manera unidireccional, sin embargo, en materiales heterogéneos, estas microfisuras tienen unos caminos de propagación de alta complejidad, y hoy en día no es posible modelarlos aplicando las teorías de mecánica de fractura.

2.2.3 Microestructura de la zona interfacial

Sin duda la zona más importante de la microestructura de la pasta de cemento en el hormigón es la zona de interacción próxima a la superficie de contacto con los áridos.

Considerando un espesor promedio de 50 [μm] y que el espesor medio de pasta de cemento entre dos partículas de árido contiguas varía entre 80 y 150 [μm], entonces la proporción de zona interfacial sería del orden de 30% de pasta, lo que es relevante, si se toma en cuenta que puede ser la zona que controla la resistencia mecánica y la durabilidad del hormigón y cuyas propiedades dependen de la razón agua/cemento, la granulometría de los áridos y la distribución de éstos en el hormigón. ⁽³⁴⁾

2.2.3.1 Reacciones químicas en la interfaz árido – pasta de cemento ⁽²⁷⁾

Algunas reacciones químicas pueden producirse entre el árido y la pasta de cemento. Dependiendo de cada caso, estas reacciones pueden mejorar o empeorar la unión entre los dos componentes.

Reacción árido - álcali

Ciertos fenómenos de expansión, fisuración, pérdidas de resistencias, elasticidad y durabilidad producidos en el hormigón pueden ser consecuencia de la reacción entre los iones alcalinos procedentes del cemento Pórtland (o de otras fuentes) y los componentes silíceos que se pueden encontrar en los áridos. En la literatura moderna, este fenómeno es conocido con el nombre de reacción árido - álcali.

En el caso de los áridos de naturaleza dolomítica, la desdolomitización de dichos áridos, por reacción con disoluciones alcalinas, produce la neoformación de brucita, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, y una regeneración del hidróxido alcalino, lo que puede dar lugar a una continuidad del proceso.

Otros factores, aparte de la naturaleza mineralógica y/o petrográfica de los áridos que influyen en la reacción árido - álcalis son:

- ✓ Contenido y tamaño de las partículas de áridos reactivos: Si el contenido de sílice reactiva es superior al 35%, la reacción no se produce, ya que las partículas reactivas reducen rápidamente la concentración de álcalis, impidiendo la formación de un gel. Si el tamaño del árido es muy pequeño, la reacción se produce antes de la formación del gel, evitándose la degradación.
- ✓ Concentración de álcalis en la fase líquida del hormigón: El límite máximo de álcalis en el cemento, establecido por las diferentes normas internacionales, oscila alrededor del 0.6% en Na_2O .
- ✓ Tiempo y humedad: La reacción árido - álcalis es un fenómeno lento y prácticamente inofensivo si no hay humedad en las zonas de contacto árido - pasta de cemento. Si por cualquier causa, el agua penetra en el hormigón, la reacción puede desencadenarse y llevar a la estructura a su total destrucción.
- ✓ Temperatura: La temperatura acelera esta reacción. El empleo de cementos con elevados calores de hidratación puede favorecer la reacción árido - álcalis.

Reacción $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – árido

La reacción entre $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y determinados tipos de áridos que incluyen arcillas y feldespatos en su composición mineralógica, da lugar a la formación de hidrogranates (aluminio - silicatos de calcio hidratados), silicato cálcico y álcalis libres. Estos productos se disponen alrededor de los áridos de manera que disminuyen la adherencia entre el árido y la pasta de cemento, lo que puede conducir a una pérdida de la capacidad estructural del hormigón.

Los factores que afectan a esta reacción son los mismos ya descritos para la reacción árido - álcalis, es decir:

- ✓ Mineralogía, grado de alteración y tamaño del árido.
- ✓ Contenido de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la fase líquida del hormigón.
- ✓ Tiempo y humedad.
- ✓ Temperatura.

Reacción entre el C_3A del cemento Pórtland y el árido

El C_3A procedente del clínker de cemento reacciona con las piedras calizas cuando estas son utilizadas como árido. Las pastas de cemento pueden atacar la superficie de los áridos calizos, ataques que son visibles por el microscopio óptico a la edad de 1 día, observándose monocarboaluminatos cálcicos ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$).

La cantidad de este compuesto en la pasta decrece con la distancia al árido, así como al disminuir la relación agua/cemento. Esta reacción según los autores que la han estudiado, tiene un efecto positivo sobre el fenómeno de adherencia árido pasta de cemento.

2.2.3.2 Morfología de la interfaz árido – pasta de cemento ⁽²⁷⁾

En la actualidad, es comúnmente aceptado que en las proximidades del árido se desarrolla una microestructura de la pasta de cemento (con un espesor de unos 30 a 50 $[\mu\text{m}]$), diferente a la del resto del volumen de la pasta, aun en ausencia de reacciones químicas superficiales.

Esta zona de interfaz árido - pasta se caracteriza por tener una relación agua/cemento superior a la existente en el resto del volumen de la pasta, debido a efectos de exudación superficial en las caras del árido y pequeñas fisuras interconectadas.

En estudios preliminares se denominó a esta zona como zona de transición o aura de transición. Se describe como una región que se extiende radialmente hacia afuera desde la superficie del árido y se propaga gradualmente en la pasta de cemento. Su espesor aproximado es de unos 50 $[\mu\text{m}]$, y destaca por su elevada porosidad y elevado contenido en CH, que además posee una orientación preferencial con su eje perpendicular a la superficie del árido.

La pasta de cemento está formada por flóculos, cuasiesféricos de algunos cientos de micras, que son suficientemente fuertes como para resistir la dispersión por agitación mecánica mientras se amasa. En consecuencia, los granos de cemento se unen pobremente a las superficies de los áridos, dejando áreas extensas de alto contenido en agua tanto dentro de los flóculos como entre ellos.

Por la rápida sobresaturación del agua en iones Ca^{2+} y OH^- , se produce un depósito de una capa de CH sobre la superficie del árido, de un espesor de 0.5 μm . Esta capa de CH no aumenta de espesor con el tiempo, probablemente debido a la presencia de SiO_2 disuelto en el agua. Esto produce el segundo depósito que es de gel fibroso de CSH, con fibras perpendiculares a la superficie, y de un espesor de 0.5 μm . A estas dos capas se le conoce con el nombre de película dúplex.

Después de 2 ó 3 días, una segunda capa de CH, con un espesor de 3 μm , se deposita en el dúplex. Son cristales de CH apilados de modo paralelo con su eje orientado perpendicularmente a la citada película. Al mismo tiempo, se generan cristales más largos y tubulares de CH de eje paralelo a la película dúplex. Estos cristales de CH se extienden hacia la pasta y sólo gradualmente dan lugar a la microestructura usual del gel de CSH y CH de la pasta.

El espesor de la zona de transición prácticamente no cambia con el tiempo, ya que sólo depende del espesor de la capa del líquido que inicialmente mojaba al árido.

Monteiro y Mehta indican que la formación de etringita en las zonas próximas al árido juega un papel destacado en el desarrollo microestructural de la interfaz. Según estos autores, a 1 día de hidratación aparecen pronunciados depósitos de etringita en las regiones próximas a los áridos, disminuyendo su contenido según aumenta la distancia al árido. ⁽⁹⁾

En la figura 2.9 puede observarse la representación esquemática de la morfología de la interfaz árido - pasta de cemento propuesta por los autores anteriormente citados.

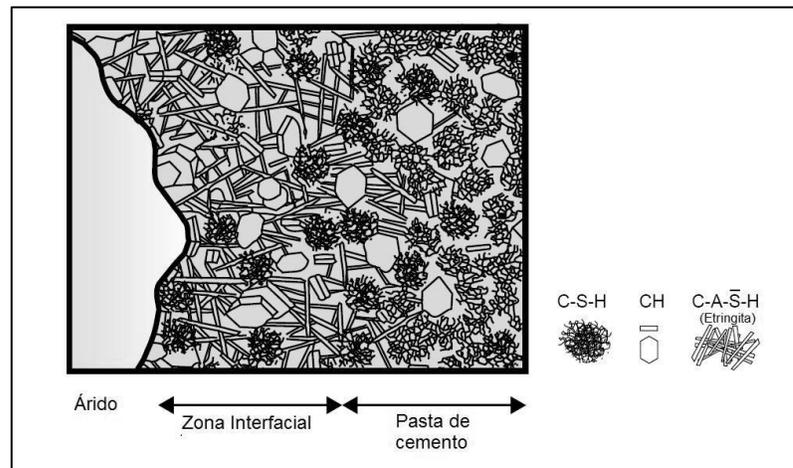


Figura 2.9: Representación esquemática de la interfaz árido – pasta de cemento. ⁽⁹⁾

Garboczi explica la morfología de la zona interfacial de transición del hormigón a través del efecto del empaquetamiento de partículas y el efecto del crecimiento de productos de hidratación por un solo lado. ^{(29) (30)}

El efecto del empaquetamiento de partículas se origina por el hecho de que las partículas no pueden empaquetarse tan juntas cerca de un plano de borde como en el espacio libre. Dado que el típico agregado es muchas veces más grande que una partícula de cemento, incluso para el agregado fino, localmente los bordes del agregado aparecen como planos alrededor de las partículas. Este empaquetamiento ineficiente causa que menos CSH y más poros estén presentes inicialmente cerca de la superficie del agregado, e incluso mucho después del término de la hidratación, esta condición persiste. El ancho de la zona interfacial estará en escala con el tamaño medio de las partículas de cemento. ^{(29) (30)}

El efecto del crecimiento por un solo lado se origina por lo siguiente. Si se considera una pequeña región del espacio de los poros capilares localizado en la masa de un mortero u hormigón, en promedio, hay un crecimiento de reactivos que viene desde dentro de esta pequeña región en todas direcciones, ya que las partículas de cemento se encuentran originalmente localizadas al azar e isotrópicamente. Tomando entonces una región pequeña similar del espacio de los poros capilares, pero localizada muy cerca de la superficie de un agregado, el crecimiento de fases hidratadas viene desde la región del lado del cemento, pero no desde el lado del árido.⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾

Ambos efectos producen un aumento en la porosidad de la zona interfacial, lo que significa una disminución en la resistencia mecánica de la zona.

2.2.3.3 Resistencia de la interfaz y su influencia en las propiedades del hormigón ⁽²⁷⁾

Al igual que en la pasta de cemento, son las fuerzas atractivas de Van der Waals las causantes de la adhesión entre los productos de hidratación y los áridos. La textura superficial del árido tiene más influencia sobre la unión física, árido - pasta que la composición mineralógica del mismo. Se ha observado que a edades tempranas los hormigones que contienen áridos con superficie rugosa tienen altas resistencias mecánicas (especialmente a tracción). A mayores edades, cuando tiene lugar la interacción química entre el árido y la pasta de cemento, la influencia de la textura superficial del árido en las resistencias del hormigón es de menor importancia.

Independientemente de estos factores indicados, la resistencia intrínseca de la zona de transición depende principalmente de los siguientes aspectos.

a) Volumen y tamaño de los poros

A primeras edades, el volumen y el tamaño de los poros de la zona de transición es mayor que en el resto de la pasta de cemento, debido a la mayor relación agua/cemento que existe en las zonas próximas a los áridos. Este fenómeno tiene como consecuencia que en la interfaz, la pasta de cemento sea más débil desde el punto de vista de la resistencia mecánica. (figura 2.10).

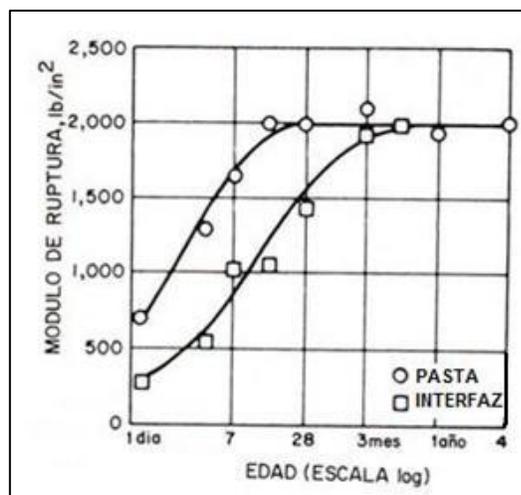


Figura 2.10: Efecto del tiempo sobre las resistencias en la zona de transición y en la pasta de cemento. ⁽²⁷⁾

A edades superiores, sin embargo, la resistencia de la zona de transición puede aumentar y superar incluso a la de la pasta de cemento (figura 2.10). Esto se debe a que se puede producir la cristalización de nuevos productos que reducen el número y tamaño de los poros, y el contenido de hidróxido cálcico.

b) Contenido y orientación de los cristales de CH

La interfaz, como ya se ha indicado en la descripción de su morfología, es una zona muy rica en cristales grandes de CH. Es sabido que dichos cristales son menos adherentes y resistentes que los CSH, fundamentalmente debido a su menor superficie específica.

La orientación preferencial de los cristales de CH en la zona de transición favorece, así mismo, la propagación de microfisuras.

c) Presencia de microfisuras

La cantidad de microfisuras presentes depende de varios factores, tales como:

- Tamaño y granulometría del árido.
- Contenido de cemento.
- Relación agua/cemento.
- Grado de consolidación del hormigón fresco.
- Condiciones de curado.
- Humedad ambiental.
- Historia térmica del hormigón.

La microestructura de pastas de cemento hidratadas a altas temperaturas está marcada por la irregular distribución de los productos de hidratación y consecuentemente, un sistema de poros interconectados de mayor tamaño. ⁽³⁵⁾

Áridos de gran tamaño, con formas alargadas y textura plana y lisa son propensos a que se forme, durante la compactación del hormigón, una capa de agua alrededor de ellos, superior a la que se origina en áridos de menor tamaño y textura más rugosa (figura 2.11). Como consecuencia de esto, en los primeros se genera una zona de transición más susceptible a la fisuración cuando es sometida a fuerzas de tracción originadas por movimientos diferenciales producidos entre el árido y la pasta de cemento. Estos movimientos diferenciales normalmente aumentan durante el secado y enfriamiento del hormigón. Es decir, las microfisuras de la zona de transición pueden producirse incluso antes de que la estructura haya sido sometida a cualquier tipo de esfuerzo. Obviamente, toda clase de impacto, aunque sea de pequeño grado (fenómenos de retracción por secado y cualquier carga aplicada de cierta entidad), tendrá consecuencias en el tamaño y número de microfisuras en la zona de transición. ⁽²⁸⁾

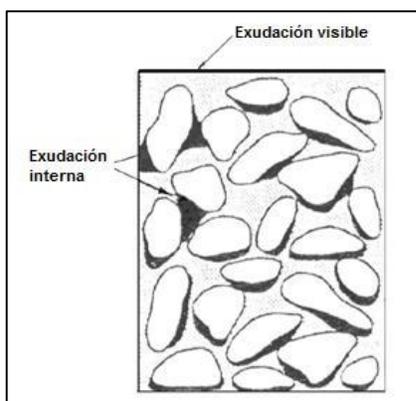


Figura 2.11: Efecto del tamaño y forma de los granos del árido sobre la acumulación de agua y dimensiones de la interfaz árido – pasta de cemento. (8)

Por las tres razones expuestas (volumen y tamaño de poros, contenido y orientación de los cristales de CH y presencia de microfisuras), y muy especialmente por la última, la interfaz árido - pasta de cemento es la zona más débil del hormigón endurecido. La presencia de la zona de transición hace que el hormigón se fracture a niveles de carga considerablemente más bajos que las resistencias de cualquiera de sus dos componentes principales (pasta de cemento y árido).

No son precisos niveles de energía muy elevados para propagar las fisuras o microfisuras ya existentes en la zona de transición.

En la figura 2.12 aparecen esquematizadas cuatro etapas que describen el comportamiento del hormigón sometido a una carga. Por debajo de un 30 % de la resistencia última (etapa 1) las microfisuras de la zona de transición (ya existentes previamente) permanecen estables, haciendo que la curva carga - deformación sea lineal.

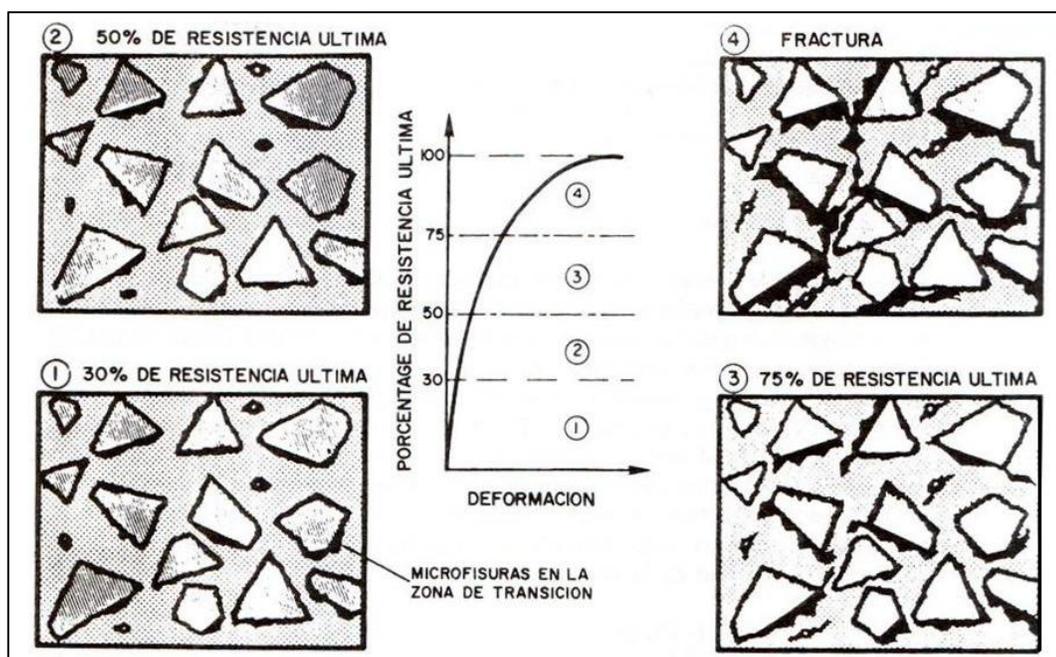


Figura 2.12: Representación esquemática del comportamiento carga – deformación en el hormigón bajo compresión uniaxial. (27)

Por encima de este 30 % de la resistencia última, y como consecuencia del incremento de carga aplicada, las microfisuras de la zona de transición aumentan en longitud, anchura y número. Esto conlleva a una disminución de la relación carga/deformación que provoca que su correspondiente curva se desvíe de una línea recta (etapa 2). Con valores próximos al 50 % de la resistencia última, el sistema de microfisuración de la zona de transición es aún estable, y se empiezan a producir las primeras fisuras en la matriz.

Alrededor del 75 % de la resistencia última (etapa 3) no sólo el sistema de fisuras de la zona de transición se hace inestable sino que también se produce la proliferación y propagación de las fisuras en la matriz, haciendo que la curva carga/deformación se aleje aún más de la línea recta inicial.

Por encima del 75 % (etapa 4) al incrementar la carga se producen deformaciones mayores que indican que el sistema de fracturas está interconectado, haciéndose continuo, debido a la rápida propagación de las fisuras existentes tanto en la zona de transición como en la matriz.

Se necesita una energía considerable para la formación y propagación de las fisuras de la matriz bajo cargas de compresión; mientras que bajo cargas de tracción, las fisuras se propagan mucho más rápidamente a menores niveles de energía. Esta es la razón por la que el hormigón es frágil a tracción y robusto a compresión.

2.2.3.4 Efecto de las adiciones en la microestructura en la interfaz ⁽²⁷⁾

La microestructura de la zona de transición experimenta algunos cambios sensibles cuando una parte del cemento Pórtland es reemplazada por otros componentes cementíceos. Así por ejemplo las cenizas volantes sílico - aluminosas y en general las puzolanas naturales finamente molidas absorben agua, disminuyendo la fluidez de la pasta en las zonas próximas a los áridos, lo que motiva una reducción en el espesor de la zona de transición. Las cenizas ricas en calcio, en cambio, actúan como plastificantes incrementando la fluidez y consecuentemente el espesor de la interfaz.

La presencia de escorias de alto horno como componentes de adición al cemento produce dos efectos significativos sobre la microestructura de la interfaz, por un lado se incrementa el espesor de la zona de transición, y por otro disminuye el grado de orientación de los cristales de CH.

El primer fenómeno es atribuido a que al principio de la hidratación la cantidad de agua disponible es superior a la requerida con un cemento Pórtland normal. El segundo aspecto se ha justificado en base a que los granos de escoria actúan como micro - áridos alrededor de los cuales se produce un incremento local de la relación agua/cemento, precipitando alrededor de dichos granos cristales de etringita y portlandita. Como resultado, la cantidad de cristales de CH que se pueden disponer alrededor de las partículas de árido es menor a la existente con un cemento Pórtland sin adiciones.

Aditivos minerales como humos silíceos o cenizas volantes pueden también ser incorporados, y su efecto en las propiedades de la zona interfacial depende del tamaño de las partículas y de su reactividad con el hidróxido de calcio. El tamaño de las partículas del aditivo mineral controla el espesor del efecto de empaquetamiento en las superficies de las partículas de áridos. La reactividad controla cuanto hidróxido de calcio puede ser consumido y convertido en CSH. Esto origina una reducción de la capa interfásica rica en CH, en una zona estrecha que se extiende sólo unas pocas micras desde el árido. Suponiendo una dispersión adecuada, podemos encontrar, que la efectividad de los aditivos minerales en la mejora de la microestructura de la zona interfacial aumenta con el incremento de la reactividad y con su tamaño decrece. ⁽²⁹⁾

Investigaciones de Bentz mostraron que las partículas de humos de sílice reducen el espesor inicial de la zona interfacial al reaccionar y convertir el hidróxido de calcio en CSH. Así, esta zona es más delgada y parecida a la pasta de cemento de la matriz. Las cenizas volantes en la misma dosis son menos beneficiosas debido a que son partículas de mayor tamaño y menor actividad puzolánica, por lo que deben ser usadas en mayores dosis. ⁽³⁵⁾

Los materiales cementíceos suplementarios, también denominados aditivos minerales, mitigan el efecto de la hidratación a altas temperaturas. Cao y Detwiler encontraron que humos de sílice y escorias son efectivos en la homogenización de la distribución de las pastas de cemento hidratadas. Si bien el volumen total de poros es esencialmente el mismo con o sin aditivo mineral, el promedio del tamaño de los poros se reduce significativamente. ⁽³⁵⁾

2.3 Hormigones con alto contenido de adiciones puzolánicas

2.3.1 Introducción

El considerable daño medioambiental y los altos costos de la fabricación del cemento, han llevado a buscar otros materiales cementíceos que permitan un buen comportamiento tanto en las propiedades mecánicas como en la durabilidad del hormigón.

La puzolana corresponde a un material silíceo o silíceo-aluminoso que posee en sí mismo poca o ninguna propiedad cementante, pero que en forma finamente pulverizada y en la presencia de humedad, reaccionará químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias, para formar compuestos que poseen propiedades cementantes. Según su origen, los materiales puzolánicos se clasifican en naturales o artificiales.

En Chile, existen grandes yacimientos de puzolana de tipo riolítico, provenientes de flujos piroclásticos que fueron emplazados durante una erupción o una serie de erupciones cercanamente espaciadas. Uno de esos yacimientos se encuentra en la comuna de Pudahuel en el kilómetro 14 de la ruta 68 y corresponde al lugar de origen de la puzolana utilizada para la fabricación de los cementos experimentales de este trabajo. Esta mina es la principal proveedora de puzolana para la Planta Cerro Blanco de Cementos Polpaico. ⁽¹²⁾

El uso de altos contenidos de puzolana como material cementíceo suplementario reduciría la velocidad de reacción, los niveles de resistencia a temprana edad y, a largo plazo, la resistencia del hormigón, pero se obtendría un material más durable. Esto disminuiría los costos y la energía utilizada en la fabricación del cemento y haría del hormigón un material más amigable con el medio ambiente.

A modo de comparación, se detallará las propiedades de los hormigones con altos contenidos de cenizas volantes, puzolanas naturales, para conocer las propiedades que varían con el complemento de adiciones de puzolana en el material cementíceo. Las cenizas volantes presentan reacciones puzolánicas en la hidratación, pero los productos finales son distintos a los que se obtienen de la puzolana natural.

2.3.2 Propiedades de los hormigones con contenido de adiciones puzolánicas

Propiedades en estado fresco

Las propiedades del hormigón en estado fresco dependen fundamentalmente de las características de los materiales componentes y las proporciones utilizadas, destacándose la influencia de los agregados (forma, textura y distribución de tamaños de partículas) que suelen ocupar más del 70 % del volumen del hormigón. En un segundo plano, se pueden mencionar algunas otras características del cemento utilizado, como la finura de éste, los componentes del material cementíceo y los aditivos utilizados.

Algunas de las propiedades del hormigón fresco que han sido analizadas en distintos estudios son la densidad, la pérdida de trabajabilidad y de contenido de aire, la exudación y el tiempo de fraguado.

Naik, Kraus, Ramme y Siddique analizaron muestras con contenidos de cenizas volantes que iban desde un 19 % a un 70 %, las que mostraron densidades similares, en el rango de 2304 [kg/m³] a 2352 [kg/m³]. (14)

Bouzoubaâ, Fournier, Malhotra y Golden estudiaron hormigones con 0, 45 y 55% de cenizas volantes. La pérdida de trabajabilidad y la estabilidad del contenido de aire en el tiempo se estudiaron midiendo el asentamiento de cono y el contenido de aire a los 35 y 65 minutos después de terminada la mezcla del hormigón. Los resultados mostraron que las muestras con cenizas volantes tuvieron una importante pérdida de trabajabilidad y de contenido de aire. La muestra sin agregado tuvo aumentos en el asentamiento de cono, pero su contenido de aire se mantuvo estable en el tiempo. (15)

El mismo estudio indicó que en mezclas de igual razón agua/cemento, un mayor contenido de cenizas volantes conduce a aumento en la exudación y en los tiempos de fraguado inicial y final. Además se encontró que el incremento de la temperatura es más lento en hormigones con cenizas volantes, debido al menor contenido de cemento y a que la reacción puzolánica es más lenta que la hidratación del cemento. (15)

Según Mehta, el comportamiento menos consistente de los hormigones con cenizas volantes tiene varios motivos. Primero, que las finas partículas de cenizas volantes absorben las cargas eléctricas opuestas existentes en la superficie de las partículas de cemento, lo que las previene de su floculación. Las partículas de cemento son así efectivamente dispersadas y mejorarán su interacción con el agua, lo que significa que el sistema requerirá menos agua para lograr una trabajabilidad dada. Segundo, la forma esférica y la superficie lisa de las partículas de ceniza volante ayuda a reducir la fricción inter-partícula y así facilitar su movilidad. Tercero, el "efecto de empaquetamiento de partículas" (la ceniza volante, dado que contribuye con pequeñas partículas, rellena los espacios intersticiales de la mezcla) es también responsable de reducir la demanda de agua en el sistema. (16)

En el análisis realizado por Crouch, Hewitt y Byard a hormigones con contenidos de cenizas volantes de 25% y 50%, se encontró que la trabajabilidad y el contenido de aire fueron similares. No así los tiempos de fraguado, que se retrasaron más en las muestras con mayor contenido de suplemento cementíceo. (17)

Kosior-Kazberuk y Lelusz analizaron hormigones con 0 %, 10 %, 20 % y 30 % a 2, 28, 90 y 180 días para 3 tipos de cenizas volantes con diferente actividad puzolánica. En estos tres tipos de hormigones, el tiempo de fraguado aumenta al incrementarse el contenido de adiciones sobre un 20%, como se observa en la figura 2.13: (19)

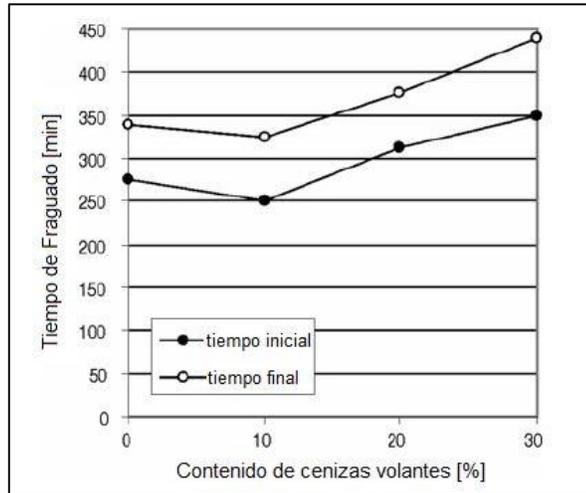


Figura 2.13: Tiempo de fraguado versus contenido de adición de cenizas volantes. (19)

Propiedades del hormigón endurecido.

Las propiedades del hormigón endurecido dependen fundamentalmente de las características de los materiales que lo componen, de las proporciones de mezcla utilizadas y de la forma en que éste fue curado una vez colocado.

Resistencia mecánica

Siddique, Prince y Kamali hicieron pruebas de resistencia a la compresión en muestras con 0, 35, 45, 55 y 65% de cenizas volantes a 7, 28, 91 y 365 días, de las que obtuvieron los siguientes resultados indicados en la figura 2.14.

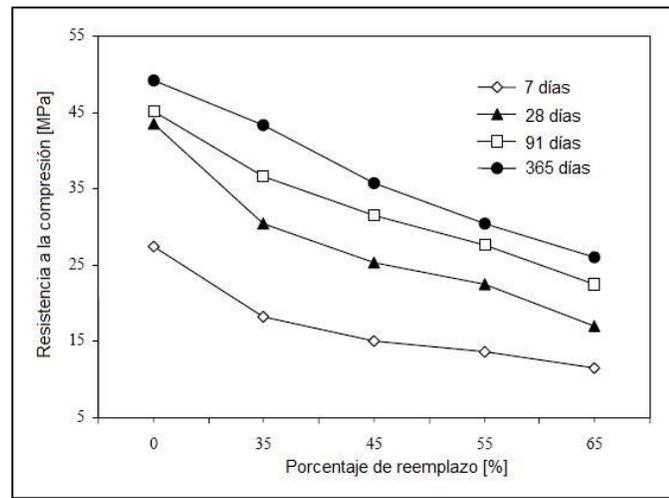


Figura 2.14: Resistencia versus contenido de adición de cenizas volantes. (18)

Se observa que la reducción en la resistencia a la compresión en todas las mezclas siguen una tendencia similar, siendo mayor la reducción de resistencia para mayores niveles de reemplazo con cenizas volantes. Además, se presenta un significativo incremento de resistencia con la edad por efecto de las reacciones puzolánicas en el tiempo. (18)

Kosior-Kazberuk y Lelusz analizaron hormigones con 0, 10, 20 y 30% de adición de cenizas volantes, de distintas características de reactividad, a los 2, 28, 90 y 180 días. Los resultados mostraron que se pueden alcanzar resistencias a compresión mayores en hormigones con adición luego de 90 y 180 días. Dependiendo de la actividad puzolánica de la ceniza volante, el aumento de resistencia en el tiempo puede variar. En este estudio se analizó las actividades puzolánicas basadas en la resistencia a compresión de morteros con 75% de cemento y 25 % de cenizas volantes, comparándolos con morteros sin suplemento cementíceo. Los valores obtenidos son los indicados en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Actividad puzolánica de los materiales cementíceos utilizados.

Índice de Actividad Puzolánica	Razón de resistencia a la compresión entre cemento con y sin puzolana [%]		
	C1	C2	C3
después de 28 días	95	81	85
después de 90 días	106	106	90

Las resistencias obtenidas se observan en las figuras 2.15, 2.16 y 2.17: (19)

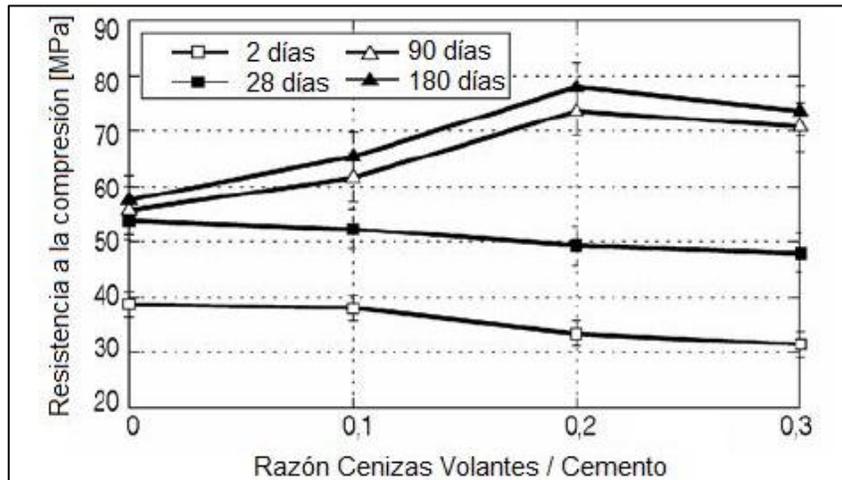


Figura 2.15: Resistencia para hormigón C1 versus razón cenizas volantes/cemento. (19)

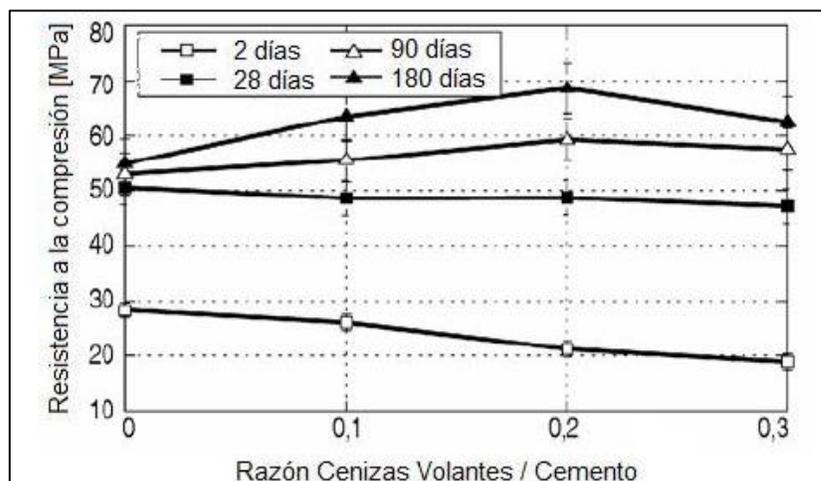


Figura 2.16: Resistencia de hormigón C2 versus razón cenizas volantes/cemento. (19)

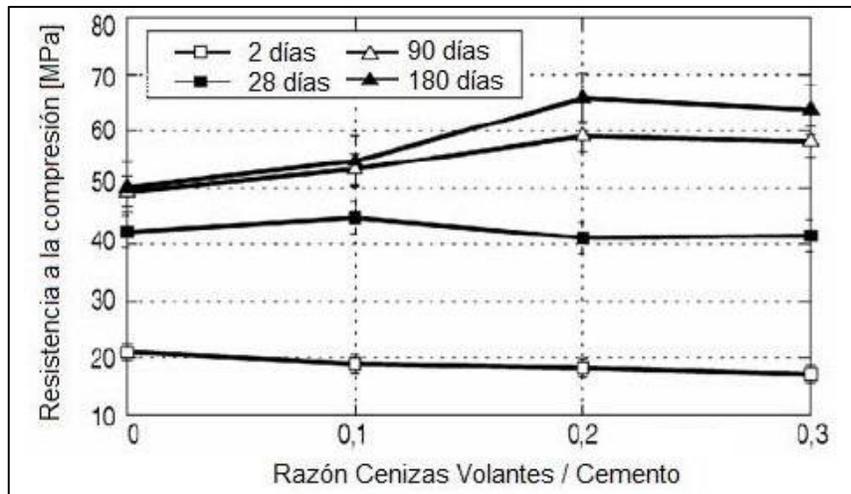


Figura 2.17: Resistencia de hormigón C3 versus razón cenizas volantes/cemento.⁽¹⁹⁾

Naik, Kraus, Ramme y Siddique analizaron muestras con contenidos de cenizas volantes que iban desde un 19 % a un 70%. Concluyeron que si bien a los 28 días los hormigones con mayor contenido de adiciones presentan bajas resistencias a la compresión, a largo plazo (alrededor de 7 años) las resistencias aumentan en aproximadamente un 70 %. ⁽¹⁴⁾

Igual comportamiento en la resistencia a la compresión fue hallado por Bouzoubaâ, Fournier, Malhotra y Golden, que estudiaron hormigones con 0, 45 y 55% de cenizas volantes. En cuanto a la resistencia a la tracción y a la flexión, sus resultados mostraron que a los 28 días las muestras con 0% y 45% de cenizas volantes tenían resistencias similares, no así la muestra con 55% de material suplementario que obtuvo resistencias mayores. ⁽¹⁵⁾

Kosior-Kazberuk y Lelusz analizaron hormigones con 0, 10, 20 y 30% a 2, 28, 90 y 180 días para cenizas volantes de 3 distintas actividades puzolánicas. Los resultados mostraron que se pueden alcanzar resistencias a la flexión mayores en hormigones con adición respecto a los hormigones de referencia, luego de 90 y 180 días. Dependiendo de la actividad puzolánica de la ceniza volante, el aumento de resistencia a la flexión en el tiempo puede variar. A continuación se presentan las curvas de incremento de resistencia a la flexión respecto a una muestra de control a los 28 días para hormigones con distinta actividad puzolánica versus la razón de cenizas volantes en el material cementíceo. ⁽¹⁹⁾

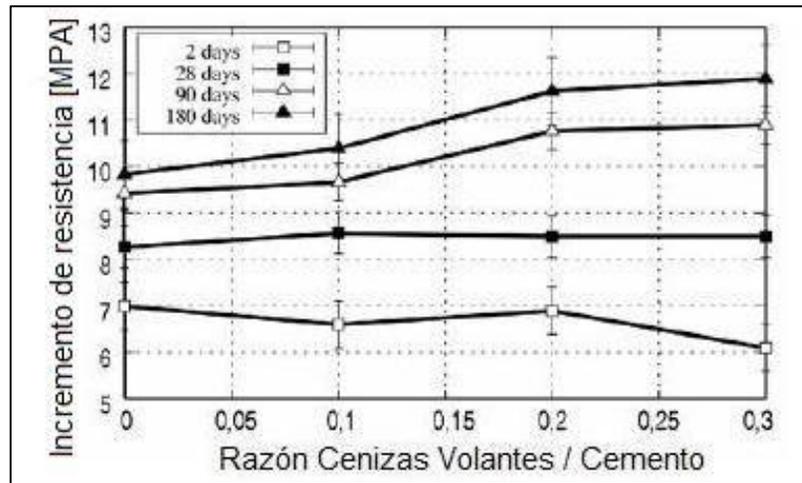


Figura 2.18: Incremento de la resistencia a la flexión para hormigón C1 razón cenizas volantes/cemento. (19)

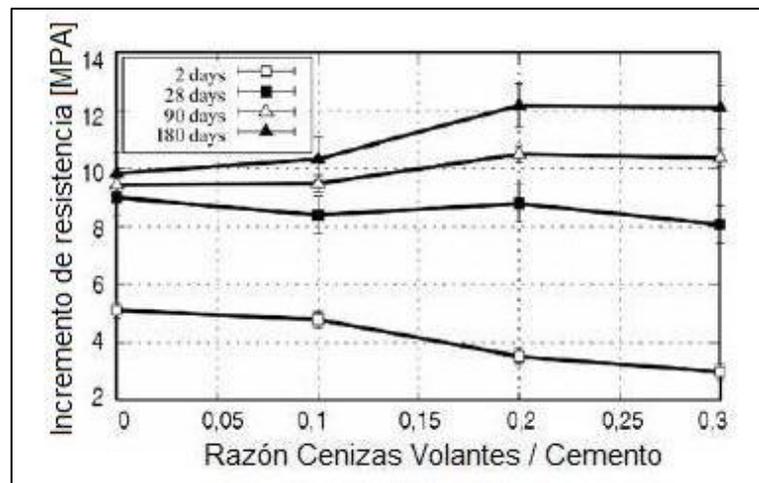


Figura 2.19: Incremento de la resistencia a la flexión para hormigón C2 con distinto contenido de cenizas volantes. (19)

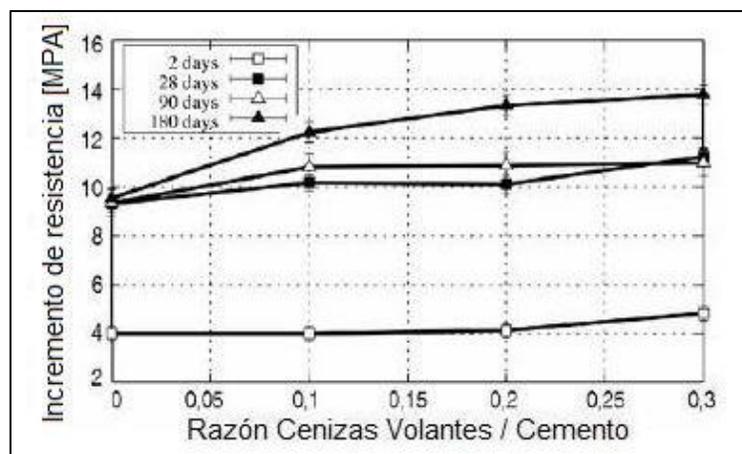


Figura 2.20: Incremento de la resistencia a la flexión para hormigón C3 con distinto contenido de cenizas volantes. (19)

Durabilidad

La durabilidad es una de las propiedades más importantes del hormigón. Se conoce como la capacidad de resistir la acción del medioambiente, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro bajo las condiciones de servicio impuestas. Para completar esta definición debe incluirse el concepto de serviciabilidad en el ciclo de vida para el cual fue proyectado. Entre las propiedades del hormigón que contribuyen con la durabilidad se destacan la permeabilidad, resistencia al ataque de sulfatos e impermeabilidad al ion cloruro.

Según el estudio de Lammertij y De Belie, que analizó la porosidad, permeabilidad a los gases y la carbonatación de hormigones y su relación con los contenidos de cenizas volantes (se estudiaron hormigones con 0, 35, 50 y 67% de cenizas volantes y razón agua/material cementíceo de 0.4), la permeabilidad disminuye con el nivel de reemplazo del material suplementario.

Además se observó un considerable aumento en la porosidad en muestras con contenido de cenizas volantes en el material cementíceo entre el primer y tercer mes de edad, como resultado de la reacción puzolánica y la transformación de poros capilares en poros de gel de tobermorita. La permeabilidad a gases a los tres meses aumentó con el incremento de cenizas volantes en el material cementíceo, pero no es posible atribuir a la adición este comportamiento debido a que también existen otros factores que influyen. La cantidad de material carbonatable disminuyó con el incremento de cenizas volantes en el material cementicio. ⁽²⁰⁾

Ruiz-Tagle realizó el año 2005 un estudio de susceptibilidad a la carbonatación de hormigones fabricados con cementos chilenos. De análisis de cementos Pórtland, Pórtland puzolánicos, puzolánicos y siderúrgicos, se concluyó que la carbonatación es mayor cuando el contenido de adición aumenta, produciéndose mayor susceptibilidad cuando la adición es puzolánica. Además, el comportamiento de los hormigones con cemento siderúrgico fue similar al de los hormigones elaborados con cemento Pórtland puzolánico. Conjuntamente, se investigó el efecto de la adición de cenizas volantes al material cementíceo, cuyos hormigones presentaron menor carbonatación que los fabricados con cemento de igual clínker que incorpora la misma proporción de puzolana natural. ⁽³⁸⁾

Naik, Kraus, Ramme y Siddique analizaron la resistencia a la penetración de cloruros en hormigones con contenidos de cenizas volantes que iban desde 19% a 70%, los que mostraron un excelente comportamiento. ⁽¹⁴⁾

Cortés estudió la resistencia a la penetración de iones cloruros en hormigones razones agua/cemento 0.4, 0.5 y 0.6, elaborados con cemento comercial de variado contenido de puzolana natural y microsílíce. Los ensayos revelaron una reducción en la permeabilidad del hormigón frente a los cloruros cuando el material cementante contiene adiciones, resultando sin embargo, más efectiva, la reducción de la razón agua/cemento cuando el contenido de adiciones es bajo. Se determinó además que la eficiencia de las adiciones minerales es mayor al aumentar la razón agua/cemento. ⁽³⁹⁾

Carrasco analizó la penetración de cloruros en hormigones fabricados con cementos comerciales y experimentales de razones agua/cemento 0.4 y 0.45, con diferentes contenidos de puzolana natural y microsílíce en el material cementíceo. Los resultados mostraron una mayor penetración de cloruros en los hormigones con adiciones puzolánicas, para distintas finuras de ellas, y que la microsílíce es efectiva para reducir la permeabilidad del hormigón a estos. ⁽⁴⁰⁾

Bouzoubaâ, Fournier, Malhotra y Golden analizaron también la penetración de cloruros en hormigones con 45 y 55% de cenizas volantes, los que obtuvieron una significativamente menor penetración que la muestra con 0% de material cementíceo suplementario. A los 91 días, la carga total que pasó fue menor que 700 coulombs para las muestras con cenizas volantes, mientras que en la muestra sin complemento, la carga que pasó fue aproximadamente 4000 coulombs. Esto es principalmente debido al hecho de que la pasta hidratada con contenido de cenizas volantes posee una estructura de poros más fina. (15)

Bargaheiser y Butalia midieron la permeabilidad a los cloruros de muestras de hormigón con contenidos de cenizas volantes de 0, 15, 30 y 50%. La durabilidad en este aspecto mejora significativamente con el incremento de cenizas volantes en el material cementíceo del hormigón. Incrementando el tiempo de curado de 6 meses a un año, la permeabilidad de muestras de referencia se reduce en un 4.75%, mientras que en muestras con cenizas volantes se reduce entre un 30 y 40% en el mismo tiempo. (21)

El estudio mostró que la adición de cenizas volantes a los materiales cementíceos aumenta la resistencia al ataque de sulfatos. Esto debido a que el agregado suplementario químicamente fija la cal libre y reduce la cantidad de aluminatos reactivos, lo que disminuye su disponibilidad para el ataque de los sulfatos. Además, la actividad puzolánica reduce la permeabilidad del hormigón. (22)

Lasnibat analizó la influencia de adiciones de microsílíce y puzolana natural en la resistencia al ataque de sulfatos en hormigones elaborados con cemento Pórtland comercial chileno. Los resultados mostraron que la adición de puzolana natural en el material cementíceo produce un deterioro sensiblemente mayor que aquellos sin adición. Además, el efecto de la microsílíce incrementó en forma importante la capacidad del hormigón para resistir el efecto de los sulfatos. (41)

2.3.3 Eficiencia de adiciones

Las distintas propiedades que agregan las adiciones minerales a los hormigones sólo podrán ser obtenidas si los agregados del material cementíceo se encuentran bien distribuidos en el hormigón y se dan las condiciones óptimas para su desarrollo. Para que este escenario se dé, las adiciones deben ser agregadas al hormigón de manera eficiente.

En Chile, la NCh 148 Of. 68 “Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales”, indica que en los cementos con agregados, el clínker y la adición deben ser molidos conjuntamente. De esta manera, los materiales estarán mejor homogenizados.

Existen además otras formas de añadir la adición a la mezcla, ya sea como un material más dentro de la carga de la colada u homogeneizándola previamente con el cemento Pórtland, para luego ser incorporado a la mezcla.

Según un estudio realizado para determinar la influencia de la molienda conjunta en la eficiencia de las adiciones puzolánicas, la forma en que se agregan las adiciones al hormigón no incide significativamente en las propiedades de los morteros analizados. (13)

2.4 Mezclado del hormigón

2.4.1 Introducción

Una mezcla intensa de los ingredientes del hormigón es esencial para obtener un producto homogéneo que permita una distribución adecuada de sus partículas y una hidratación óptima del material cementíceo.

Un proceso de mezclado de hormigón eficiente se caracteriza por producir una mezcla homogénea, que exhibe, en forma consistente, propiedades de trabajabilidad conforme a los requerimientos de la obra.

La existencia de materiales cementíceos finos en el hormigón, bajas razón agua/cemento y altos contenidos de elementos aglomerantes son comunes en los hormigones modernos. Estas condiciones producen la aglomeración de partículas cementicias finas durante el mezclado, que afectan la uniformidad de hidratación de los materiales cementíceos y la trabajabilidad del hormigón. También es importante la dispersión y el apropiado recubrimiento de las partículas de árido en la operación de mezcla con la pasta cementícea.

Por lo tanto, un proceso eficiente de mezclado llega a ser tan importante y necesario para asegurar la óptima calidad del hormigón como una adecuada dosificación del mismo.

Respondiendo a este problema, el proceso de mezclado en dos etapas divide la operación de mezcla para mejorar tanto la uniformidad de la pasta, la hidratación de los materiales cementíceos y el recubrimiento del agregado con pasta.

2.4.2 Antecedentes de los actuales sistemas de mezclado

2.4.2.1 Mezcladores de Hormigón

Existen dos principales tipos de mezcladores de hormigón, las betoneras por colada y los mezcladores continuos.

Las betoneras por colada producen hormigón según la capacidad del tambor mezclador, una colada a la vez. Además, necesitan ser cargados, y una vez elaborado el hormigón, vaciados y limpiados, para luego ser cargados con los materiales para la próxima colada a producir.

Actualmente es posible encontrar dos tipos de betoneras por colada, que se distinguen por la dirección del eje de rotación del tambor de mezclado. Cuando el eje es vertical, se trata de una betonera de eje vertical fijo y cuando el eje es giratorio, se considera una betonera de eje basculante.

Las betoneras de eje basculante tienen como principal mecanismo de mezclado el movimiento rotatorio y caída de los materiales dentro del tambor mezclador. En cada rotación, el material es desplazado hacia arriba adherido a las paredes del tambor, al llegar a cierta altura, se despega y cae al fondo del tambor y el ciclo comienza nuevamente. Los parámetros que pueden ser controlados son la velocidad de rotación y el ángulo de inclinación del eje de rotación.

Además, las betoneras de tambor basculante varían el ángulo del eje de rotación para realizar el proceso de carga de materiales y descarga de hormigón. (figura 2.21)

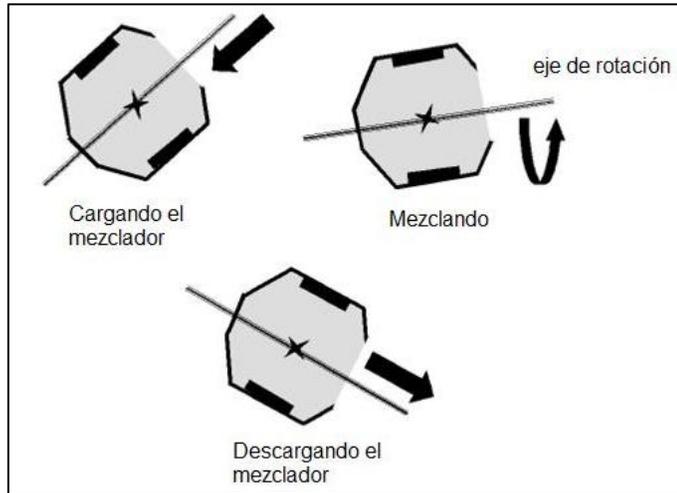


Figura 2.21: Betonera de tambor basculante. (1)

En las betoneras de eje vertical fijo, el principio es el mismo, el tambor cilíndrico (fijo o rotativo) contiene los materiales que van a ser mezclados, mientras una o dos paletas rotatorias dentro del tambor, mezclan los materiales y una hoja roza las paredes del tambor cilíndrico para despegar el material adherido a las paredes. Los parámetros que pueden ser controlados son la velocidad de rotación de la(s) paleta(s), en algunas betoneras de eje vertical fijo, la velocidad de rotación del tambor y el tiempo de mezclado.

Las distintas configuraciones se observan en la figura 2.22:

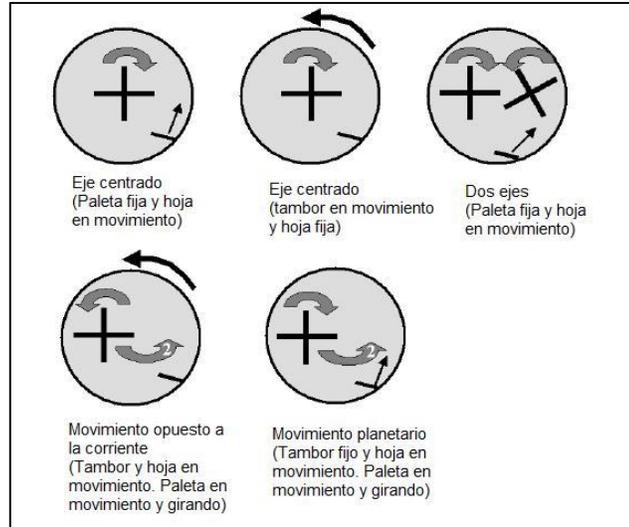


Figura 2.22: Betonera de eje vertical fijo. (1)

Mezcladores continuos son aquellos en que los materiales ingresan en proporciones establecidas, de manera constante dentro del mezclador, a la misma tasa en que el hormigón es descargado en el extremo opuesto. El tiempo de mezclado es determinado por el ángulo del tambor (generalmente de alrededor de 15°).

Detalles de los mezcladores como su localización, forma y ángulo de las paletas, forma del tambor, velocidad de rotación, y potencia, son determinados empíricamente para las necesidades de diferentes calidades de hormigón. Para diferentes tipos de hormigones, más de una de las anteriores combinaciones de propiedades producirá un hormigón homogéneo en el menor tiempo posible. (1) (5)

2.4.2.2 Aspectos generales de un sistema de mezclado

Ferraris describió los métodos de mezclado, dividiendo el proceso en los dos elementos más importantes que lo detallan, el tiempo de carga de las materias primas, mezclado de ellas y descarga del hormigón, y la energía de mezclado. (5)

Carga, mezclado y descarga del hormigón

El método de carga incluye el orden en que se introducen los materiales dentro del mezclador y el tiempo que dura la carga de materiales. La duración de este periodo depende de cuánto tiempo son mezclados los componentes secos antes de que se agregue el agua y cuanto tiempo demora la carga de ellos. El ciclo de carga se extiende desde el momento en que el primer constituyente es introducido al mezclador hasta que todos los constituyentes se encuentran en él.

RILEM divide el periodo de carga en dos partes: mezclado seco y mezclado húmedo (figura 2.23). El mezclado seco es el que ocurre durante la carga de los materiales antes de que el agua sea introducida. El mezclado húmedo es el que ocurre después o mientras el agua está siendo incorporada, pero aún durante la carga de los materiales. Esto significa que todos los materiales son introducidos durante el periodo de carga: todos antes del agua, todos después del agua o parcialmente antes y parcialmente después. (5)

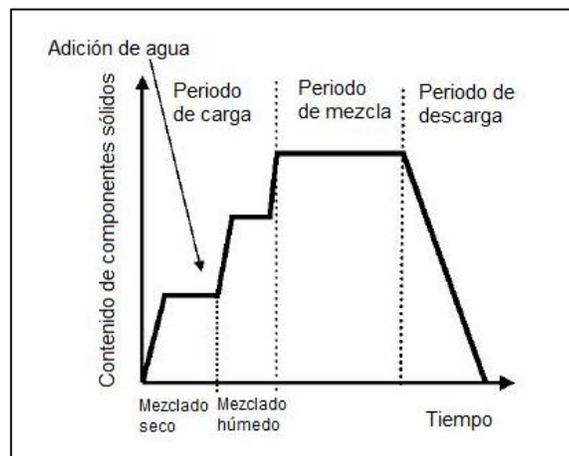


Figura 2.23: Ciclo de mezclado. (5)

El ciclo de carga es importante debido a que algunas de las propiedades del hormigón dependen de la secuencia que optimiza la interacción de los distintos constituyentes hayan sido introducidos al mezclador.

La descarga del hormigón del mezclador debería ser coordinada de modo de incrementar la productividad (descarga rápida) sin modificar la homogeneidad (descarga lenta). Por ejemplo, si la descarga involucra un cambio brusco de velocidad, habría una separación de los constituyentes por tamaño o segregación.

Muy a menudo, el tiempo de mezcla es definido como el tiempo transcurrido entre la carga del primer constituyente hasta el final de la descarga del hormigón. RILEM define el tiempo de mezclado de manera diferente, como el tiempo entre la carga de todos los constituyentes y el comienzo de la descarga del hormigón. (figura 2.23).

Ambas definiciones son aceptables. En todos los casos es importante que el proceso de mezclado sea descrito completamente y que este se mantenga constante a lo largo de la faena.

El tiempo de mezcla requerido debe basarse en la capacidad del mezclador para producir un hormigón homogéneo dentro del tambor y a lo largo del proceso. Este período depende primeramente del diseño del mezclador y de las características de los materiales básicos. Un inadecuado tiempo de mezcla puede aumentar la dispersión de los valores de las resistencias, grandes diferencias entre coladas o variaciones de homogeneidad en la misma colada. Sin embargo, demasiado tiempo de mezcla no mejora la calidad del hormigón, ya que podría causar algunos quiebres de los agregados más blandos y menores contenidos de aire.

Cable y McDaniel investigaron y evaluaron la relación entre el comportamiento del hormigón y el tiempo de mezcla, incluyendo el contenido de aire en el hormigón endurecido y su distribución, la potencial segregación y trabajabilidad. Los autores concluyeron que para el tipo de hormigón estudiado y los equipos de mezclado utilizados, 60 segundos de mezcla o más podrían tener una positiva influencia en las características del hormigón. Indican que reducir este tiempo de mezcla para mezcladores alternativos sólo se puede aplicar en específicas circunstancias. ⁽¹⁾

Energía de mezclado

La energía necesaria para mezclar una colada de hormigón corresponde al producto de la potencia consumida durante el ciclo de mezcla y la duración de este ciclo. Este producto es a menudo considerado, inapropiadamente, un buen indicador de la efectividad del mezclador.

La razón por la que no es un buen indicador es porque hay una alta dependencia de la potencia consumida con el tipo de mezcla, su tamaño y el método de carga de los materiales. Así por ejemplo, un mezclador que tiene un motor poderoso podría ser usado para mezclar hormigones menos trabajables o más viscosos.

Charonnat señala que para lograr producir y garantizar la homogeneidad de un hormigón, se debe determinar el ciclo de mezcla que produce un comportamiento esperado, con el propósito de optimizar el tiempo de mezcla, es decir, cada hormigón a elaborar tiene un ciclo de mezcla que optimiza sus propiedades, y éste debe ser encontrado mediante coladas de prueba. Esta es la razón por la que se debe realizar un análisis inicial, que permita llegar a valores aceptables de varios parámetros de la mezcla. La evolución de la homogeneización en el ciclo de mezclado es rastreado a través del visualizador de la energía, que indicará el tiempo que se debe mezclar el hormigón. ⁽⁴⁾

Nishizaki usa la corriente eléctrica del mezclador para manejar la trabajabilidad del hormigón, la cual varía debido a fluctuaciones en la calidad del hormigón en producción, particularmente el cambio en la humedad superficial del agregado fino. El contenido de agua es ajustado para corregir la desviación en el nivel de corriente eléctrica. Se define un cierto valor de ésta que caracteriza a un hormigón bien homogeneizado, cuando este se alcanza, culmina la operación de mezcla. La corriente eléctrica es monitoreada y usada además para confirmar la uniformidad y/o cambios de la trabajabilidad del hormigón. ⁽⁴⁾

2.4.2.3 Eficiencia del mezclador

Como vimos anteriormente, las variables que afectan el método de mezclado son numerosas, no siempre controladas, y no son indicadores confiables de la calidad del hormigón fabricado. Hay, sin embargo, una necesidad de implementar una metodología que permita determinar la calidad del hormigón producido como una medida intrínseca de la eficiencia del mezclador. El concepto de “eficiencia del mezclador” es usado para calificar que tan buena homogeneización de los componentes de un hormigón produce un mezclador.

RILEM define que un mezclador es eficiente “si distribuye cada uno de los componentes uniformemente en el tambor sin favorecer ni a uno ni a otro”. Por lo tanto, en la evaluación de la eficiencia del mezclador, propiedades tales como la segregación y la graduación del agregado deberían ser monitoreadas en toda mezcla. ⁽⁵⁾

Algunos indicadores de eficiencia que han sido estudiados son:

- Variables de caracterización del hormigón fresco como indicador de eficiencia

Dado que las propiedades macroscópicas del hormigón son afectadas por su composición, es concebible que la homogeneidad del hormigón producido podría ser monitoreada a través de las medidas del comportamiento de muestras preparadas con hormigones tomados de diferentes partes del mezclador o en diferentes tiempos durante la descarga. Las propiedades que son usualmente consideradas son:

- Trabajabilidad
- Densidad del hormigón
- Contenido de aire
- Resistencia a la compresión

La desventaja de este método es que no es directo, ya que solo asume que la no homogeneidad del hormigón afectará las propiedades consideradas. Además, es posible que alguno de los métodos de mediciones seleccionado no sea demasiado sensible a los cambios locales de composición, quizás porque las muestras son muy grandes o que las propiedades seleccionadas no se ven afectadas por la pérdida de homogeneidad de la mezcla. La consistencia en las propiedades es una guía útil, pero no un indicador definitivo de la homogeneización del producto y puede dar una falsa sensación de seguridad sobre el método de mezclado utilizado. ⁽⁵⁾

- Composición

Un método más directo de medir eficiencia de un mezclador podría ser la medida de la homogeneidad de un hormigón. Esta medida puede ser lograda determinando la distribución de los constituyentes sólidos tales como el agregado grueso y fino, agregados minerales y la pasta de cemento en toda la mezcla. Sin embargo, no hay un ensayo que determine la homogeneidad.

No obstante, existe el análisis de muestras de hormigón tomadas en varias partes de un mezclador o en varios tiempos durante la descarga. Este análisis se logra lavando la pasta de cemento y luego tamizando los agregados. De esta manera se analiza la distribución de tamaños de los áridos en la muestra. Pesando la muestra antes y después de que la pasta es lavada, se puede estimar el contenido de pasta cementicia. Dado que la pasta de cemento es lavada y determinado su peso como un todo, no se toman precauciones para determinar la dispersión de los agregados minerales o contenido de finos. ⁽⁵⁾

RILEM, basado en el concepto de medir la eficiencia del mezclador usando la homogeneidad de la mezcla, estableció una clasificación de eficiencia de mezcladores definiendo tres clases: mezclador ordinario, mezclador de rendimiento, mezclador de alto rendimiento. Cada clase está definida por el rango de cuatro criterios: razón agua/cemento, cantidad de material fino, fracción de agregado grueso, y contenido de aire.

Se miden cada uno de estos parámetros para distintas muestras tomadas, ya sea del mezclador o de la descarga. Se calcula el promedio de estas medidas para cada parámetro y la desviación estándar para obtener el coeficiente de variación, que da una medida de la homogeneidad del hormigón producido. Este criterio solo trata de estandarizar el proceso de la medida de la eficiencia de los mezcladores de hormigón. ⁽⁵⁾

- Método híbrido: composición y características del hormigón

Peterson describe el método utilizado en Suecia, que mezcla los dos anteriores métodos nombrados. Las propiedades seleccionadas son: la distribución del contenido de cemento, del agregado fino y grueso (como se describe en el indicador por composición), la variación en la resistencia a la compresión y las variaciones en la consistencia (como se define el indicador por características del hormigón fresco). Se considera adecuado a un mezclador si la variación entre las medidas de ocho muestras sacadas durante la descarga del hormigón, es menor que un 6% a 8% en cada colada de hormigón. ⁽⁵⁾

Existe además, una norma chilena que describe un método híbrido para analizar la homogeneidad entre amasadas y dentro de una amasada.

La norma chilena NCh 1789 Of. 86 "Hormigón – Determinación de la uniformidad obtenida en el mezclado del hormigón fresco", detalla las disposiciones que debe cumplir una colada de hormigón para considerarse uniforme. Para esto, se debe medir la densidad aparente, docilidad, resistencia a la compresión, porcentaje de grava, densidad del mortero y contenido de aire de dos muestras tomadas en una misma colada, cuyos resultados por colada deben diferir como máximo, según la tabla 2.2: ⁽¹⁰⁾

Tabla 2.2: Requisitos de uniformidad de mezclado.

REQUISITOS	DIFERENCIA MÁXIMA
1) Densidad aparente del hormigón : diferencia entre ambos valores	15 [kg/m ³]
2) Docilidad: diferencia entre ambos valores: a) para asentamientos de cono promedio < 10 cm b) para asentamientos de cono promedio > 10 cm	2.5 [cm] 4.0 [cm]
3) Resistencia a la compresión a los 7 días: diferencia entre los valores promedio de cada muestra expresada en porcentaje con respecto al promedio de las dos muestras	7.5 %
4) Porcentaje de grava: diferencia entre ambos valores	6.0 %
5) Densidad del mortero: diferencia entre ambos valores expresada en porcentaje con respecto al promedio de los ensayos	1.6 %
6) Contenido de aire incorporado: diferencia entre ambos valores	1.0 %

Sensor de humedad como medida de eficiencia

Según Schlorholtz, Wang, Hu y Zhang, un sensor de humedad que evaluara en diferentes momentos el hormigón dentro del mezclador podría ser usado para reflejar la uniformidad del hormigón. Cuando las medidas de la humedad se estabilizaran en el tiempo, entonces habría un mezclado uniforme. ⁽⁴⁾

2.4.3 Normativa chilena de mezclado de hormigones de laboratorio

En Chile, según la norma NCh 1018 Of. 77, "Hormigón - Preparación de mezclas de prueba en laboratorio", el mezclado debe realizarse de la siguiente manera cuando se utiliza un mezclador mecánico:

- Humedecer el tambor del mezclador.
- Mezclar toda la arena, el cemento, el aditivo insoluble y la adición, si se usa, hasta obtener una masa homogénea a la vista.
- Añadir toda la grava y mezclar hasta obtener su distribución uniforme en la masa.
- Agregar el agua y el aditivo soluble, si se usa, y mezclar hasta que el hormigón tenga una apariencia homogénea y el asentamiento deseado.
- Revolver durante 3 minutos, reposar la mezcla 3 minutos y revolver nuevamente por 2 minutos más.

Esta norma concuerda con la norma ASTM C192-69 "Making and curing concrete test specimens in the laboratory". ⁽¹¹⁾

2.4.4 Efectos del mezclado en las propiedades del hormigón

El mezclado del hormigón es un proceso complejo en el cual muchos factores tienen influencia en la calidad de éste. Estos factores incluyen la secuencia de carga de los materiales, el tiempo de mezcla y el tipo de mezclador.

El mezclado del hormigón influye de manera importante en el comportamiento y las propiedades de éste, debido a que distribuye las partículas de cemento, agua y áridos de forma tal que ayuda o dificulta las reacciones de hidratación del cemento y la distribución de las partículas de agregado en el hormigón.

El incremento de la energía de mezclado (velocidad y tiempo de mezcla) produce hormigones con mejores propiedades debido a que genera una mayor defloculación (proceso en el cual las fuerzas de repulsión entre dos partículas son mayores que las de atracción, como consecuencia, se dispersan) lo que implica una mayor descomposición estructural en la pasta, lo que disminuye la viscosidad plástica de éste, haciéndolo más trabajable.

Además, el fenómeno de defloculación permitiría aumentar la superficie expuesta de las partículas de cemento, promoviendo un mejor contacto entre el agua y el material cementíceo, que permitiría una mejor hidratación tanto de aluminatos como de silicatos, lo que significa una mayor resistencia a la compresión del hormigón.

Antes de la inserción del nuevo método de mezclado en etapas, se realizaron varias investigaciones sobre variaciones al método de mezclado convencional que mostraron positivos comportamientos del hormigón.

Tamimi estudió los efectos de agregar el agua en dos ocasiones durante el proceso de mezclado. Inicialmente se agregan los áridos y el peso en agua de un 25 % del peso del cemento, los que son mezclados por 30 segundos. El cemento es agregado luego y mezclado por 60 segundos. Posteriormente, se agrega el resto del agua y se mezcla todo por otros 90 segundos. Este proceso disminuyó la tasa de exudación en el hormigón fresco e incrementó la resistencia a la compresión en un 25 %.

La investigación también reveló que utilizando este sistema de carga en el mezclado, se producía un constante recubrimiento de los poros de la zona interfacial de transición entre el cemento y los productos de hidratación del hormigón, resultando un aumento de la tasa de productos de hidratación en el espacio entre poros en la zona interfacial de transición, comparado con la situación de un hormigón mezclado de manera normal. Este método de mezclado permitió apretar el empaquetamiento de los productos de hidratación con mayor crecimiento interno y entrelazamiento, lo cual mejora la adherencia entre los áridos y la pasta de cemento, disminuye la porosidad e incrementa la resistencia en esta zona, como se muestra en la figura 2.24. (1)

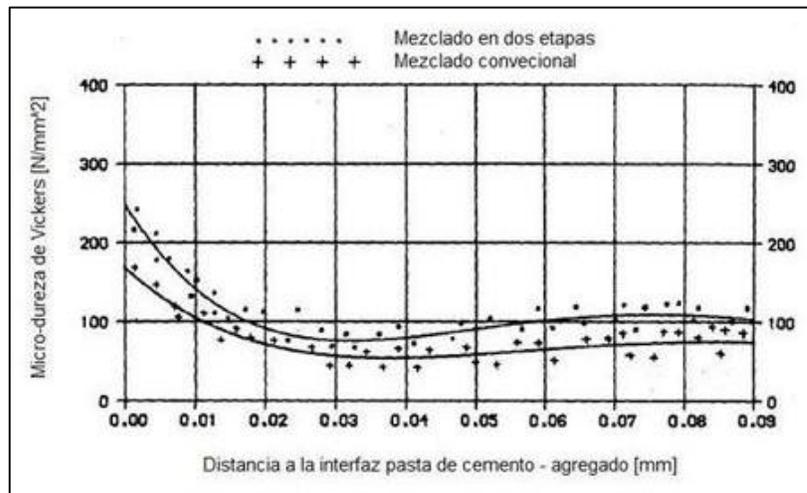


Figura 2.24: Micro-dureza de la zona interfacial a los 28 días. Razón agua/cemento 0.45. (1)

Pope y Jennings también investigaron la influencia de agregar agua en varias etapas, pero con morteros. Primero fueron mezclados una porción de agua con los áridos, luego se agrega el cemento, finalmente se agrega la última porción de agua y se mezcla por cinco minutos, formando un mortero homogéneo. Los resultados mostraron mejoras en la resistencia a la compresión, en las propiedades de fractura y una uniforme microestructura en la zona interfacial de transición. Las partículas de agregado son cubiertas inicialmente con una pasta de baja razón agua/cemento; al agregar el resto del agua, se reduce la razón agua/cemento de la pasta en la interfaz y reduce el grosor total de la capa de la zona interfacial de transición. Esto impide la acumulación de agua entre la superficie de los áridos y la pasta, permitiendo que los productos de hidratación se empaqueten más ajustadamente contra la superficie. Los resultados se muestran en la figura 2.25. (1)

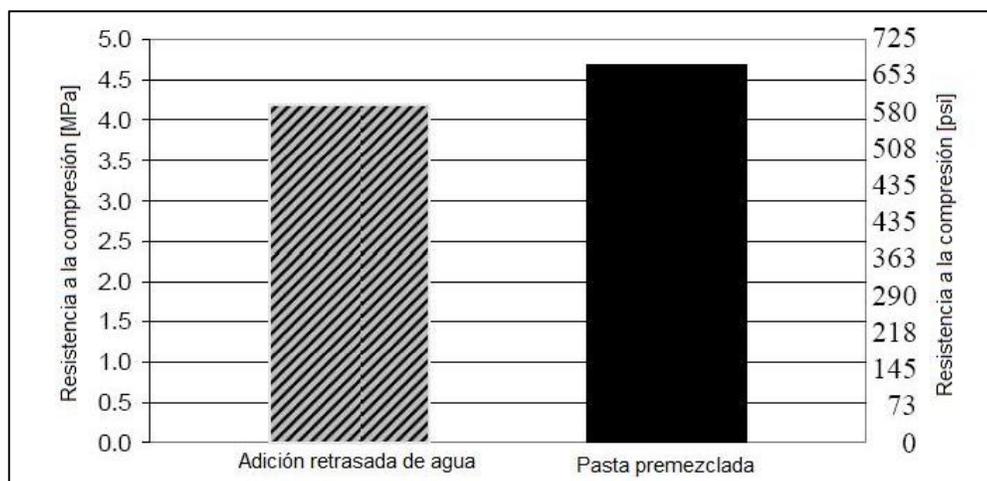


Figura 2.25: Resistencia a la compresión promedio a los 28 días en morteros. (1)

El proceso de mezclado de hormigón en etapas supone que anticipadamente se prepare la pasta o mortero, para ser luego mezclado con el resto de los áridos. Este método tiene presumibles mejoras en el comportamiento mecánico del hormigón.

Rejeb estudió el mezclado en etapas en varios países, comparando la resistencia a la compresión y la consistencia entre el método del mezclado convencional y de 2 etapas. Para el proceso normal, el agregado grueso, la arena y el cemento seco fueron mezclados por 30 segundos en un mezclador normal, luego el superplastificante fue agregado y mezclado por tres minutos más. Se analizaron dos métodos en dos etapas, en el primero se premezcló el agua, el superplastificante y el cemento por dos minutos en un mezclador de alta velocidad. Luego, a la pasta de cemento se le agregó los áridos gruesos y finos en un mezclador normal y fue mezclado por dos minutos. En el segundo método analizado, se premezcló el mortero por dos minutos en un mezclador de alta velocidad. Luego se le agregó el árido grueso y fue mezclado por dos minutos en un mezclador normal. (3)

Los resultados, resumidos en la tabla 2.3, mostraron que los hormigones mezclados en dos etapas, premezclando el mortero, tuvieron mayores resistencias a la compresión a los 28 días (entre un 14 y 19% de aumento), seguidos de los hormigones mezclados en dos etapas, premezclando la pasta de cemento (entre un 13 y 15% de aumento).

Además, los ensayos mostraron que ambos sistemas de mezclado en dos etapas, aumentan la trabajabilidad, mostrando un incremento en el descenso de cono de entre 0.5 a 1 cm.

Tabla 2.3: Comparación del mezclado en dos etapas con el mezclado convencional.

Método de Mezclado	Razón agua/cemento	Asentamiento de Cono [cm]	Resistencia a la compresión a los 28 días[MPa]
Pasta cementicia premezclada	0.40	4.50	50.97
	0.45	18.50	46.22
	0.50	24.50	42.17
Mortero premezclado	0.40	3.50	51.73
	0.45	18.00	47.15
	0.50	24.00	43.04
Mezclado normal	0.40	3.50	45.20
	0.45	17.50	40.38
	0.50	24.00	36.76

A través del sensor de humedad detallado anteriormente, Hu y Zhang han estudiado el comportamiento de distintos tipos de mezclado, comparando el mezclado en una etapa y el mezclado en varias etapas. En el mezclado en etapas, los áridos gruesos y la mitad del agua son mezcladas inicialmente por 30 segundos, para luego incorporar el resto de los materiales.

Utilizando el sensor, se concluyó que los procedimientos nombrados necesitan distinto tiempo de mezclado para lograr una humedad constante, que caracteriza el mezclado uniforme. Como se observa en las figuras 2.26 y 2.27, el mezclado en una etapa es el que necesita menor tiempo para obtener la homogeneidad de la mezcla. Los ensayos de resistencia a la compresión entregaron las mayores resistencias en muestras tomadas del hormigón mezclado en varias etapas. (7)

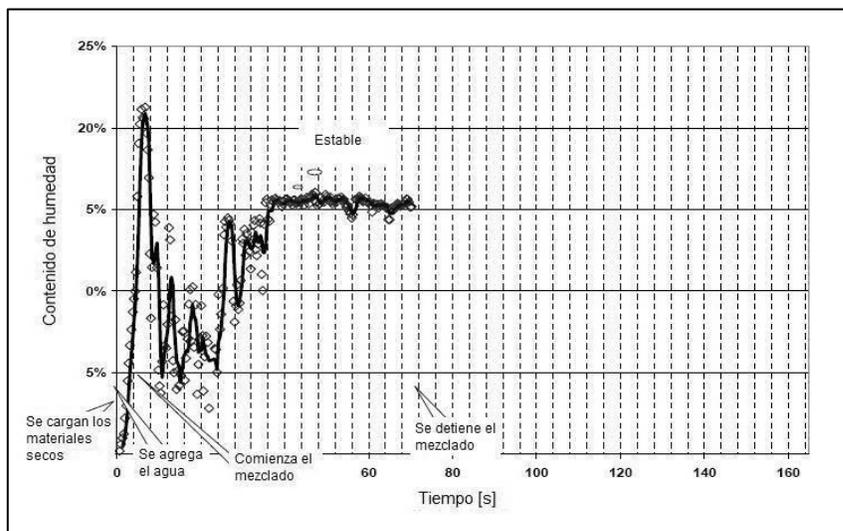


Figura 2.26: Datos de salida del sensor de humedad para un mezclado en una etapa. (7)

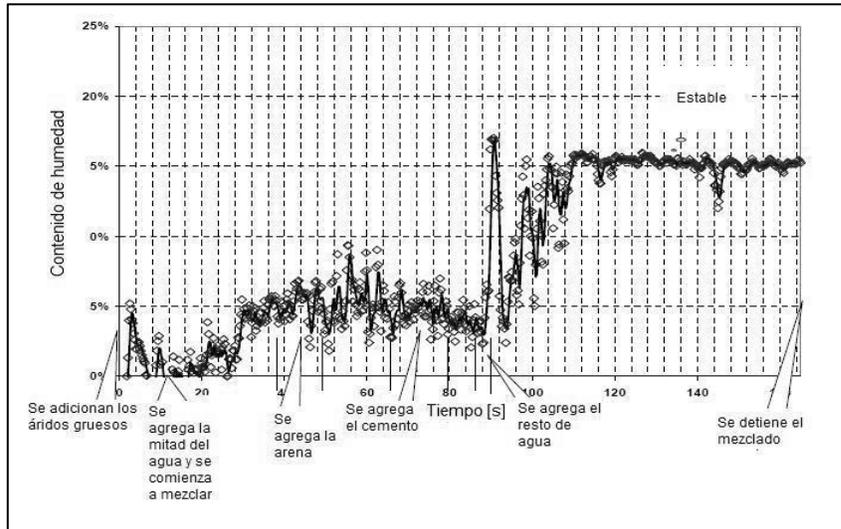


Figura 2.27: Datos de salida del sensor de humedad para un mezclado en varias etapas. (7)

Schaefer y Wang utilizando una betonera de tambor de eje giratorio analizaron tres mezclas diferentes, que incluían adiciones cementicias, mediante el uso de tres métodos de mezclado, uno en una etapa y dos métodos en dos etapas. En el método de control, los áridos y el agua fueron mezclados por 15 segundos, para luego agregar los materiales aglomerantes y ser mezclado durante 60 segundos. En el método de dos etapas con 30 segundos en el tambor, la pasta fue mezclada a alta velocidad por 2 minutos y 45 segundos. A los áridos en el mezclador convencional, se les agrega esta pasta, para ser mezclados por 30 segundos. En el método de dos etapas con 60 segundos en el tambor, la pasta fue mezclada a alta velocidad por 3 minutos y 15 segundos. A los áridos en el mezclador convencional, se les agrega esta pasta, para ser mezclados por 60 segundos. (1)

Se estudiaron tres hormigones distintos, uno con 100% de cemento Pórtland, uno con 85% de cemento Pórtland y 15% de cenizas volantes y el tercer tipo de hormigón tiene 50% de cemento Pórtland, 35% de escoria y 15% de cenizas volantes.

Los resultados obtenidos mostraron un menor contenido de aire en los hormigones mezclados en dos etapas, esto debido a la limitada capacidad de los componentes cementíceos finos para atrapar aire durante el mezclado de la pasta (figura 2.28). Se observa además un decrecimiento del asentamiento de cono en el hormigón con 100% de cemento Pórtland cuando este es mezclado en etapas. Esto se debe al incremento en la tasa de hidratación del cemento en el proceso de de mezclado en dos etapas. Los resultados para los hormigones con adiciones mostraron un imprevisto incremento en su trabajabilidad (figura 2.29).

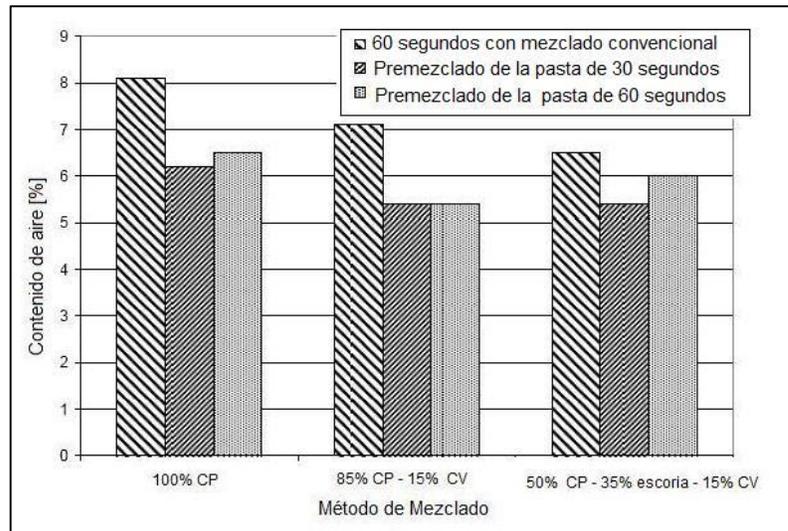


Figura 2.28: Contenido de aire de muestras. (1)

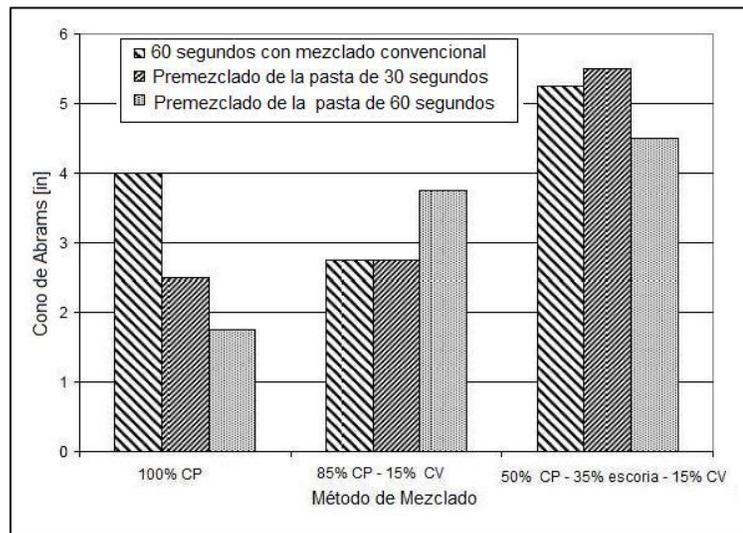


Figura 2.29: Trabajabilidad de muestras. (1)

En cuanto a la resistencia, los procesos de dos etapas mostraron pequeños aumentos de ella, lo que indica que métodos de dos etapas podrían permitir pequeñas reducciones de material cementíceo y aun mantener la misma resistencia (figura 2.30).

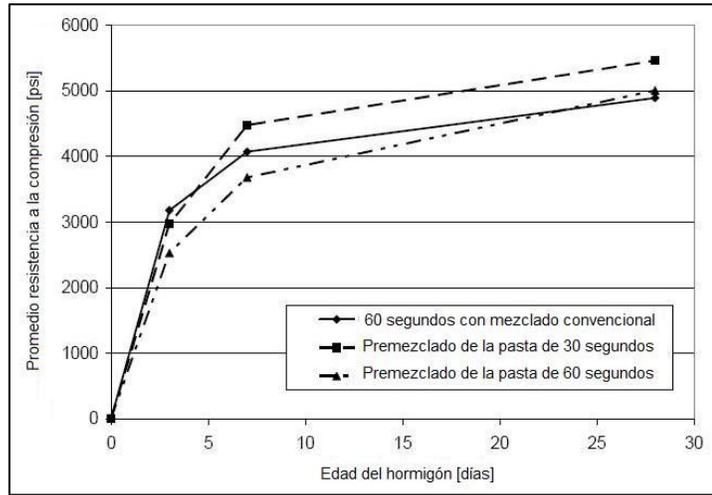


Figura 2.30: Resistencia del hormigón con 100% cemento Pórtland. (1)

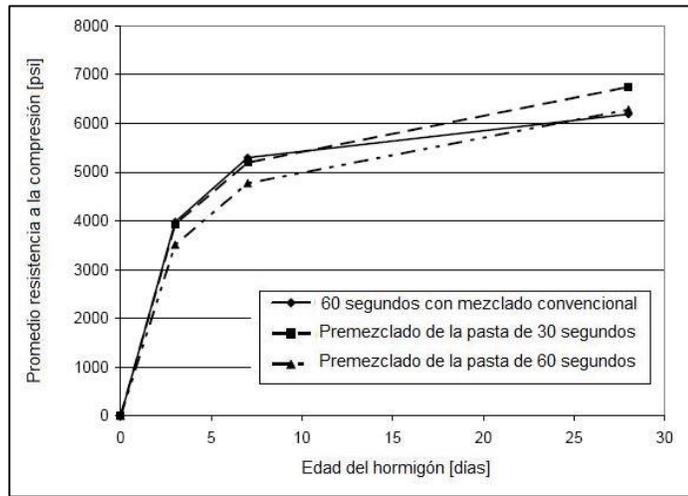


Figura 2.31: Resistencia del hormigón con 85% cemento Pórtland y 15% de cenizas volantes. (1)

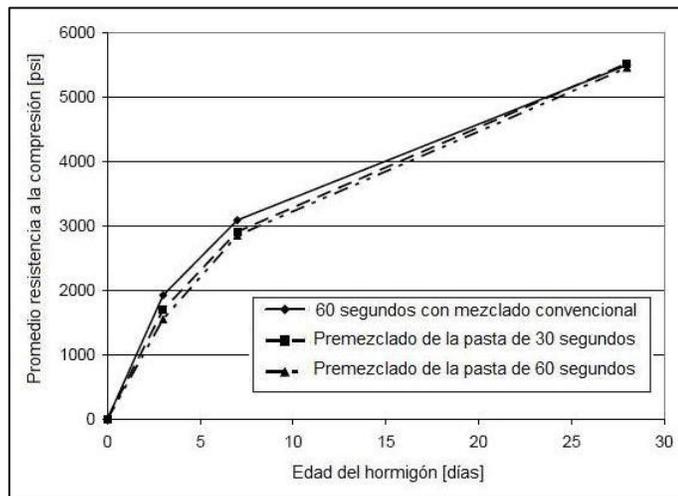


Figura 2.32: Resistencia del hormigón con 50% cemento Pórtland, 15% de cenizas volantes y 35% de escoria. (1)

Además, el método de mezclado en etapas ha sido estudiado para mejorar el comportamiento de agregados reciclados en hormigón. En general, los agregados reciclados presentan una zona interfacial de transición muy débil; la investigación de Tam y Gao entrega satisfactorios resultados, mostrando un aumento de la resistencia en la zona interfacial de transición. Se estudiaron dos alternativas, en las que el agregado fue cubierto con una pasta de menor razón agua/cemento que la pasta final, y otra en que fue cubierto con una pasta de igual razón agua/cemento (figura 2.33). Ambos procedimientos lograron mejorar las resistencias a compresión, pero mejores resultados se encontraron cuando el árido fue cubierto por pasta de menor razón agua/cemento. (6)

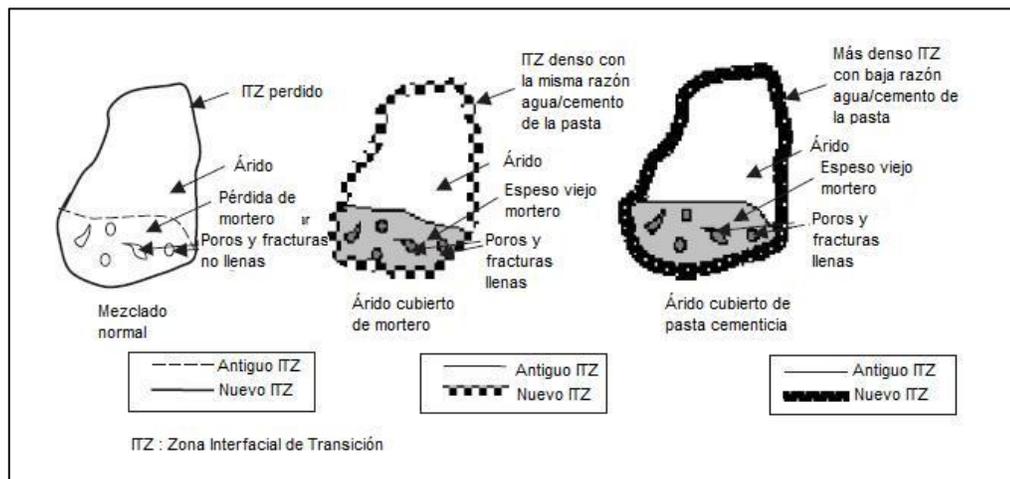


Figura 2.33: Zona Interfacial de Transición para áridos reciclados. (6)

2.5 Resistencia mecánica del hormigón

2.5.1 Introducción

La resistencia a la compresión corresponde a una de las propiedades más importante del hormigón. Según las condiciones ambientales y según el uso práctico del hormigón, toman también importancia propiedades como la durabilidad e impermeabilidad.

En general, la resistencia mecánica del hormigón entrega una visión general de su calidad, debido a que ella está directamente relacionada con la estructura de la pasta de cemento endurecida.

Las propiedades más importantes de las que depende la resistencia de un hormigón son el tipo o calidad del cemento y la razón agua/cemento. Hay además otras propiedades que influyen en menor medida como el tamaño máximo del árido, la naturaleza del árido, los aditivos químicos, las adiciones minerales, el sistema de amasado, la granulometría de los áridos, condiciones de curado, entre otras.

2.5.2 Factores que afectan la resistencia mecánica del hormigón

Dentro de los factores que afectan la resistencia a la compresión del hormigón que serán analizados en el desarrollo experimental de esta investigación están la razón agua/material cementíceo, las adiciones puzolánicas, el sistema de amasado y la razón árido/cemento.

2.5.2.1 Razón agua/material cementíceo

La relación de dependencia que existe entre la resistencia y su relación agua/material cementíceo se conoce desde el año 1918, cuando Duff Abrams estudió experimentalmente el comportamiento mecánico de los hormigones. ⁽⁹⁾

La razón agua/material cementíceo influye tanto en la porosidad de la pasta de cemento como en la zona interfacial de transición. La determinación directa de la porosidad de los componentes individuales del hormigón, como son la matriz y la zona interfacial de transición es poco práctica, y por consiguiente no pueden ser desarrollados modelos predictivos exactos de la resistencia del hormigón a partir de estos datos. ⁽⁹⁾

La resistencia de la pasta de cemento hidratada viene dada por la cantidad y calidad del cemento de la mezcla. A mayor cantidad (menor razón agua/material cementíceo) y calidad del cemento, mayor es la resistencia que ésta tendrá. Se tiene además que a una mayor razón agua/material cementíceo, el hormigón presenta mayor porosidad. Estas dos condiciones explican la relación de la razón agua/cemento con la resistencia en el hormigón; descrito como consecuencia natural de la progresiva debilidad de la matriz debido al incremento de la porosidad con el incremento en la razón agua/cemento.

Esta explicación, sin embargo, no considera la influencia de la razón agua/cemento en la resistencia de la zona interfacial de transición. ⁽⁹⁾

Las curvas que ilustran la relación agua/cemento con la resistencia son variables, dependiendo del tipo de cemento, granulometría del agregado, tiempo de hidratación del cemento, entre otras, lo que significa que si bien la relación existe, las curvas son representativas solo de los hormigones utilizados en los ensayos para la obtención de la curva. (figura 2.34) ⁽⁹⁾

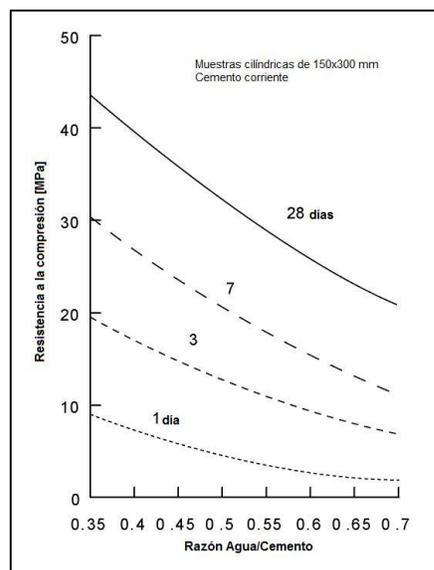


Figura 2.34: Variación de la resistencia con la razón agua/cemento del hormigón. ⁽⁹⁾

2.5.2.2 Razón árido/cemento

La razón árido/cemento, si bien tiene efectos sobre la resistencia del hormigón, es un factor secundario.

Se ha encontrado que para una razón agua/cemento constante, una mezcla con mayor razón agregado/cemento conduce a una resistencia superior. Probablemente este comportamiento esté asociado con la absorción de agua del agregado: una mayor cantidad de agregado absorbe una cantidad mayor de agua, lo cual reduce la relación efectiva agua/cemento. ⁽⁹⁾

Es probable, sin embargo, que otros factores intervengan también, por ejemplo, el contenido total de agua por metro cúbico de hormigón es menor en una mezcla de mayor razón agregado/cemento que en una de menor proporción. Como resultado, en una mezcla de mayor razón agregado/cemento, los huecos forman una fracción más pequeña del volumen total del hormigón, y son estos huecos los que tienen efectos adversos sobre la resistencia. ⁽⁹⁾

2.5.2.3 Adiciones Puzolánicas

La adición puzolánica agregada al material cementíceo funciona en el hormigón como un elemento inerte en el corto plazo, pero en el mediano y largo plazo aparece como una componente activa, cuyos óxidos ácidos (sílice, alúmina e incluso, óxido de hierro) se combinan gradualmente con la cal liberada en la hidratación de los silicatos del cemento Pórtland (hidróxido de calcio), para así formar nuevos compuestos hidráulicos estables (gel de tobermorita). ⁽⁸⁾

Cuando materiales reactivos adecuados son utilizados en relación moderada (es decir, 15 a 30% de puzolana) y el curado húmedo está disponible por períodos largo, las resistencias últimas de los cementos con adición puzolánica son más altas que las resistencias del cemento Pórtland del que estos cementos están hechos, esto se puede apreciar en la figura 2.35. Este comportamiento se produce debido al refinamiento del poro asociado con las reacciones puzolánicas y el incremento del gel de tobermorita y otros productos de hidratación a expensas del hidróxido de calcio. ⁽⁹⁾

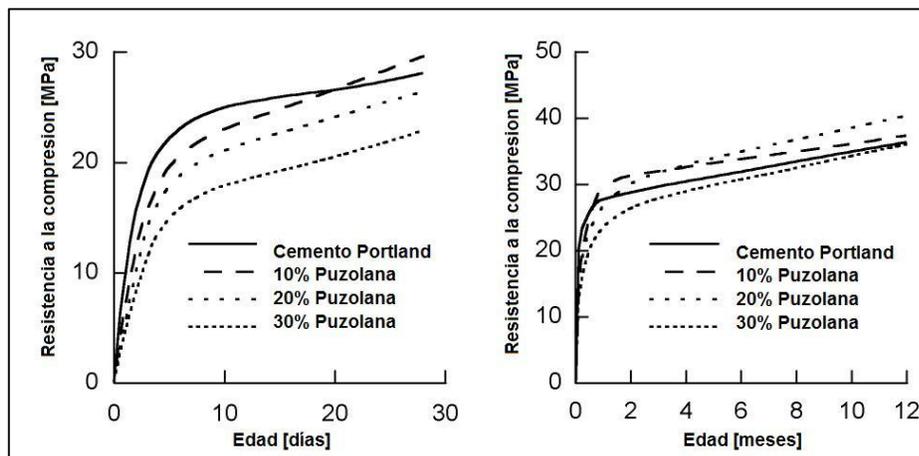


Figura 2.35: Comparación de resistencia a compresión en hormigones con agregado puzolánico. ⁽⁹⁾

De un análisis microscópico y del estudio de la distribución de poros en pastas de cemento hidratadas, con y sin contenido puzolánico, es posible concluir que hay dos efectos físicos de la reacción química entre las partículas de puzolana y el hidróxido de calcio: la disminución tanto del tamaño de los poros como del tamaño de los granos. La formación de productos secundarios de hidratación (principalmente silicato de calcio hidratado) alrededor de las partículas de puzolana tiende a llenar los vacíos capilares con un material de baja densidad y que contiene microporos, lo que disminuye el tamaño de los poros que había inicialmente. La creación de focos de hidróxido de calcio alrededor de finas y bien distribuidas partículas de puzolana tendrá el efecto de reemplazo de grandes y orientados cristales de hidróxido de calcio por cristales pequeños, numerosos y sin orientación de productos de hidratación, lo que reduce el tamaño de los granos. Ambos procesos fortalecen la pasta cementicia. (9)

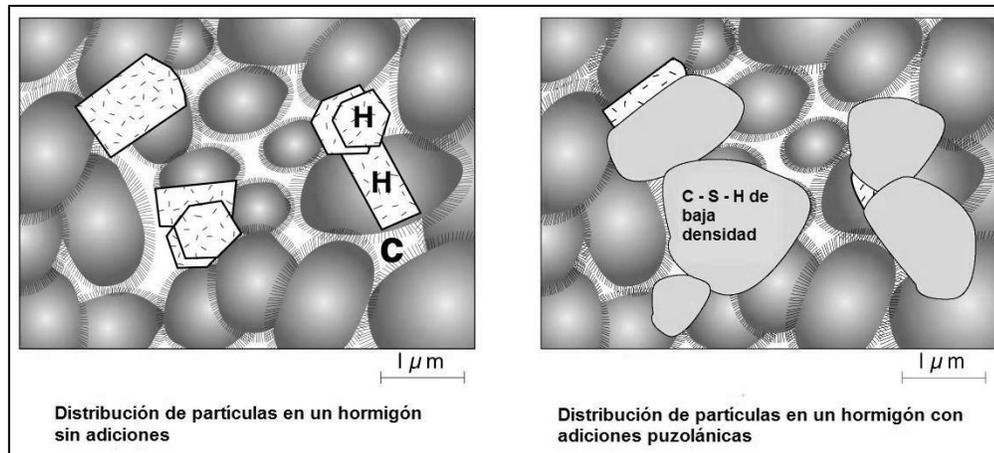


Figura 2.36: Distribución de partículas en la pasta cementicia. (9)

2.5.2.3 Sistema de mezclado

Como se estudió anteriormente, el sistema de mezclado puede tener una fuerte influencia en la resistencia final de un hormigón.

Esto puede deberse a que el método de mezcla influye en las propiedades de la microestructura de la pasta del hormigón, ya que varía los procesos de defloculación de éste, cuando es sometido a altas velocidades y tiempos de mezcla. Este proceso aumenta la superficie expuesta de las partículas de cemento, que significa una mejor hidratación del cemento y una mayor resistencia del hormigón.

Por otra parte, se observa que un hormigón bien mezclado presenta áridos mejor cubiertos por la pasta y ésta exhibe una más uniforme microestructura en la zona interfacial de transición, lo que aumenta la resistencia del hormigón.

2.5.3 Análisis del desarrollo de la resistencia a la compresión del hormigón con la edad

Una vez fabricado el hormigón, los materiales cementíceos comienzan a reaccionar químicamente con el agua, formando los productos de hidratación.

En los materiales cementíceos se generan durante su período de hidratación, complejas reacciones que conducen a la formación de una microestructura resistente a través del tiempo. La complejidad de estas reacciones, viene dada por la génesis de la partícula de cemento no hidratada, ya que ésta está conformada por la combinación de diferentes óxidos, de tal forma que de la arcilla se obtienen Aluminio y Hierro, del cuarzo la Sílice y de la caliza el Calcio. Los productos de estas reacciones son los productos de hidratación. (8)

La principal fuente de resistencia en los productos de la pasta de cemento hidratada es la existencia de las fuerzas de atracción de Van der Waals. La adhesión entre dos superficies puede ser atribuida a esas fuerzas físicas, el grado de acción adhesiva depende de la extensión y la naturaleza de las superficies que están siendo envueltas. Los pequeños cristales de C-S-H (silicato cálcico hidratado), sulfoaluminato cálcico hidratado y hexagonal aluminato cálcico hidratado poseen enormes superficies y capacidad adhesiva. Esos productos de hidratación del cemento Pórtland tienden a adherirse fuertemente no solo unos a otros, sino también a pequeñas superficies solidas, tales como hidróxido de calcio, granos de clínker no hidratados y partículas de áridos finos y gruesos. (15)

Todo este proceso no es instantáneo. Cuando el cemento Pórtland es disuelto en el agua, comienza a producirse una concentración de productos sólidos de la hidratación del cemento, pero la velocidad de hidratación disminuye continuamente, de modo que aun después de transcurrido mucho tiempo, todavía queda una cantidad de cemento deshidratado. Esto puede observarse en la figura 2.37. (8)

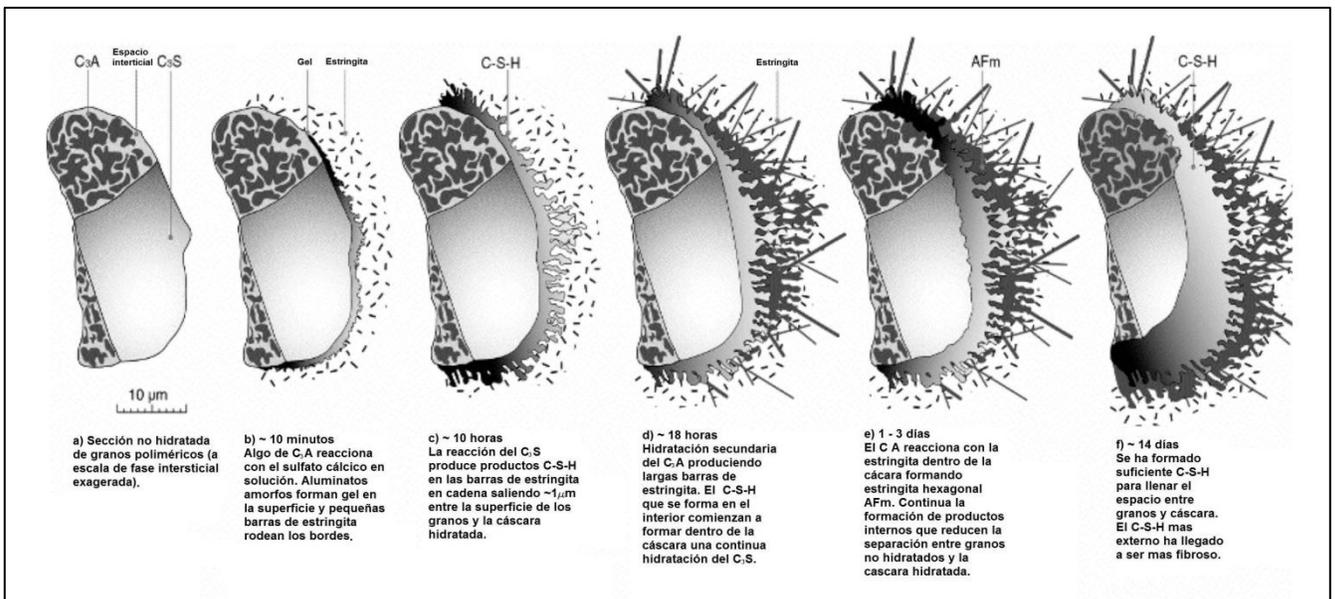


Figura 2.37: Formación de productos de hidratación en el tiempo. (9)

Cada tipo de cemento tiene su propia tasa de desarrollo de resistencia. Además, las mezclas con una razón agua/cemento baja tienen una tasa mayor de desarrollo de la resistencia que las mezclas de razón agua/cemento alta, debido a que en las primeras, los granos de cemento están más juntos unos de otros, por lo que el sistema de gel se establece más rápidamente. (8)

CAPÍTULO 3 Planteamiento del programa experimental

3.1 Introducción

En el presente capítulo se detallará el programa experimental que permitirá analizar el comportamiento de los hormigones cuando se varían algunas de sus variables más importantes y cuando el método de elaboración del hormigón cambia.

Utilizando el mezclado convencional y en etapas, se fabricarán hormigones con distinta razón agua/material cementíceo y de distinta proporción de puzolana en el material cementíceo. Los resultados de los ensayos de resistencia y del hormigón fresco permitirán comparar el comportamiento mecánico y se desprenderá de ellos el comportamiento microestructural de las partículas que componen el hormigón.

Se analizará además el comportamiento mecánico de hormigones fabricados mediante mezclado en etapas cuando los áridos se encuentran húmedos pero con temperaturas superiores a las que habitualmente se encuentran los áridos en los hormigones de prueba. Con ello, se estudiará la microestructura del hormigón alrededor de los áridos y como afecta esto a la resistencia mecánica.

3.2 Planteamiento de la investigación

El plan de trabajo a seguir considera la realización de una serie de ensayos que permitirán conocer el comportamiento del hormigón fresco y endurecido, cuando estos son elaborados con diferentes materiales cementíceos y distinto método de mezclado.

Se trabajará con materiales cementíceos de laboratorio fabricados con un cemento Pórtland y puzolana natural dosificada en distintas proporciones, con los cuales se fabricarán hormigones utilizando dos tipos de mezclado, mezclado convencional y mezclado en etapas.

En una primera etapa se caracterizarán los materiales a utilizar, luego la puzolana se someterá a molienda y posteriormente a ensayos con el fin de conocer su composición química y mineralógica, al mismo tiempo que el cemento base se someterá a ensayos para conocer algunas de sus propiedades.

Posteriormente se procederá a la fabricación de los cementos de laboratorio mediante la mezcla de ambos componentes (cemento Pórtland y puzolana) en la proporción adecuada, las cuales corresponderán a mezclas de razón puzolana/material cementíceo de 0, 0.2 y 0.4 en peso.

Luego, según el programa de ensayos se procederá a la fabricación de los hormigones mediante los métodos convencional y en etapas, para el posterior ensayo del hormigón fresco y la fabricación de las probetas correspondientes para evaluar su resistencia a compresión a los 7, 28 y 56 días.

3.3 Definición de las variables

En este estudio experimental se analiza el comportamiento de hormigones al variar el contenido de puzolana, adoptando los contenidos de 0%, 20% y 40% con respecto al contenido de material cementíceo en peso, lo que significa ensayar hormigones que según la norma NCh 148 Of. 68 son Pórtland, Pórtland puzolánico y puzolánico respectivamente.

Además, para identificar el comportamiento de hormigones de distintas calidades de pasta aglomerante, se varía la razón agua/material cementíceo, cuyos valores son 0.4, 0.5 y 0.6. El contenido de pasta se determina de modo de obtener consistencia en el rango de asentamiento de cono 12 - 16 [cm] para todas las series de hormigones elaboradas con mezclado convencional y cemento Pórtland.

Se analizará la influencia del sistema de mezclado en la resistencia de hormigones con distintos contenidos de puzolana. Para esto, las muestras serán ensayadas tanto para el sistema convencional de mezclado, como para un sistema de etapas, que mezcla inicialmente la pasta y luego se la agrega a los áridos.

Conjuntamente, se ensayarán hormigones de razón agua/material cementíceo 0.5, fabricados mediante mezclado en etapas, con áridos a altas temperaturas. Estas series servirán para estudiar la resistencia del hormigón cuando se fuerza la existencia de una zona interfacial de mayor espesor, lo que se logra acelerando las reacciones al borde de los áridos.

Se mantiene constante la finura del cemento Pórtland y de la puzolana, el tipo de puzolana, el cemento Pórtland utilizado y los áridos utilizados.

En resumen, las variables a utilizar serán las que aparecen en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Variables de estudio.

Variable	Valores
Relación puzolana/material cementíceo	0, 0.2 y 0.4
Relación agua/material cementíceo	0.4 , 0.5 , 0.6
Método de mezclado	Mezclado convencional y Mezclado en etapas
Temperatura de los áridos	Normal (~18°) y Alta temperatura (~60°)

Las series de hormigones considerados en el estudio se distribuyen de acuerdo al esquema de la figura 3.1.

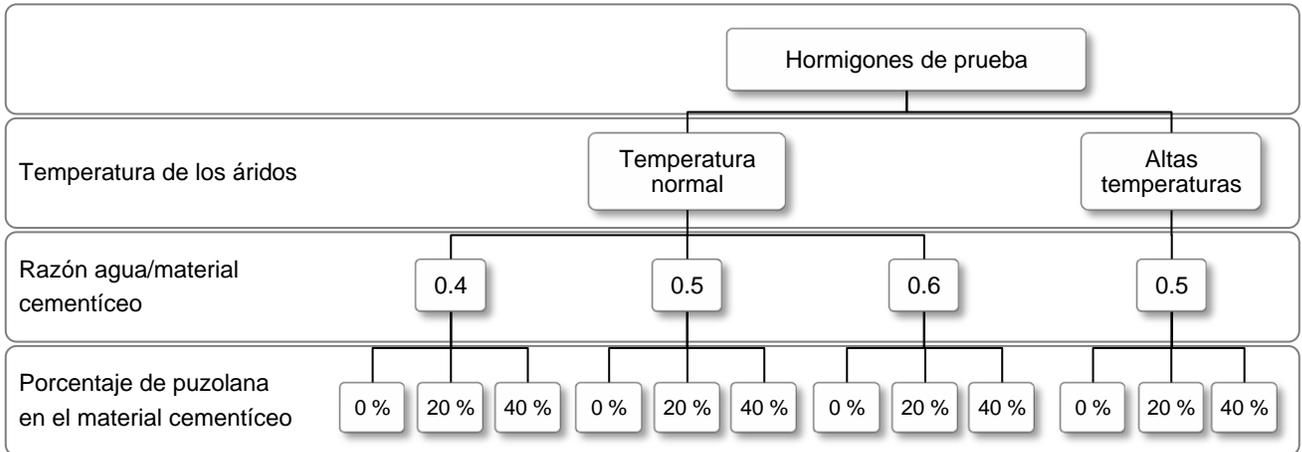


Figura 3.1: Variables a analizar.

Los hormigones con áridos a temperatura normal serán sometidos tanto a mezclado convencional como en etapas, mientras que los hormigones confeccionados con áridos a altas temperaturas se fabricarán sólo mediante el método de mezclado en etapas.

Se elaborarán, por lo tanto, 21 hormigones de prueba.

3.4 Programa de ensayos

Dadas las variables de ensayo definidas, se ensayan 18 series de hormigones a temperatura normal. A cada uno se le realizarán ensayos que corresponden a la caracterización del hormigón fresco y del comportamiento mecánico de la muestra.

Los ensayos de caracterización de hormigón fresco son:

- Densidad
- Exudación
- Asentamiento de cono
- Contenido de aire
- Densidad de pasta (mezclado en etapas)

El comportamiento mecánico del hormigón se observará a través del ensayo a compresión de 5 probetas de 15 x 15 x 15 [cm] por hormigón. De ellas, una es ensayada a 7 días, dos son ensayadas a 28 días y dos son ensayadas a 56 días. Además, mediante el tamizado del hormigón, se obtendrá el mortero, con el que se fabricará una probeta RILEM, que será ensayada a flexión y compresión a los 28 días.

A los hormigones fabricados utilizando áridos a altas temperaturas se les realizarán los siguientes ensayos de caracterización del hormigón fresco.

- Asentamiento de cono
- Densidad
- Contenido de aire
- Densidad de pasta

El comportamiento mecánico del hormigón se evalúa a través del ensayo a compresión de 5 probetas cúbicas de 15 [cm]. De ellas, una es ensayada a 7 días, dos son ensayadas a 28 días y dos son ensayadas a 56 días.

La denominación de las muestras viene dada tanto por sus características de composición como por la forma en que se fabrica. La representación definida se estructura de la siguiente manera: [razón agua/cemento – porcentaje de puzolana en el material cementíceo – tipo de mezclado (C, convencional y E, en etapas) – temperatura de los áridos (T, alta temperatura)].

Tabla 3.2: Denominación de las series.

Serie	Razón agua / material cementíceo			Razón puzolana / material cementíceo			Temperatura Áridos		Método de mezclado	
	0.4	0.5	0.6	0	0.2	0.4	Normal	Alta	Convencional	De dos etapas
0.4 - 0 %P - C	x			x			x		x	
0.4 - 20 %P - C	x				x		x		x	
0.4 - 40 %P - C	x					x	x		x	
0.5 - 0 %P - C		x		x			x		x	
0.5 - 20 %P - C		x			x		x		x	
0.5 - 40 %P - C		x				x	x		x	
0.6 - 0 %P - C			x	x			x		x	
0.6 - 20 %P - C			x		x		x		x	
0.6 - 40 %P - C			x			x	x		x	
0.4 - 0 %P - E	x			x			x			x
0.4 - 20 %P - E	x				x		x			x
0.4 - 40 %P - E	x					x	x			x
0.5 - 0 %P - E		x		x			x			x
0.5 - 20 %P - E		x			x		x			x
0.5 - 40 %P - E		x				x	x			x
0.6 - 0 %P - E			x	x			x			x
0.6 - 20 %P - E			x		x		x			x
0.6 - 40 %P - E			x			x	x			x
0.5 - 0 %P - E - T		x		x				x		x
0.5 - 20 %P - E - T		x			x			x		x
0.5 - 40 %P - E - T		x				x		x		x

CAPÍTULO 4 Desarrollo experimental

4.1 Introducción

Dadas las variables de estudio escogidas, se procede a la determinación de las dosificaciones de los hormigones a elaborar, a la fabricación de ellos, con los distintos materiales y procedimientos, y al ensayo de los mismos.

Los materiales y maquinaria a utilizar son caracterizados, las dosificaciones especificadas y los procedimientos detallados en el presente capítulo.

4.2 Caracterización de materiales

4.2.1 Cemento

El cemento empleado en el trabajo experimental corresponde a cemento Pórtland de Polpaico, producido en la planta cementera nacional de Cerro Blanco.

Los ensayos de caracterización del cemento se realizaron en el laboratorio de Aglomerantes de IDIEM.

Las propiedades de éste cemento, según la norma NCh 148 Of. 68 “Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales”, se encuentran en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3.

Tabla 4.1: Resultado de ensayos físicos.

Peso específico	3.17
Superficie específica [cm ² /g]	2850
Fraguado inicial [min]	90
Fraguado final [min]	180
Consistencia normal [%]	25.5

Tabla 4.2: Resultado de análisis químico.

Pérdida por calcinación [%]		1.10
Residuo insoluble [%]		0.40
Contenido de	SiO ₂ [%]	14.89
	CaO [%]	70.45
	Al ₂ O ₃ [%]	3.27
	Fe ₂ O ₃ [%]	3.88
	SO ₃ [%]	2.68
	MgO [%]	2.86
	K ₂ O [%]	0.13
	Na ₂ O [%]	0.21
	H ₂ O [%]	1.02
	MnO ₂ [%]	0.10
Cl [%]	0.01	

Tabla 4.3: Resultado de ensayos mecánicos.

Resistencia a compresión [kgf/cm ²]	7 días	369
	28 días	535
	60 días	548
Resistencia a flexión [kgf/cm ²]	7 días	65
	28 días	79
	60 días	84

4.2.2 Puzolana

La puzolana utilizada en este estudio fue proporcionada por la empresa Polpaico y es la misma que se utiliza en las plantas cementeras nacionales de la Región Metropolitana. Éste material proviene del yacimiento que se encuentra en la comuna de Pudahuel, Santiago.

Esta fue proporcionada en estado natural, por lo que debe ser preparada para ser utilizada en la fabricación de cementos de laboratorio.

4.2.2.1 Procesamiento de la puzolana

- Secado y tamizado

La puzolana fue secada en horno a una temperatura de 120°C hasta peso constante en el Laboratorio de Geotecnia de IDIEM.

Con el fin de eliminar la mayor cantidad de sobretamaño, material de gran tamaño ajeno a la puzolana que viene con ella debido a su procedencia natural, este suplemento cementíceo es tamizado. Para esto, se utiliza un tamiz N°10 de la norma ASTM, en el mismo laboratorio.

Esto permite preparar el material para su posterior molienda, ya que disminuye el tamaño máximo de las partículas y lo hace un material más definido.

- Molienda

Dado que los cementos comerciales Pórtland puzolánicos y puzolánico en su fabricación introducen la puzolana en el proceso de molienda conjunta y que el clínter tiene una dureza mayor que la puzolana natural, se presume que la puzolana termina el proceso de molienda con una finura mayor que el cemento.

Por este motivo, se definió utilizar una finura de 5.500 [cm^2/g] para la puzolana, mayor que la finura de 2.850 [cm^2/g] que tiene el cemento utilizado.

El proceso de molienda se realizó en la empresa SIKA S.A Chile, ubicada en Avda. Presidente Salvador Allende 85, San Joaquín.

El molino utilizado permite cargas de 20 [kg] y se determinó la finura mediante ensayos utilizando un permeabilímetro de Blaine, cada cierto tiempo, para conocer el periodo de molienda necesario para lograr la finura solicitada.

Una vez molido el material, se envasó en bolsas plásticas para su posterior traslado a las dependencias de IDIEM.

4.2.2.1 Caracterización de la puzolana

Para la caracterización de la puzolana, se realizaron múltiples ensayos que permitirán conocer a fondo el material utilizado.

En el laboratorio de Aglomerantes de IDIEM se le realizaron los siguientes ensayos: actividad puzolánica, peso específico, composición química y superficie específica.

La norma NCh 161 E Of. 69 “Cemento – Puzolana para uso de cementos – Especificaciones” describe el ensayo de actividad puzolánica. Los resultados encontrados son los siguientes:

Tabla 4.4: Actividad puzolánica.

Resistencia a los 7 días [kgf/cm^2]	Resistencia promedio a los 7 días [kgf/cm^2]
83	82
82	
80	

Los ensayos de peso específico y finura (superficie específica) se describen en las normas NCh 154 Of. 69 “Cemento – Determinación del peso específico relativo” y NCh 159 Of. 70 “Cemento - Determinación de la superficie específica por el permeabilímetro según Blaine”. A partir de ellas se encontraron los resultados indicados en la tabla 4.5.

Tabla 4.5: Resultados análisis físicos.

Peso específico relativo	2.4
Superficie específica [cm^2/g]	6650

La composición química se describe a continuación:

Tabla 4.6: Resultados análisis químico.

Contenido de	SiO ₂ [%]	67.80
	CaO [%]	3.60
	Al ₂ O ₃ [%]	13.31
	Fe ₂ O ₃ [%]	2.36
	SO ₃ [%]	0.12
	MgO [%]	0.80
	K ₂ O [%]	4.09
	Na ₂ O [%]	5.50
	H ₂ O [%]	1.60
	MnO ₂ [%]	0.13
	Cl [%]	0.09

4.2.3 Áridos

Los áridos utilizados para la elaboración de los distintos hormigones fueron proporcionados por la empresa Pétreos Río Maipo, la cual procesa material fluvial de dicho río.

Estos áridos corresponden a una gravilla de tamaño máximo 3/4" y a una arena gruesa, que presentan las granulometrías que se muestran en la figura 4.1.

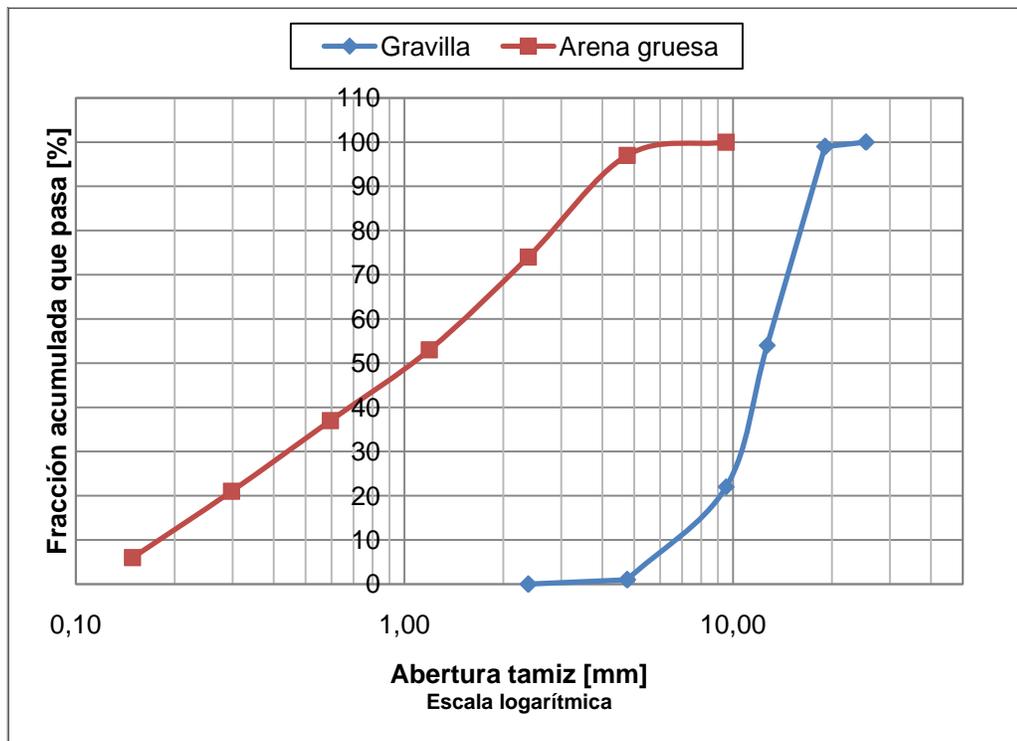


Figura 4.1: Curva granulométrica de los áridos.

Utilizando estas granulometrías, se determinaron las fracciones que permiten que el árido se ajuste a la banda granulométrica recomendada por RILEM² para ensayo e investigación de hormigones de laboratorio. (23)

La banda granulométrica recomendada por RILEM es presentada en la figura 4.2.

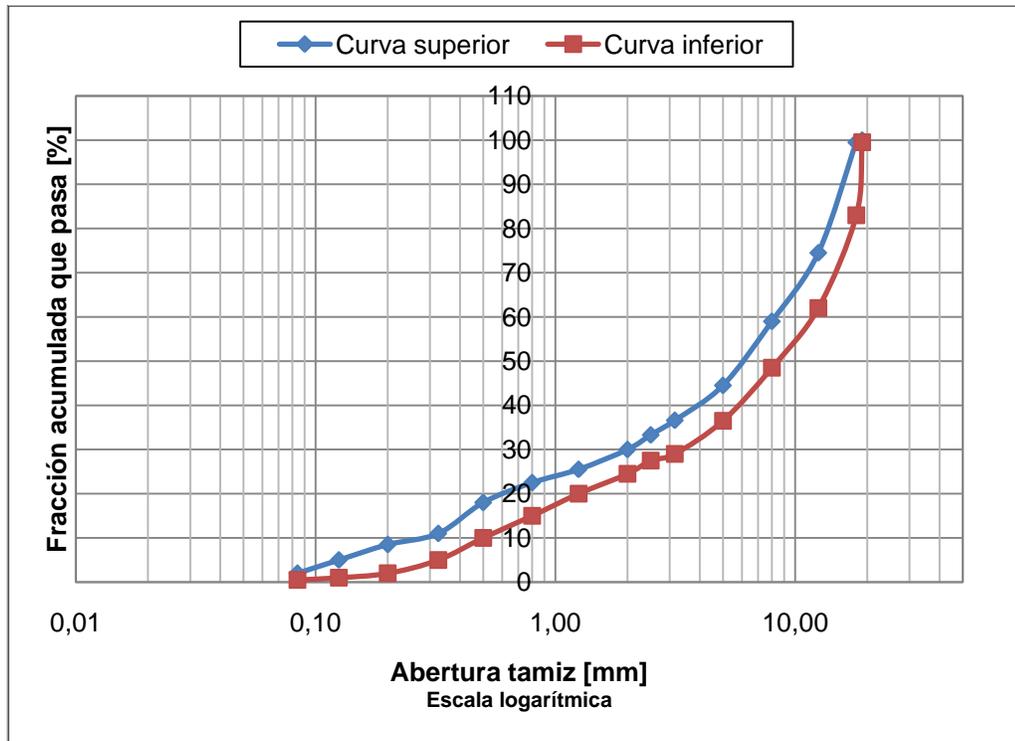


Figura 4.2: Banda granulométrica de los áridos.

Las proporciones en las que se mezclaron la gravilla y arena de modo de obtener una curva granulométrica que se encuentre en la banda granulométrica dada por la RILEM se encuentran en la tabla 4.7.

Tabla 4.7: Proporción de áridos.

Árido	Proporción [%]
Gravilla	58
Arena	42

Utilizando estos valores se obtiene la figura 4.3, en la que la curva combinada se encuentra dentro de la banda granulométrica especificada.

² Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Asociación técnica para el desarrollo del conocimiento de las propiedades de los materiales y comportamiento de la estructuras.

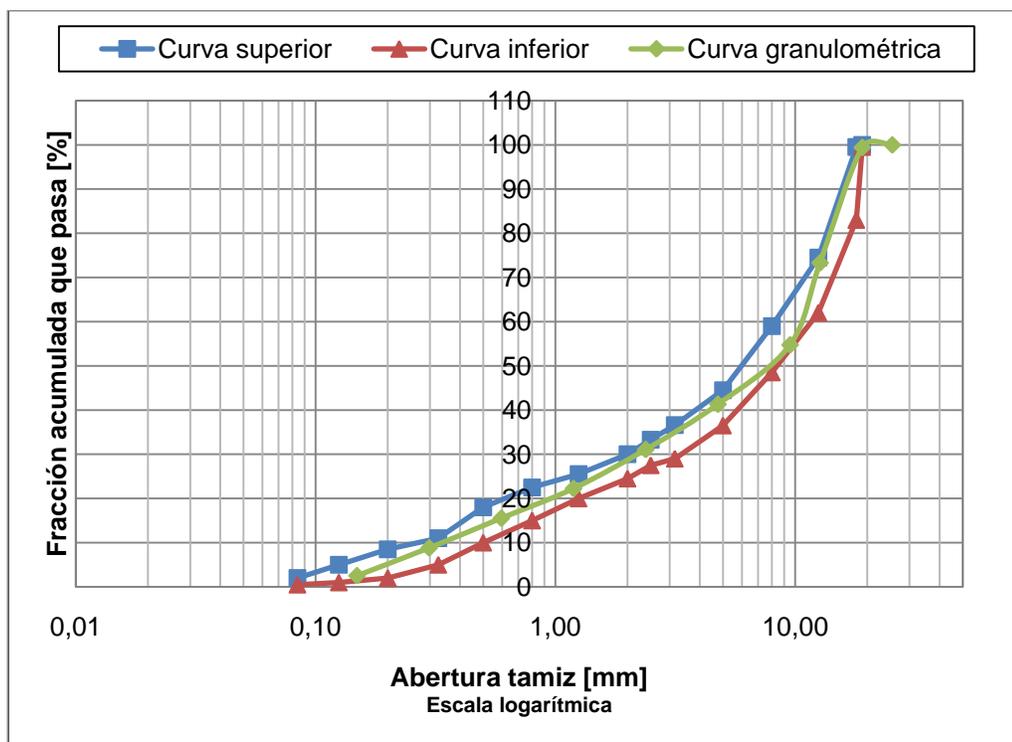


Figura 4.3: Curva granulométrica dentro de la banda.

Los ensayos de densidad real, densidad aparente y de absorción de la gravilla y la arena, fueron realizados en el laboratorio de áridos de IDIEM, utilizando las normas NCh 1116.E Of. 77 “Áridos para morteros y hormigones - Determinación de la densidad aparente”, NCh 1117.E Of. 77 “Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades real y neta de la absorción de agua de las gravas” y NCh 1239 Of. 77 “Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades real y neta de la absorción de agua de las arenas”, respectivamente.

Tabla 4.8: Resultados análisis físicos.

	Gravilla	Arena
Densidad aparente compactada [g/cm ³]	1.596	1.791
Densidad aparente suelta [g/cm ³]	1.502	1.653
Densidad real árido saturado superficie seca [g/cm ³]	2.726	2.700
Densidad real árido seco [g/cm ³]	2.698	2.664
Densidad neta [g/cm ³]	2.775	2.765
Absorción [%]	1.040	1.370

4.2.4 Agua

El agua ocupada en el trabajo experimental fue agua potable de la ciudad de Santiago a temperatura de 20 ± 2 °C.

4.3 Elaboración de cementos Pórtland puzolánicos y puzolánicos de laboratorio

Los cementos Pórtland puzolánicos y puzolánicos se definen como el producto que se obtiene de la molienda conjunta de clínker, puzolana en distintas proporciones y yeso.

Dado que se quiere utilizar en los ensayos de los hormigones de prueba materiales cementíceos con una proporción de puzolana conocida, no se utilizaron cementos comerciales chilenos, sino que se fabricaron cementos Pórtland puzolánicos y puzolánicos de laboratorio.

El cemento Pórtland puzolánico elaborado contenía un 20% de puzolana natural y el cemento puzolánico un 40%, los que se confeccionaron utilizando el cemento Pórtland y la puzolana molida caracterizados anteriormente.

Para la elaboración de los cementos Pórtland puzolánicos y puzolánicos, se homogeneizaron estas materias primas utilizando la máquina homogeneizadora del área de aglomerantes de IDIEM. El proceso se realizó en cargas de 30 kilos por 30 minutos.



Figura 4.4: Máquina homogeneizadora.

Luego, el cemento fabricado fue identificado y envasado en bolsas plásticas para su posterior uso en la fabricación de hormigones.

4.3.1 Caracterización de cementos Pórtland puzolánicos y puzolánicos de laboratorio

La caracterización de los cementos Pórtland puzolánicos y puzolánicos de laboratorio se realizó en el laboratorio de Aglomerantes de IDIEM.

Las propiedades de éstos cementos, según la norma NCh 148 Of. 68 “Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales”, se encuentran en las tablas 4.9, 4.10 y 4.11.

Tabla 4.9: Resultado de ensayos físicos.

	Cemento Pórtland	Cemento Pórtland puzolánico (20 % puzolana)	Cemento puzolánico (40 % puzolana)
Peso específico	3.17	2.99	2.81
Superficie específica [cm ² /g]	2850	3650	4050
Fraguado inicial [min]	90	100	130
Fraguado final [min]	180	180	190
Consistencia normal [%]	25.5	26.75	28.75

Tabla 4. 10: Resultado de análisis químico.

		Cemento Pórtland	Cemento Pórtland puzolánico (20 % puzolana)	Cemento puzolánico (40 % puzolana)
Pérdida por calcinación [%]		1.10	1.70	2.40
Residuo insoluble [%]		0.40	15.98	32.02
Contenido de	SiO ₂ [%]	14.89	25.60	35.42
	CaO [%]	70.45	56.19	43.33
	Al ₂ O ₃ [%]	3.27	5.56	7.44
	Fe ₂ O ₃ [%]	3.88	3.49	3.17
	SO ₃ [%]	2.68	2.29	1.78
	MgO [%]	2.86	2.39	1.88
	K ₂ O [%]	0.13	0.83	1.52
	Na ₂ O [%]	0.21	1.62	2.74
	H ₂ O [%]	1.02	1.49	2.10
	MnO ₂ [%]	0.10	0.11	0.11
	Cl [%]	0.01	0.02	0.05

Tabla 4.11: Resultado de ensayos mecánicos.

		Cemento Pórtland	Cemento Pórtland puzolánico (20 % puzolana)	Cemento puzolánico (40 % puzolana)
Resistencia a compresión [kgf/cm ²]	7 días	369	292	202
	28 días	535	465	361
	60 días	548	468	374
Resistencia a flexión [kgf/cm ²]	7 días	65	56	41
	28 días	79	74	58
	60 días	84	76	70

4.4 Dosificación

El cálculo de las dosificaciones se inicia con la definición de un porcentaje de áridos que permita obtener descensos de cono de entre 12 y 16 [cm] para los hormigones elaborados con cemento Pórtland mediante mezclado convencional. De esta forma, se analizará cómo varía la trabajabilidad al aumentar el porcentaje de puzolana en el material cementíceo y al modificar el método de mezclado.

Una mayor cantidad de áridos en un volumen de hormigón significará una menor proporción de pasta de material cementíceo, que es necesaria para mantener el hormigón cohesionado y homogéneo. Además lo hará un hormigón más rígido al tener más partículas de mayor tamaño.

Luego de la elaboración de 19 hormigones de prueba que permitieron estimar el contenido de árido necesario para la obtención del asentamiento de cono definido, se obtuvo las proporciones indicadas en la tabla 4.12.

Tabla 4.12: Porcentaje de áridos en el volumen total.

Razón agua/cemento	Porcentaje de Áridos [%]
0.4	60
0.5	66
0.6	70

Además, dada la curva granulométrica del árido combinado a utilizar, se tiene que la gravilla corresponde a un 58 % del total del peso de los áridos y un 42 % es arena gruesa. Con estas proporciones se obtiene una curva granulométrica del árido que cumple con la banda RILEM, como se observa en la figura 4.3.

Con las propiedades de los áridos detalladas en el punto 4.1, las variables a estudiar especificadas anteriormente en la tabla 3.2, que permitirán comparar distintos contenidos de puzolana para variadas razones agua/cemento, los pesos específicos considerados y un contenido de aire estimado, se completan los antecedentes necesarios para determinar las cantidades de cada material a utilizar.

Tabla 4.13: Datos considerados.

Peso específico cemento	2.9
Peso específico puzolana	2.3
Contenido de aire [%]	1.2

Las dosificaciones calculadas serán las mismas para los hormigones elaborados tanto con el método convencional como en etapas.

4.4.1 Dosificación de hormigones elaborados con mezclado convencional y mezclado en etapas

Las dosificaciones a elaborar son las indicadas en la tabla 4.14, suponiendo que los áridos se encuentran en estado saturado con superficie seca.

El procedimiento de dosificación se encuentra detallado en el Anexo I.

Tabla 4.14: Dosificación de cada serie para un metro cúbico.

Serie	Cemento [kg/m ³]	Puzolana [kg/m ³]	Material cementíceo [kg/m ³]	Gravilla [kg/m ³]	Arena [kg/m ³]	Agua [kg/cm ³]
0.4 - 0 %P	520.9	0.0	520.9	944.8	684.2	208.4
0.4 - 20 %P	406.9	101.7	508.6	944.8	684.2	203.5
0.4 - 40 %P	298.2	198.8	496.9	944.8	684.2	198.8
0.5 - 0 %P	388.2	0.0	388.2	1039.3	752.6	194.1
0.5 - 20 %P	304.1	76.0	380.1	1039.3	752.6	190.1
0.5 - 40 %P	223.4	149.0	372.4	1039.3	752.6	186.2

Serie	Cemento [kg/m ³]	Puzolana [kg/m ³]	Material cementíceo [kg/m ³]	Gravilla [kg/m ³]	Arena [kg/m ³]	Agua [kg/cm ³]
0.6 - 0 %P	304.8	0.0	304.8	1102.3	798.2	182.9
0.6 - 20 %P	239.3	59.8	299.1	1102.3	798.2	179.5
0.6 - 40 %P	176.2	117.5	293.6	1102.3	798.2	176.2

Las humedades de los áridos con los que se trabajó fueron registradas el día anterior a la preparación de la mezcla, para realizar la posterior corrección por humedad. Se calculó entonces la humedad libre de los áridos utilizando como dato las absorciones que se encuentran en la tabla 4.8.

Estas humedades medidas son las que se indican en la tabla 4.15.

Tabla 4.15: Humedad de los áridos.

Serie	Humedad		Humedad libre	
	Arena [%]	Gravilla [%]	Arena [%]	Gravilla [%]
0.4 - 0 %P - C	6.94	1.33	5.57	0.29
0.4 - 20 %P - C	6.94	1.33	5.57	0.29
0.4 - 40 %P - C	6.94	1.33	5.57	0.29
0.5 - 0 %P - C	3.90	1.10	2.53	0.06
0.5 - 20 %P - C	3.90	1.10	2.53	0.06
0.5 - 40 %P - C	3.90	1.10	2.53	0.06
0.6 - 0 %P - C	7.00	1.10	5.63	0.06
0.6 - 20 %P - C	7.00	1.10	5.63	0.06
0.6 - 40 %P - C	7.00	1.10	5.63	0.06
0.4 - 0 %P - E	4.18	1.25	2.81	0.21
0.4 - 20 %P - E	4.18	1.25	2.81	0.21
0.4 - 40 %P - E	4.18	1.25	2.81	0.21
0.5 - 0 %P - E	3.10	1.10	1.73	0.06
0.5 - 20 %P - E	3.10	1.10	1.73	0.06
0.5 - 40 %P - E	3.10	1.10	1.73	0.06
0.6 - 0 %P - E	3.10	1.10	1.73	0.06
0.6 - 20 %P - E	3.10	1.10	1.73	0.06
0.6 - 40 %P - E	3.10	1.10	1.73	0.06

Los áridos a altas temperaturas se encontraban en estado saturado con superficie seca, por lo que no presentan humedad libre.

Con estas humedades se tiene que las dosificaciones finales que se utilizaron son:

Tabla 4.16: Dosificaciones corregidas por la humedad de los áridos.

Dosificación calculada para 50 [l] de hormigón						
Serie	Cemento [kg]	Puzolana [kg]	Material cementíceo [kg]	Agua [kg]	Gravilla [kg]	Arena [kg]
0.4 - 0 %P - C	26.05	0.00	26.05	8.38	47.24	34.21
0.4 - 20 %P - C	20.35	5.09	25.43	8.13	47.24	34.21
0.4 - 40 %P - C	14.91	9.94	24.85	7.90	47.24	34.21
0.5 - 0 %P - C	19.41	0.00	19.41	8.72	51.97	37.63
0.5 - 20 %P - C	15.21	3.80	19.01	8.52	51.97	37.63
0.5 - 40 %P - C	11.17	7.45	18.62	8.33	51.97	37.63
0.6 - 0 %P - C	15.24	0.00	15.24	6.86	55.12	39.91
0.6 - 20 %P - C	11.96	2.99	14.96	6.69	55.12	39.91
0.6 - 40 %P - C	8.81	5.87	14.68	6.53	55.12	39.91
0.4 - 0 %P - E	26.05	0.00	26.05	9.36	47.24	34.21
0.4 - 20 %P - E	20.35	5.09	25.43	9.11	47.24	34.21
0.4 - 40 %P - E	14.91	9.94	24.85	8.88	47.24	34.21
0.5 - 0 %P - E	19.41	0.00	19.41	9.02	51.97	37.63
0.5 - 20 %P - E	15.21	3.80	19.01	8.82	51.97	37.63
0.5 - 40 %P - E	11.17	7.45	18.62	8.63	51.97	37.63
0.6 - 0 %P - E	15.24	0.00	15.24	8.42	55.12	39.91
0.6 - 20 %P - E	11.96	2.99	14.96	8.25	55.12	39.91
0.6 - 40 %P - E	8.81	5.87	14.68	8.09	55.12	39.91

Dosificación calculada para 30 [l] de hormigón						
Serie	Cemento [kg]	Puzolana [kg]	Material cementíceo [kg]	Agua [kg]	Gravilla [kg]	Arena [kg]
0.5 - 0 %P - E - T	11.65	0.00	11.65	5.82	31.18	22.58
0.5 - 20 %P - E - T	9.12	2.28	11.40	5.70	31.18	22.58
0.5 - 40 %P - E - T	6.70	4.47	11.17	5.59	31.18	22.58

4.4.2 Dosificación de pastas de hormigones elaborados con mezclado en etapas

Para la elaboración de hormigones mediante el método de mezclado en etapas, se fabricó inicialmente la pasta de cemento en dos coladas.

Dado que en el procedimiento de fabricación, mezclado y trasvasije de pasta se producen pérdidas y que se realizó el ensayo de densidad de la pasta, se fabricó mas pasta que la requerida para el hormigón. Para hormigones confeccionados con áridos a temperatura normal, se fabricó 2.5 [l] más de pasta que la necesaria para la fabricación de un hormigón de 50 [l].

Dadas las humedades que se encuentran en la tabla 4.15, las dosificaciones de las pastas a fabricar son las indicadas en la tabla 4.17.

Tabla 4.17: Dosificación de cada colada de pasta.

Serie	Agua [kg]	Material cementíceo [kg]
0.4 - 0 %P - E	5.32	14.82
0.4 - 20 %P - E	5.18	14.47
0.4 - 40 %P - E	5.05	14.14
0.5 - 0 %P - E	5.22	11.24
0.5 - 20 %P - E	5.11	11.01
0.5 - 40 %P - E	5.00	10.78
0.6 - 0 %P - E	4.98	9.01
0.6 - 20 %P - E	4.88	8.84
0.6 - 40 %P - E	4.78	8.68

En el caso de los hormigones confeccionados con áridos a altas temperaturas, se fabricó 2 [l] más de pasta que la necesaria para la fabricación de un hormigón de 30 [l].

Considerando que el procedimiento de fabricación de estos hormigones contempla el uso de áridos saturados con superficie seca, es decir, sin humedad libre, se tiene que las dosificaciones de estas pastas son las que se encuentran en la tabla 4.18.:

Tabla 4.18: Dosificación de las pastas de hormigones elaborados con áridos a altas temperaturas.

Serie	Agua [kg]	Material cementíceo [kg]
0.5 - 0 %P - E - T	7.01	14.02
0.5 - 20 %P - E - T	6.86	13.76
0.5 - 40 %P - E - T	6.72	13.48

Una vez fabricada la pasta, se procede a la fabricar el hormigón según el procedimiento descrito en 4.5.1.2 y 4.5.1.3.

4.5 Metodología de ensayo

4.5.1 Elaboración de hormigones

La elaboración de los hormigones y su posterior ensayo se realizó en el laboratorio de hormigones de IDIEM.

Los hormigones a estudiar fueron fabricados con distinto procedimiento dependiendo del tipo de mezclado que corresponde, conforme al programa.

Estos procedimientos fueron definidos elaborando diversos hormigones de prueba, con los que se determinó los tiempos necesarios de mezclado para obtener un hormigón homogéneo y las dosificaciones de modo de obtener el cono especificado.

4.5.1.1 Maquinaria utilizada

El mezclado convencional se llevó a cabo utilizando una betonera eléctrica de capacidad máxima de 150 [l] de hormigón.

Esta betonera de eje basculante rota a una velocidad de aproximadamente 20 [rev./min].



Figura 4.5: Betonera.

Para el mezclado en etapas se utilizó un mezclador de mortero eléctrico de capacidad máxima de 20 [l] marca Blakeslee.

Este aparato tiene una paleta de movimiento planetario, que rota a una velocidad de aproximadamente 37.5 [rev./min] y 66 [rev./min.] en las modalidades 1 y 3 respectivamente. El recipiente se mantiene fijo y la paleta gira además en torno a su propio eje a una velocidad de aproximadamente 2.33 [rev./vuelta planetaria].



Figura 4.6: Mezclador de mortero.

A continuación se especifican los procedimientos de mezclado utilizados.

4.5.1.2 Procedimientos previos a la fabricación del hormigón

Previamente a la fabricación de cada hormigón se procedió de la siguiente manera:

- Se mezcló el cemento Pórtland con la adición de puzolana correspondiente, elaborando de esta forma un material cementíceo homogéneo.
- Se eliminó por cernido el material de tamaño mayor que 19 [mm].
- Se estimó las humedades de los áridos, de manera de calcular la humedad libre y la cantidad de agua a agregar a la mezcla.

4.5.1.3 Hormigones elaborados con mezclado convencional

Se fabricaron 9 hormigones utilizando el mezclado convencional. El procedimiento utilizado fue el siguiente:

- Se pesaron el cemento, los áridos separados en arena y gravilla y el agua, especificados anteriormente en la dosificación.
- Poniendo la abertura del tambor de la betonera en un ángulo con la vertical de 60° se agregaron a esta las materias primas en el siguiente orden:
 - gravilla
 - arena
 - cemento

El tiempo de carga de materiales correspondió a aproximadamente 30 segundos.

- Se mezclaron a una velocidad constante 20 [rev./min.] por 30 segundos.
- Se agregó aproximadamente 3/4 del agua y se mezcló por otros 30 segundos a la misma velocidad.

- Se agregó el resto del agua y se mezcló por otros 2 minutos, poniendo la abertura del tambor de la betonera en un ángulo con la vertical de 80°. Al finalizar este proceso, el hormigón ha sido bien homogeneizado.
- Se vació el hormigón de la betonera sobre una carretilla, lo que demoró 10 segundos.

El tiempo de mezclado húmedo correspondió entonces a aproximadamente 2.5 minutos para todos los hormigones fabricados mediante mezclado convencional. El tiempo de todo el proceso de fabricación del hormigón, incluyendo carga y descarga de materiales, correspondió a aproximadamente 3 minutos con 10 segundos.

4.5.1.4 Hormigones elaborados con áridos a temperatura normal con mezclado en etapas

Se fabricaron 9 hormigones utilizando el mezclado en etapas. El procedimiento utilizado fue el siguiente:

- Se pesaron el cemento, los áridos, el agua especificados anteriormente en la dosificación.
- Se vació la gravilla dentro de la betonera y se dispersó las partículas, encendiéndola por 5 segundos.
- Se pesó la mitad del agua necesaria, que aparece en la tabla 4.17, para la fabricación de la pasta y se vierte en el recipiente de la máquina mezcladora de mortero.
- Se puso a funcionar la máquina en velocidad 1 y se vació durante un minuto el contenido total de material cementíceo necesario para la fabricación de media colada de pasta.
- Se detuvo la máquina por 45 segundos y se despegaron de los bordes y del fondo los grumos de pasta formados.
- Se tapó el pocillo y se puso a funcionar la máquina en velocidad 3 durante 1 minuto.
- Se destapó el recipiente, se vertió el contenido en un receptáculo y se pesó el contenido.
- Se vertió en la betonera el contenido de pasta y se puso en funcionamiento con un ángulo con la vertical de 40°, de modo de impedir que la pasta se pegue en las paredes del tambor.
- Se procedió entonces a fabricar la otra mitad de pasta mediante el mismo procedimiento, introduciendo esta vez en la betonera la pasta faltante para la fabricación de 50 [l] de hormigón.
- Una vez que la betonera tuvo la cantidad de pasta correspondiente, se cambió el ángulo con la vertical del tambor a 80° y se mezcló durante 30 segundos más, de modo que la pasta cubriese completamente la gravilla.
- Se vertió en la betonera la arena ya pesada y se mezcló los materiales durante 1.5 minutos.

El tiempo de mezclado corresponde entonces a aproximadamente 10.5 minutos.

4.5.1.5 Hormigones elaborados con áridos a altas temperaturas con mezclado en etapas

Se fabricaron 3 hormigones utilizando el mezclado en etapas y áridos a altas temperaturas. El procedimiento fue el siguiente:

- Se pesó el cemento y el agua.
- Se pusieron en pailas la arena húmeda y la gravilla con agua, que se introdujeron en el horno a 80°C.
- Cada 1 hora se observaron y revolviaron la arena y gravilla de modo de mantener la humedad y aumentar la temperatura de ellos.
- Después de aproximadamente 5 horas, los áridos se encontraron en estado saturado seco, lo que fue confirmado por el encargado del laboratorio de áridos de IDIEM.
- Los áridos se sacaron del horno y fueron pesados.
- Se vació la gravilla dentro de la betonera y se dispersaron haciéndola funcionar por 5 segundos.
- Se pesó el agua necesaria que aparece en la tabla 4.18 para la fabricación de la pasta y se vertió en el recipiente de la máquina mezcladora de mortero.
- Se puso a funcionar la máquina en velocidad 1 y se vació durante un minuto el contenido total de cemento necesario para la fabricación de la colada de pasta.
- Se detuvo la máquina por 45 segundos y se despegaron de los bordes y del fondo los grumos de pasta formados.
- Se tapó el pocillo y se puso a funcionar la máquina en velocidad 3 durante 1 minuto.
- Se destapó el recipiente, se vertió el contenido en un receptáculo y se pesó el contenido, de modo de tener en la betonera el peso de pasta para el hormigón a elaborar.
- Se vertió en la betonera el contenido de pasta y se puso en funcionamiento con un ángulo vertical de 40°, de modo de impedir que la pasta se pegara en las paredes del tambor.
- Una vez que la betonera tuvo la cantidad de pasta correspondiente, se cambió el ángulo con la vertical del tambor a 80° y se mezcló durante 30 segundos más, de modo que la pasta cubriese completamente la gravilla.
- Se vertió en la betonera la arena ya pesada y se mezcló los materiales durante 1.5 minutos.

El tiempo de mezclado corresponde entonces a aproximadamente 6.5 minutos.

Una vez fabricado el hormigón mediante el método de mezclado correspondiente, se procedió a la realización de los ensayos de caracterización de comportamiento del hormigón fresco y a la confección de probetas que permitirán realizar los ensayos al hormigón endurecido.

4.5.2 Fabricación de probetas cúbicas

El proceso de fabricación de probetas cúbicas se realizó en el laboratorio de hormigones de IDIEM.

4.5.2.1 Moldes a utilizar

Los moldes que se emplearon fueron probetas cúbicas de 15 [cm] de arista de resina, típicamente utilizados para el ensayo de hormigones de prueba.

Estos son de materiales y rigidez adecuada que permiten obtener una probeta de hormigón acorde a las especificaciones de la norma NCh 1017 Of. 75 “Hormigón – Confección y curado en obra de probetas para ensayos de tracción y compresión”.

Éstos se observan en la figura 4.7.

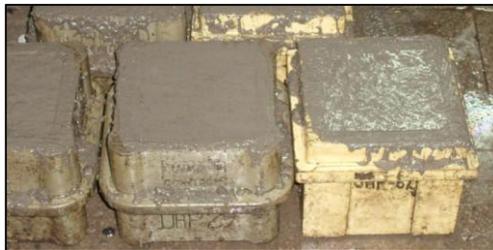


Figura 4.7: Moldes.

4.5.2.2 Llenado y compactación de moldes

Los moldes se llenaron de acuerdo a la norma NCh 1017 Of. 75 “Hormigón – Confección y curado en obra de probetas para ensayos de tracción y compresión”.

Todas las probetas se compactaron utilizando vibrado externo, el que se realizó con una mesa de vibrado, que se observa en la figura 4.8.



Figura 4.8: Mesa de vibrado.

4.5.2.3 Curado inicial

Durante el curado inicial, en que el cubo se encuentra aún en el molde, se debe evitar la evaporación y mantener la temperatura entre 16°C y 27°C, como indica la norma NCh 1017 Of. 75 “Hormigón – Confección y curado en obra de probetas para ensayos de tracción y compresión”.

Para esto, se protegió el conjunto de probeta y molde con polietileno hasta el momento del desmolde.

4.5.2.4 Desmolde

Las probetas fueron desmoldadas después de 48 horas, cuando las condiciones de endurecimiento permitieron realizar esta operación sin causar daño a las muestras. En caso contrario, se esperó hasta que las condiciones fueran favorables para el desmolde.

Este procedimiento se realizó utilizando aire comprimido, el que se inyectó en el fondo del molde, lo que empujó la probeta al exterior y permitió que sus caras no se rompieran ni perdieran paralelismo.

4.5.2.5 Curado de probetas

Las condiciones de curado bajo agua al que fueron sometidos los cubos son:

- Fueron sumergidos en agua tranquila a temperatura entre 17°C y 23°C.
- El agua estaba saturada de cal

Estas condiciones son las impuestas por la norma NCh 1017 Of. 75 “Hormigón - Confección y curado en obra de probetas para ensayos de tracción y compresión”.

La piscina de curado se encuentra en el laboratorio de hormigones de IDIEM y presenta un sistema que mantiene el agua a la temperatura y condiciones especificadas.



Figura 4.9: Piscina de curado.

4.5.3 Ensayos de caracterización de comportamiento

Los ensayos para caracterización de comportamiento de los hormigones se realizaron en el laboratorio de hormigones de IDIEM.

4.5.3.1 Ensayos de hormigón fresco

4.5.3.1.1 Asentamiento de cono

La medida del asentamiento del cono de Abrams permite determinar principalmente la fluidez y la forma de derrumbamiento para apreciar la consistencia del hormigón.

El ensayo de asentamiento de cono se realizó siguiendo el procedimiento de la norma NCh 1019 E Of. 74 “Construcción – Hormigón – Determinación de la docilidad – Método de asentamiento del cono de Abrams”.

Este ensayo se realizó después de 5 minutos de agregar el agua a la mezcla en los hormigones elaborados mediante mezclado convencional.



Figura 4.10: Equipo de ensayo de asentamiento de cono de Abrams.

4.5.3.1.2 Densidad

La medida de densidad considera el volumen real de la mezcla de hormigón más el volumen de aire incorporado, por lo que entrega una proporción del peso del hormigón fresco en un volumen.

El ensayo de densidad se realizó utilizando el procedimiento indicado en la norma NCh 1564 Of. 79 "Hormigón – Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y del contenido de aire del hormigón fresco".



Figura 4.11: Equipo de ensayo de densidad.

4.5.3.1.3 Contenido de aire

El método que se describe para determinar el contenido de aire del hormigón fresco, se basa en la medición del cambio de volumen del hormigón sometido a un cambio de presión.

El ensayo de contenido de aire se realizó siguiendo el procedimiento de la normativa vigente. La norma que especifica este ensayo corresponde a la NCh 2184 Of. 92 "Hormigón y mortero – Método de ensayo – Determinación del contenido de aire".



Figura 4.12: Equipo de ensayo de contenido de aire.

4.5.3.1.4 Exudación

Debido a que el hormigón está constituido por materiales de distinta densidad real, tiende a producirse la decantación de los de mayor peso unitario, que son los sólidos. El agua no desciende, por lo que se acumula en la superficie, la que se conoce como exudación.

El procedimiento del ensayo de exudación fue el siguiente:

- Se pesó el molde a utilizar.
- Se llenó una probeta cúbica con hormigón hasta aproximadamente 1 [cm] del borde, utilizando el mismo sistema de llenado y compactación de moldes explicado anteriormente.
- Se pesó la probeta y el molde.
- Se comenzó a tomar el tiempo y cada media hora, utilizando un succionador superficial, se absorbió el agua exudada poniendo un taco pequeño bajo la probeta que permite el escurrimiento del agua hacia una esquina.
- Se registró el volumen de agua acumulada.
- El proceso se terminó cuando la variación entre los registros es nulo.
- Se calculó la exudación acumulada en el tiempo, siguiendo el procedimiento especificado en el anexo I.

Se observa en la figura 4.13, como queda el molde una vez realizado el anterior procedimiento.



Figura 4.13: Molde durante exudación.

4.5.3.1.5 Densidad de pasta

La medida de densidad considera el volumen real de pasta, por lo que entrega una proporción del peso del hormigón fresco en un volumen.

El ensayo de densidad se realizó utilizando el procedimiento indicado en la norma NCh 1564 Of. 79 “Hormigón – Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y del contenido de aire del hormigón fresco”.



Figura 4.14: Molde de ensayo de densidad de pasta.

4.5.3.2 Ensayos de hormigón endurecido

4.5.3.2.1 Resistencia a compresión de probetas cúbicas

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó utilizando el procedimiento indicado en la norma NCh 1037 Of. 77 “Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas”.

El equipo de ensayo corresponde a una prensa Toni Technik.



Figura 4.15: Equipo de ensayo de resistencia a la compresión.

Los resultados obtenidos del ensayo son utilizados para encontrar la resistencia mecánica del hormigón a la edad especificada, utilizando las expresiones matemáticas que aparecen en la misma norma.

Los cubos confeccionados se ensayaron hasta la rotura a los 7, 28 y 56 días.

4.5.3.2.2 Resistencia a compresión y flexión del mortero

Para caracterizar de la resistencia del hormigón fabricado, se analiza el mortero del hormigón elaborado.

El procedimiento de elaboración de las probetas de 4x4x16 [cm] es el siguiente:

- Una vez fabricado el hormigón, éste se tamizó utilizando una malla N°4, para de ésta forma obtener el mortero de él.
- Se llenó un molde RILEM, utilizando una capa de mortero y compactándolo utilizando la mesa vibradora.
- Se enrasó utilizando la llana, como se observa en la figura 4.16.



Figura 4.16: Molde RILEM lleno con mortero.

- Se desmoldó las viguetas a los 2 días de fabricado el molde y se llevaron a piscina de curado en la cámara húmeda, como se observa en la figura 4.17.

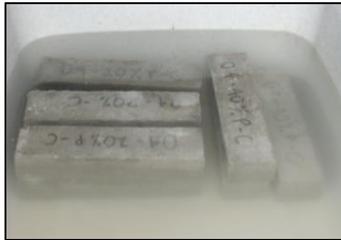


Figura 4.17: Viguetas en proceso de curado.

- Pasados 28 días, se ensayó a flexión y compresión, utilizando el procedimiento indicado en la norma NCh 158 Of. 67 "Cementos – Ensayos de flexión y compresión de morteros de cemento".

El equipo de ensayo corresponde a una prensa Toni Technik, que se observa en figura 4.18.



Figura 4.18: Equipo de ensayo de viguetas RILEM.

CAPÍTULO 5 Resultados

5.1 Introducción

La variación del mezclado del hormigón producirá cambios en sus propiedades, las que pueden evaluarse a través de ensayos de laboratorio, de tanteo visual, entre otras.

Desde el perspectiva visual, los hormigones elaborados mediante mezclado convencional presentan una segregación mayor y menor cohesión y homogeneidad que los hormigones elaborados mediante el método en etapas.

En el presente capítulo se proporcionan los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados al hormigón fresco y endurecido de las series especificadas. Con ellos, se analizará el comportamiento del hormigón y se estimará cómo las variables a estudiar influyen en él.

5.2 Mezclado convencional

5.2.1 Propiedades del hormigón fresco

5.2.1.1 Asentamiento de cono

A continuación se entregan en la tabla 5.1 los resultados del ensayo de asentamiento de cono de Abrams realizado a los hormigones de prueba. El procedimiento se realizó de acuerdo a la norma NCh 1019.E Of.74 "Construcción - Hormigón - Determinación de las docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams" en el laboratorio de hormigones de prueba de IDIEM.

Tabla 5.1: Asentamiento de cono de Abrams de hormigones elaborados mediante mezclado convencional.

Serie	Asentamiento de cono [cm]
0.4 - 0 %P - C	16.0
0.4 - 20 %P - C	13.0
0.4 - 40 %P - C	10.0
0.5 - 0 %P - C	15.0
0.5 - 20 %P - C	13.5
0.5 - 40 %P - C	11.0
0.6 - 0 %P - C	14.5
0.6 - 20 %P - C	13.5
0.6 - 40 %P - C	11.5

5.2.1.2 Densidad

En la tabla 5.2 se entregan los resultados del ensayo de densidad realizado a los hormigones de prueba. El procedimiento fue realizado según la norma NCh 1564 Of.79 "Hormigón - Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y de contenido de aire del hormigón fresco" en el laboratorio de hormigones de prueba de IDIEM.

Tabla 5.2: Densidad de hormigones confeccionados mediante mezclado convencional.

Serie	Densidad [kg/m ³]
0.4 - 0 %P - C	2418
0.4 - 20 %P - C	2394
0.4 - 40 %P - C	2373
0.5 - 0 %P - C	2430
0.5 - 20 %P - C	2410
0.5 - 40 %P - C	2387
0.6 - 0 %P - C	2440
0.6 - 20 %P - C	2421
0.6 - 40 %P - C	2397

5.2.1.3 Contenido de aire

A continuación se entregan en la tabla 5.3 los resultados del ensayo de contenido de aire realizado a los hormigones de prueba. El procedimiento fue realizado según la norma NCh 1564 Of.79 "Hormigón - Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y de contenido de aire del hormigón fresco" en el laboratorio de hormigones de prueba de IDIEM.

Tabla 5.3: Contenido de aire de hormigones confeccionados mediante mezclado convencional.

Serie	Contenido de aire [%]
0.4 - 0 %P - C	1.1
0.4 - 20 %P - C	1.3
0.4 - 40 %P - C	1.6
0.5 - 0 %P - C	0.9
0.5 - 20 %P - C	1.0
0.5 - 40 %P - C	1.2
0.6 - 0 %P - C	0.9
0.6 - 20 %P - C	0.9
0.6 - 40 %P - C	1.0

5.2.1.4 Exudación

A continuación, en la tabla 5.4, se entregan los resultados del ensayo de exudación realizado a las series de hormigones, con el procedimiento descrito en 4.4.5.1.4, en el laboratorio de hormigones de prueba de IDIEM.

Tabla 5.4: Exudación en el tiempo de hormigones elaborados mediante mezclado convencional.

Serie	Tiempo [min]	Agua exudada [%]
0.4 - 0 %P - C	30	0.40
	60	0.96
	90	1.59
0.4 - 20 %P - C	30	0.39
	60	0.78
	90	1.25
0.4 - 40 %P - C	30	0.31
	60	0.77
	90	1.22
0.5 - 0 %P - C	30	0.93
	60	1.86
	90	2.32
0.5 - 20 %P - C	30	0.51
	60	1.36
	90	1.88
0.5 - 40 %P - C	30	0.35
	60	1.14
	90	1.75
0.6 - 0 %P - C	30	1.80
	60	2.34
	90	2.52
0.6 - 20 %P - C	30	1.31
	60	1.77
	90	2.05
0.6 - 40 %P - C	30	1.00
	60	1.60
	90	1.90

5.2.2 Propiedades del hormigón endurecido

5.2.2.1 Resistencia del mortero del hormigón

A través del ensayo a compresión y flexión de probetas RILEM fabricadas con el mortero del hormigón elaborado se conocerá las resistencias del mortero, indicadas en la tabla 5.5. El ensayo de las mismas se realizó según indica la norma NCh 158 Of.67 "Cementos - Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento".

Tabla 5.5: Resistencia a compresión y flexión a los 28 días de viguetas RILEM de mortero correspondiente a los de hormigones elaborados mediante mezclado convencional.

Serie	Resistencia a flexión [kgf/cm ²]	Resistencia a compresión [kgf/cm ²]
0.4 - 0 %P - C	118	768
0.4 - 20 %P - C	102	620
0.4 - 40 %P - C	84	481
0.5 - 0 %P - C	104	626
0.5 - 20 %P - C	86	487
0.5 - 40 %P - C	66	325
0.6 - 0 %P - C	82	449
0.6 - 20 %P - C	73	342
0.6 - 40 %P - C	54	219

5.2.2.2 Resistencia mecánica del hormigón

A continuación se entregan en la tabla 5.6 los resultados de los ensayos a compresión de los hormigones fabricados, determinados de acuerdo a los procedimientos de ensayo de la norma NCh 1037 Of.77 "Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas", realizados en el laboratorio de hormigones de prueba de IDIEM.

Tabla 5.6: Resistencia a compresión a distintas edades de hormigones elaborados mediante mezclado convencional.

Serie	Resistencia la compresión [kgf/cm ²]		
	7 días	28 días	56 días
0.4 - 0 %P - C	393	696	805
0.4 - 20 %P - C	330	592	713
0.4 - 40 %P - C	237	436	533
0.5 - 0 %P - C	271	504	613
0.5 - 20 %P - C	206	425	517
0.5 - 40 %P - C	142	291	383

Serie	Resistencia la compresión [kgf/cm ²]		
	7 días	28 días	56 días
0.6 - 0 %P - C	172	357	435
0.6 - 20 %P - C	135	298	372
0.6 - 40 %P - C	103	215	275

5.3 Mezclado en etapas

5.3.1 Áridos a temperatura normal

5.3.1.1 Propiedades del hormigón fresco

5.3.1.1.1 Asentamiento de cono

En la tabla 5.7 se entregan los resultados del ensayo de asentamiento de cono de Abrams realizado a los hormigones de prueba. El procedimiento se realizó de acuerdo a la norma NCh 1019.E Of.74 "Construcción - Hormigón - Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams" en el laboratorio de hormigones de prueba de IDIEM.

Tabla 5.7: Asentamiento de cono de hormigones mezclados en etapas.

Serie	Asentamiento de cono [cm]
0.4 - 0 %P - E	10.0
0.4 - 20 %P - E	7.0
0.4 - 40 %P - E	4.0
0.5 - 0 %P - E	9.5
0.5 - 20 %P - E	7.0
0.5 - 40 %P - E	6.0
0.6 - 0 %P - E	8.5
0.6 - 20 %P - E	7.5
0.6 - 40 %P - E	6.5

5.3.1.1.2 Densidad

A continuación se entregan en la tabla 5.8 los resultados del ensayo de densidad realizado a los hormigones de prueba. El procedimiento fue realizado según la norma NCh 1564 Of.79 "Hormigón - Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y de contenido de aire del hormigón fresco" en el laboratorio de hormigones de prueba de IDIEM.

Tabla 5.8: Densidad de hormigones mezclados en etapas.

Serie	Densidad [kg/m ³]
0.4 - 0 %P - E	2403
0.4 - 20 %P - E	2384
0.4 - 40 %P - E	2363
0.5 - 0 %P - E	2410
0.5 - 20 %P - E	2393
0.5 - 40 %P - E	2372
0.6 - 0 %P - E	2419
0.6 - 20 %P - E	2398
0.6 - 40 %P - E	2382

5.3.1.1.3 Contenido de aire

En la tabla 5.9 se entregan los resultados del ensayo de contenido de aire realizado a los hormigones de prueba. El procedimiento fue realizado según la norma NCh 1564 Of.79 “Hormigón - Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y de contenido de aire del hormigón fresco” en el laboratorio de hormigones de prueba de IDIEM.

Tabla 5.9: Contenido de aire de hormigones mezclados en etapas.

Serie	Contenido de aire [%]
0.4 - 0 %P - E	1.4
0.4 - 20 %P - E	1.6
0.4 - 40 %P - E	1.7
0.5 - 0 %P - E	1.2
0.5 - 20 %P - E	1.3
0.5 - 40 %P - E	1.4
0.6 - 0 %P - E	0.9
0.6 - 20 %P - E	1.0
0.6 - 40 %P - E	1.1

5.3.1.1.4 Exudación

A continuación en la tabla 5.10 se entregan los resultados del ensayo de exudación realizado a los hormigones con el procedimiento descrito en 4.4.3.1.4 en el laboratorio de hormigones de prueba de IDIEM.

Tabla 5.10: Exudación en el tiempo de hormigones elaborados mediante mezclado en etapas.

Serie	Tiempo [min]	Agua exudada [%]
0.4 - 0 %P - E	30	0.75
	60	1.21
	90	1.51
0.4 - 20 %P - E	30	0.47
	60	0.85
	90	1.09
0.4 - 40 %P - e	30	0.31
	60	0.54
	90	0.77
0.5 - 0 %P - E	30	1.45
	60	2.02
	90	2.18
0.5 - 20 %P - E	30	1.05
	60	1.45
	90	1.62
0.5 - 40 %P - E	30	0.87
	60	1.13
	90	1.30
0.6 - 0 %P - E	30	1.99
	60	2.37
	90	2.47
0.6 - 20 %P - E	30	1.43
	60	1.88
	90	1.97
0.6 - 40 %P - E	30	1.20
	60	1.56
	90	1.66

5.3.1.1.5 Densidad de pasta

En la tabla 5.11 se entregan los resultados del ensayo de densidad de pasta realizado a la pasta del hormigón según un procedimiento similar al especificado en la norma NCh 1564 Of. 79 "Hormigón – Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y del contenido de aire del hormigón fresco" para el hormigón, en el laboratorio de hormigones de prueba de IDIEM.

Tabla 5.11: Densidad de pasta de hormigones mezclados en etapas.

Serie	Densidad de pasta [kg/m ³]
0.4 - 0 %P - E	1940
0.4 - 20 %P - E	1920
0.4 - 40 %P - E	1841
0.5 - 0 %P - E	1851
0.5 - 20 %P - E	1801
0.5 - 40 %P - E	1751
0.6 - 0 %P - E	1751
0.6 - 20 %P - E	1692
0.6 - 40 %P - E	1662

5.3.1.2 Propiedades del hormigón endurecido

5.3.1.2.1 Resistencia del mortero del hormigón

A través del ensayo a compresión y flexión de viguetas RILEM en la sección de aglomerantes de IDIEM según indica la norma NCh 158 Of.67 "Cementos - Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento", se conocerá el comportamiento del mortero del hormigón fabricado.

Tabla 5.12: Resistencia a compresión y flexión a los 28 días de viguetas RILEM de mortero correspondiente a los de hormigones elaborados mediante mezclado en etapas.

Serie	Resistencia a flexión [kgf/cm ²]	Resistencia a compresión [kgf/cm ²]
0.4 - 0 %P - E	121	777
0.4 - 20 %P - E	105	647
0.4 - 40 %P - E	89	501
0.5 - 0 %P - E	105	626
0.5 - 20 %P - E	88	493
0.5 - 40 %P - E	67	338
0.6 - 0 %P - E	85	449
0.6 - 20 %P - E	72	348
0.6 - 40 %P - E	55	223

5.3.1.2.2 Resistencia mecánica del hormigón

En la tabla 5.13 se entregan los resultados de los ensayos de resistencia a compresión a los 7, 28 y 56 días de los hormigones, determinados de acuerdo a los procedimientos de ensayo de la norma NCh 1037 Of.77 "Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas", realizados en el laboratorio de hormigones de prueba de IDIEM.

Tabla 5.13: Resistencia a compresión a distintas edades de hormigones mezclados en etapas.

Serie	Resistencia la compresión [kgf/cm ²]		
	7 días	28 días	56 días
0.4 - 0 %P - E	462	710	819
0.4 - 20 %P - E	391	613	724
0.4 - 40 %P - E	278	474	560
0.5 - 0 %P - E	306	515	611
0.5 - 20 %P - E	234	436	525
0.5 - 40 %P - E	156	312	381
0.6 - 0 %P - E	197	366	435
0.6 - 20 %P - E	152	306	369
0.6 - 40 %P - E	115	221	276

5.3.2 Áridos a alta temperatura

Los hormigones fabricados con áridos a altas temperaturas presentaron los siguientes promedios de temperatura para los distintos hormigones, indicados en la tabla 5.14.

Tabla 5.14: Temperaturas promedio de los áridos.

Árido	Temperatura [°C]
Gravilla	66
Arena	81

5.3.2.1 Propiedades del hormigón fresco

5.3.2.1.1 Asentamiento de cono

En la tabla 5.15 se entregan los resultados del ensayo de asentamiento de cono de Abrams realizado a los hormigones de prueba. El procedimiento se realizó de acuerdo al procedimiento de ensayo especificado en la norma NCh 1019.E Of.74 "Construcción - Hormigón - Determinación de las docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams" en el laboratorio de hormigones de prueba de IDIEM.

Tabla 5.15: Asentamiento de cono de hormigones mezclados en etapas con áridos a alta temperatura.

Serie	Asentamiento de cono [cm]
0.5 - 0 %P - E - T	9.5
0.5 - 20 %P - E - T	7.0
0.5 - 40 %P - E - T	3.5

5.3.2.1.2 Densidad

A continuación se entregan los resultados del ensayo de densidad realizado a los hormigones de prueba. El procedimiento fue realizado según la norma NCh 1564 Of.79 “Hormigón - Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y de contenido de aire del hormigón fresco” en el laboratorio de hormigones de prueba de IDIEM.

Tabla 5.16: Densidad de hormigones mezclados en etapas con áridos a alta temperatura.

Serie	Densidad [kg/m ³]
0.5 - 0 %P - E - T	2430
0.5 - 20 %P - E - T	2405
0.5 - 40 %P - E - T	2387

5.3.2.1.3 Contenido de aire

En la tabla 5.17 se entregan los resultados del ensayo de contenido de aire realizado a los hormigones de prueba. El procedimiento fue realizado según la norma NCh 1564 Of.79 “Hormigón - Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y de contenido de aire del hormigón fresco” en el laboratorio de hormigones de prueba de IDIEM.

Tabla 5.17: Contenido de aire de hormigones mezclados en etapas con áridos a alta temperatura.

Serie	Contenido de aire [%]
0.5 - 0 %P - E - T	1.0
0.5 - 20 %P - E - T	1.2
0.5 - 40 %P - E - T	1.3

5.3.2.1.4 Densidad de pasta

En la tabla 5.18 se entregan los resultados del ensayo de densidad de pasta realizado a los hormigones según el procedimiento especificado en la norma NCh 1564 Of. 79 “Hormigón – Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y del contenido de aire del hormigón fresco” para el hormigón, en el laboratorio de hormigones de prueba de IDIEM.

Tabla 5.18: Densidad de pasta de hormigones mezclados en etapas con áridos a alta temperatura.

Serie	Densidad de pasta [kg/m ³]
0.5 - 0 %P - E - T	1821
0.5 - 20 %P - E - T	1781
0.5 - 40 %P - E - T	1731

5.3.2.2 Propiedades del hormigón endurecido

5.3.2.2.1 Resistencia mecánica del hormigón

A continuación se entregan los resultados de los ensayos de resistencia a compresión de los hormigones, determinados de acuerdo a los procedimientos de ensayo de la norma NCh 1037 Of.77 "Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas", realizados en el laboratorio de hormigones de prueba de IDIEM.

Tabla 5.19: Resistencia a compresión a distintas edades de hormigones mezclados en etapas con áridos a alta temperatura.

Serie	Resistencia la compresión [kgf/cm ²]		
	7 días	28 días	56 días
0.5 - 0 %P - E - T	256	433	465
0.5 - 20 %P - E - T	211	389	419
0.5 - 40 %P - E - T	154	310	334

CAPÍTULO 6 Análisis de resultados

6.1 Introducción

En el presente capítulo se analizan los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados tanto en el hormigón fresco como endurecido, comparando y analizando el comportamiento de las variables en estudio, definidas anteriormente.

6.2 Mezclado convencional

6.2.1 Propiedades del hormigón fresco

6.2.1.1 Asentamiento de Cono

Los resultados correspondientes al comportamiento de los hormigones estudiados, en el asentamiento de cono, se presentan en las figuras 6.1 y 6.3, considerando las series de hormigones elaborados según el procedimiento convencional de mezclado.

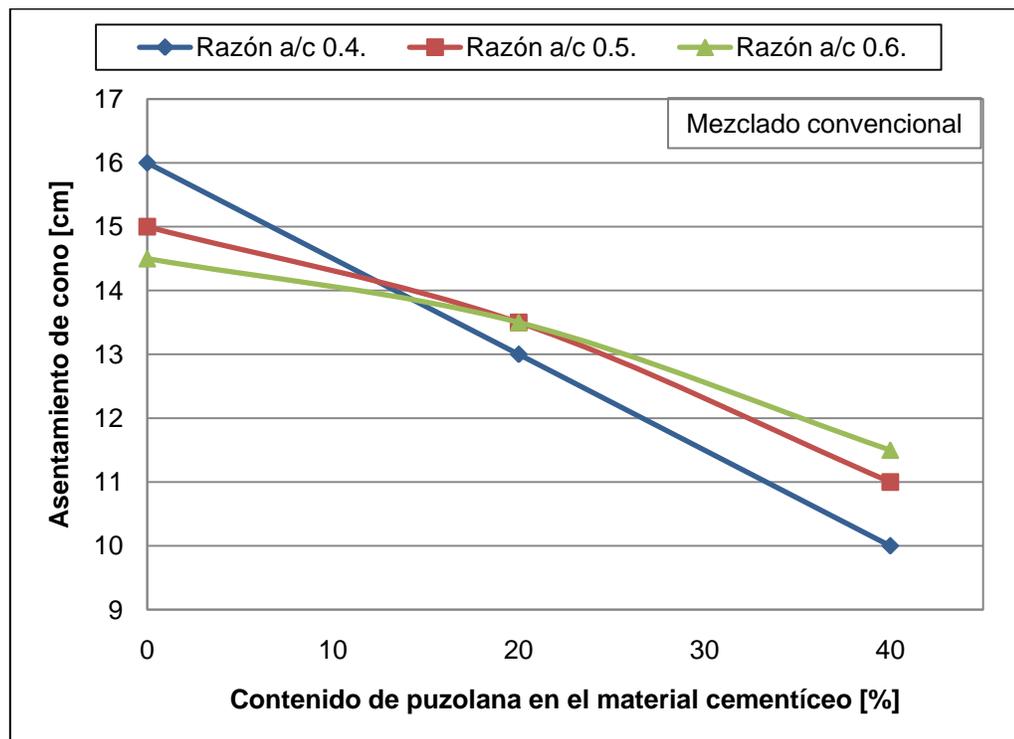


Figura 6.1: Variación del asentamiento de cono en función del contenido de puzolana, en hormigones de distinta razón agua/material cementíceo.

De la figura 6.1 se desprende que, en general, el aumento de contenido de puzolana origina pérdida en el asentamiento de cono, lo que se explicaría por el aumento de la finura del material cementíceo al incorporar mayores proporciones de puzolana, factor directamente ligado a la demanda de agua de la mezcla. La variación de finura de los cementos con el contenido de puzolana se puede apreciar en la figura 6.2.

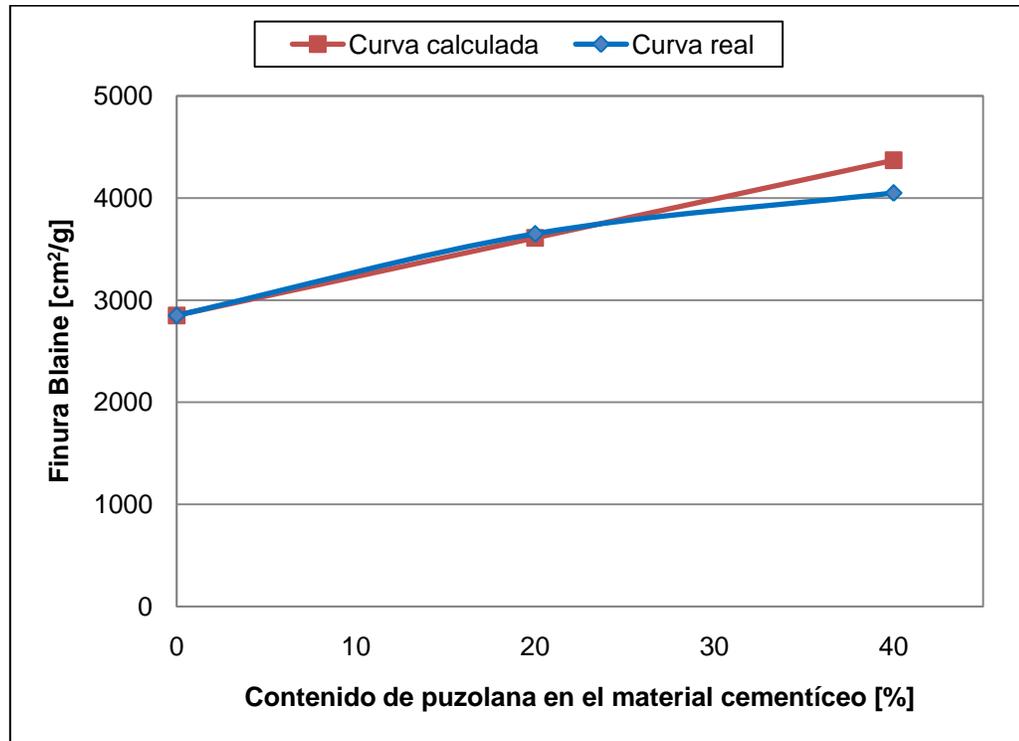


Figura 6.2: Variación en la finura del cemento en función del contenido de puzolana.

Por otra parte, al analizar el efecto de la variable agua/material cementíceo en la figura 6.3, se observa un comportamiento distinto en los hormigones fabricados con cemento con adición puzolánica con respecto a los elaborados con cemento Pórtland. En los primeros, el asentamiento aumenta con la razón agua/material cementíceo, mientras que en los hormigones sin inclusión de finos puzolánicos, el aumento de la relación agua/material cementíceo, en el rango estudiado, aumenta la cohesión (mayor contenido de finos activos del hormigón) y el asentamiento de disminuye.

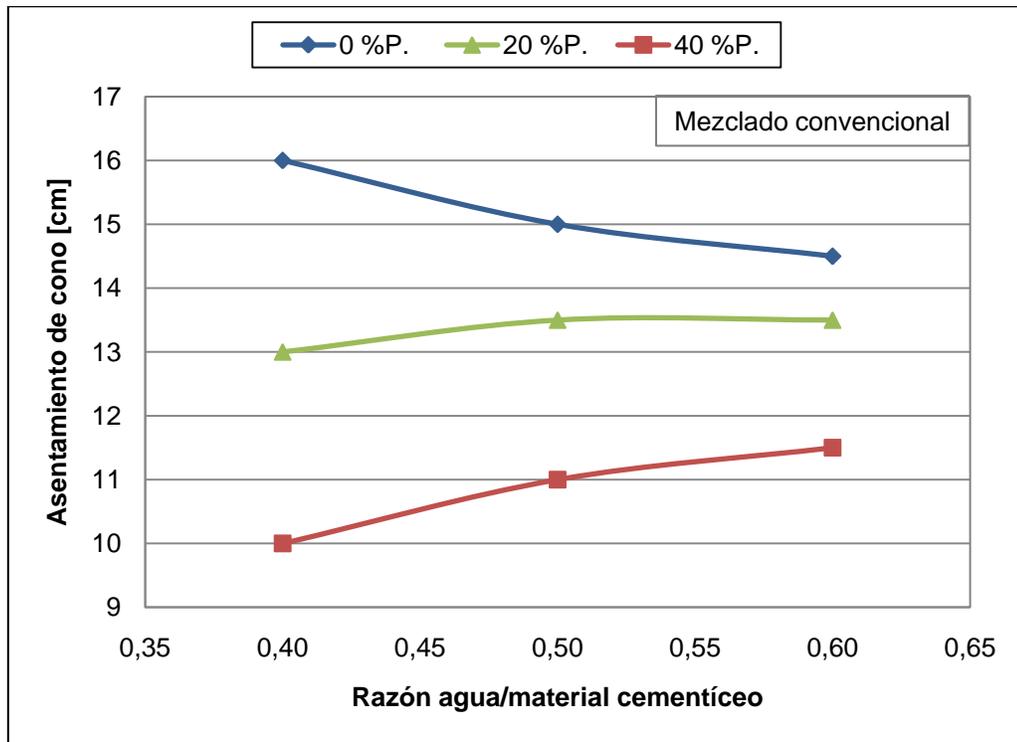


Figura 6.3: Curvas de asentamiento de cono versus razón agua/material cementíceo, con 0, 20 y 40 % de adición puzolánica.

Las dosificaciones se estimaron de manera que el asentamiento de cono de las series de hormigones fabricados con cemento Pórtland estuviese entre 12 y 16 [cm]. Se puede considerar entonces que la curva con 0% de puzolana es la curva patrón para comparar el comportamiento de los demás hormigones.

Se observa en la figura 6.3 que los hormigones con 20 y 40 % de contenido de puzolana en el material cementante aumentan su asentamiento de cono al aumentar la razón agua/material cementíceo.

6.2.1.2 Densidad

En las figuras 6.4 y 6.5, se grafican los valores de las densidades obtenidas para los distintos hormigones en estudio (tabla 5.2), elaborados según el procedimiento de mezclado convencional.

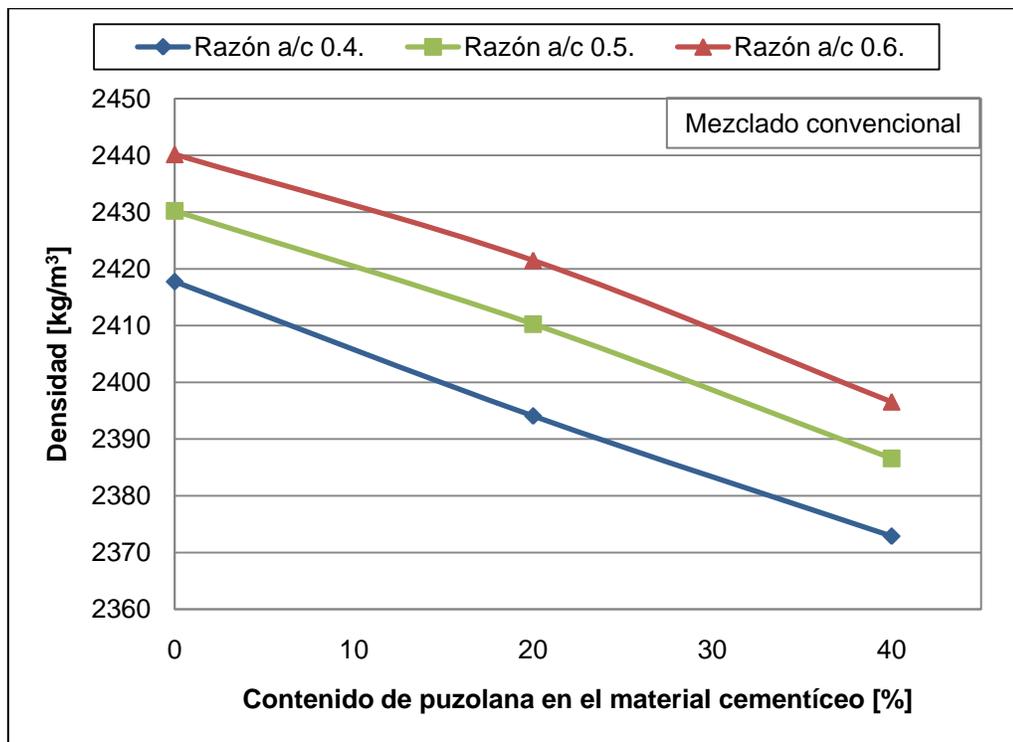


Figura 6.4: Variación de densidad en función del contenido de puzolana, en hormigones de diferentes razones agua/material cementíceo.

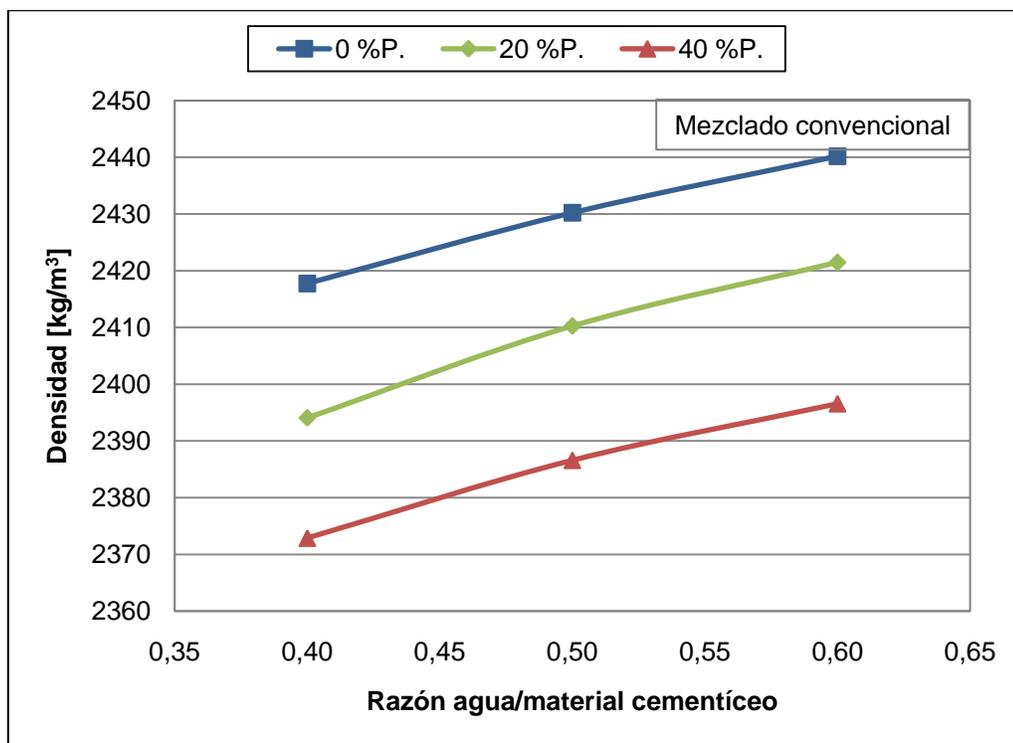


Figura 6.5: Curvas de densidad del hormigón en función de la razón agua/material cementíceo, para diferentes contenidos de puzolana.

En la figura 6.4, se observa que la densidad disminuye al aumentar el porcentaje de puzolana en el material cementíceo. Las curvas para cada razón agua/material cementíceo analizado tienen una tendencia lineal similar, lo que responde a la variación en el contenido de agua en los hormigones estudiados.

Los hormigones de igual razón agua/material cementíceo tienen la misma dosificación salvo por el porcentaje de puzolana en el material cementíceo y la variación en el contenido de aire atrapado. La puzolana tiene menor peso específico que el cemento Pórtland, por lo que al aumentar su contenido, disminuye la densidad del hormigón. Éste comportamiento teórico se valida en la figura 6.4.

Se aprecia además que para un contenido de puzolana en el material cementante dado, la densidad es mayor en los hormigones de mayor razón agua/material cementíceo. Los hormigones de razón agua/cemento 0.6 poseen la mayor cantidad de áridos y al ser estos los que intervienen en mayor proporción dentro de todos los materiales que constituyen el hormigón, poseen las mayores densidades. Si bien es el cemento Pórtland el que posee el mayor peso específico dentro de los materiales del hormigón, al estar presente sólo en un pequeño porcentaje del peso, no tiene mayor influencia en la densidad de hormigón analizado. Esto se observa en la figura 6.5.

6.2.1.3 Contenido de aire

En las figuras 6.6 y 6.7 se presentan las curvas de comportamiento de contenido de aire, al variar el contenido de adición puzolánica en el hormigón y la razón agua/material cementíceo.

Al disminuir el contenido de pasta del hormigón, disminución que se produce al aumentar la razón agua/material cementíceo, es esperable que se produzca un decremento en el contenido de aire atrapado en estos hormigones. Este comportamiento es el que se observa en la figura 6.6.

Por otro lado, se observa en la figura 6.7, que a igual contenido de pasta (igual razón agua/material cementíceo), el contenido de aire atrapado aumenta en los hormigones con mayor contenido de adición puzolánica.

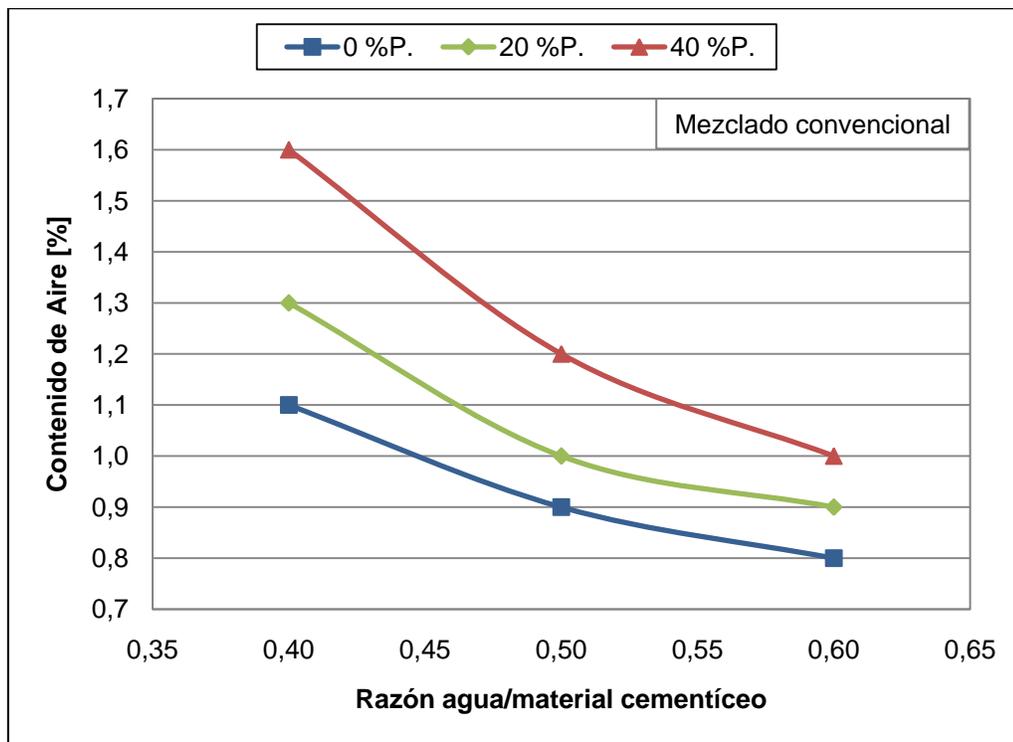


Figura 6.6: Variación del contenido de aire en función de la razón agua/material cementíceo del hormigón, para diferentes contenidos puzolana.

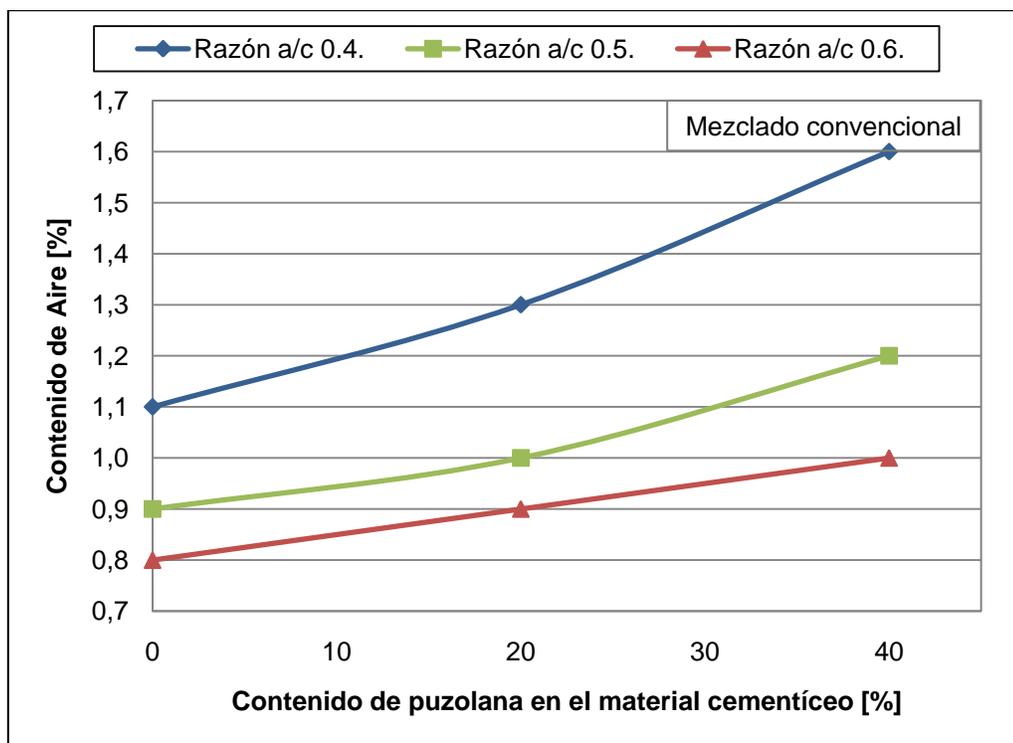


Figura 6.7: Variación del contenido de aire en función del contenido de puzolana, para diferentes razones agua/material cementíceo.

6.2.1.4 Exudación

Tomando las exudaciones totales de los hormigones elaborados mediante mezclado convencional de la tabla 5.4, se obtienen las figuras 6.8 y 6.9.

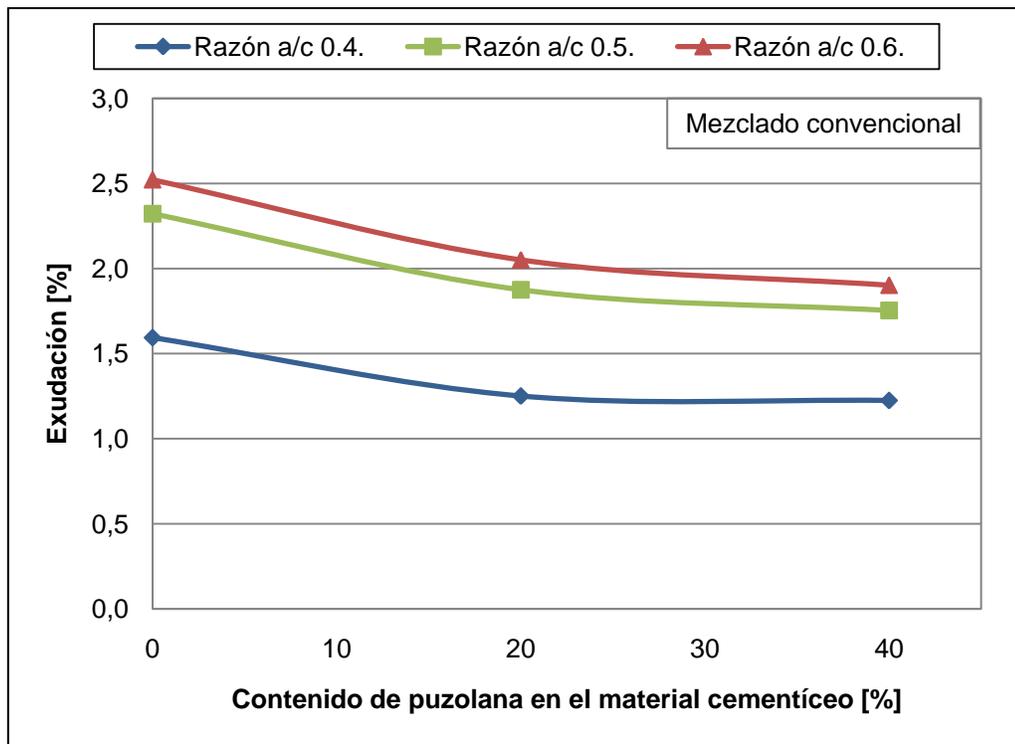


Figura 6.8: Curvas de exudación versus contenido de puzolana, para distintas razones agua/material cementíceo.

Se observa en la figura 6.8, que hormigones diseñados para un nivel de asentamiento de cono dado, al aumentar el contenido de puzolana en el material cementíceo, la exudación presenta una tendencia a disminuir. La puzolana al ser más liviana y más fina que el cemento Pórtland, se mantiene en suspensión más tiempo, impidiendo la exudación superficial ya que decanta más lentamente que los demás componentes del hormigón.

Se aprecia además que la exudación de los hormigones se incrementa al aumentar la razón agua/material cementíceo del hormigón. Este comportamiento se explica por los dos aspectos, a mayor razón agua/material cementíceo, mayor contenido de agua disponible, y a mayor viscosidad de la pasta a mayor contenido de puzolana.

En la figura 6.9 se observa más claramente este comportamiento.

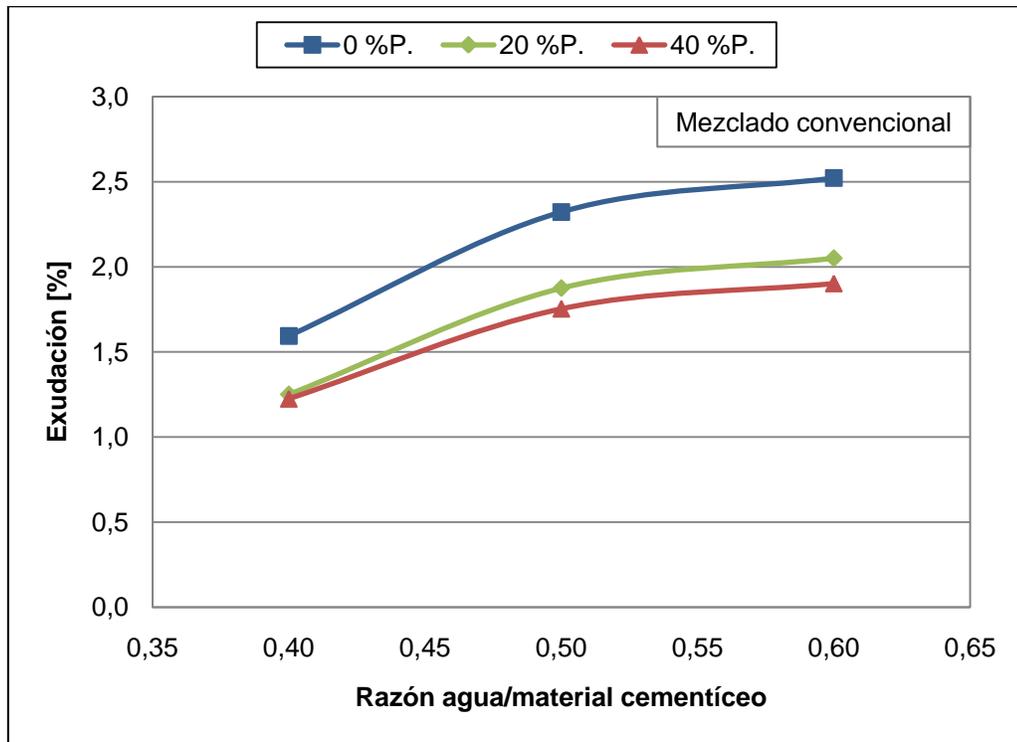


Figura 6.9: Curvas de exudación de hormigones versus razón agua/material cementíceo, al variar el porcentaje de puzolana.

La mayor exudación se da, por lo tanto, en el hormigón de mayor razón agua/material cementicio y menor contenido de adición puzolánica.

A continuación se presentan las figuras de exudación acumulada en el tiempo para los hormigones fabricados mediante el método convencional, según los resultados entregados en la tabla 5.4.

Se observa en la figura 6.10, que las curvas de exudación en el tiempo para los hormigones de razón agua/material cementicio 0.4 tienen un crecimiento muy similar, siendo el hormigón fabricado con cemento sin adición puzolánica el que exuda mas.

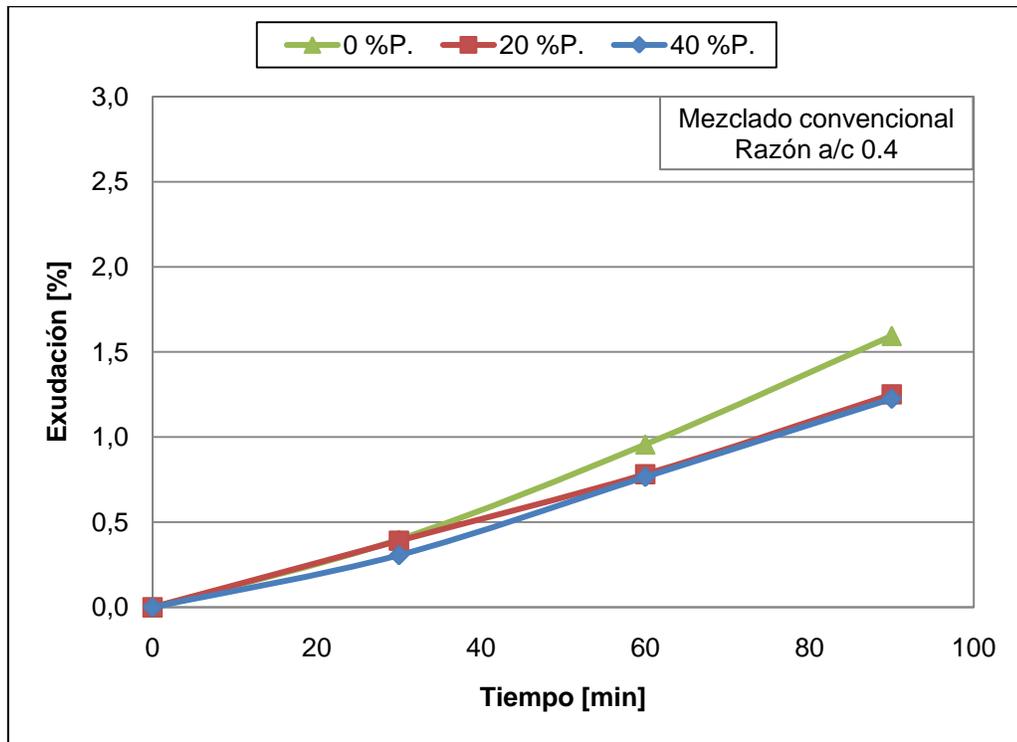


Figura 6.10: Curvas de exudación versus tiempo de hormigones de razón agua/material cementíceo 0.4 para diferentes porcentajes de puzolana.

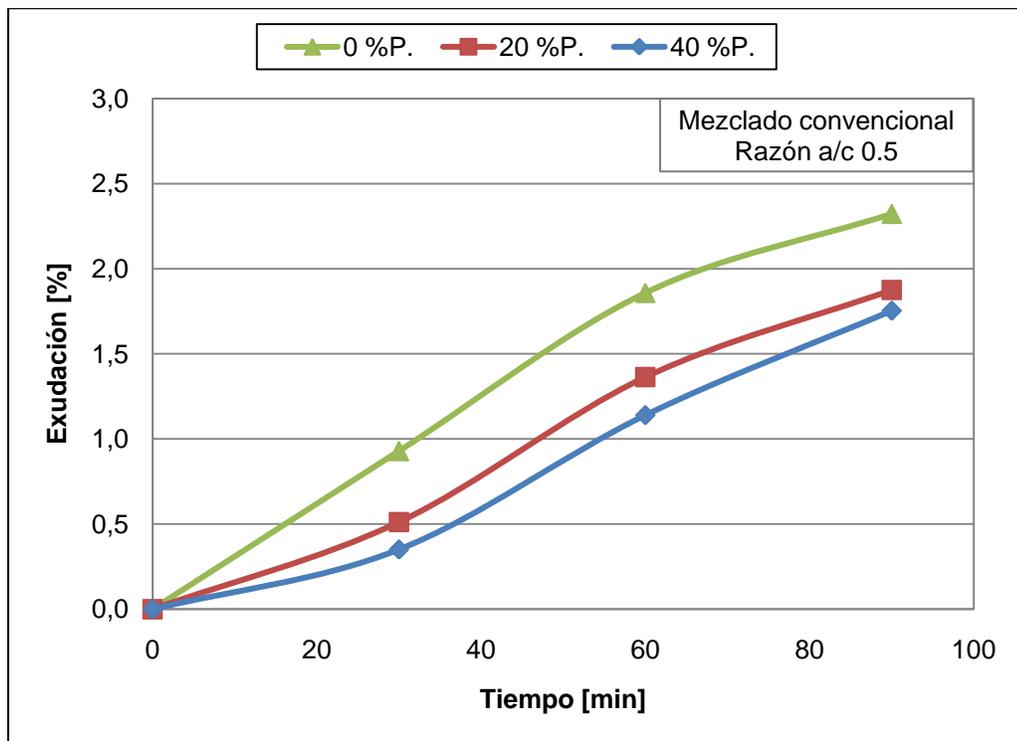


Figura 6.11: Curvas de exudación versus tiempo de hormigones de razón agua/material cementíceo 0.5 para diferentes porcentajes de puzolana.

Las curvas para 0, 20 y 40 % de contenido de puzolana de cada razón agua/material cementíceo analizada, presentan una tendencia similar de la exudación en el tiempo, lo que se observa en las figuras 6.10, 6.11 y 6.12. Se observa además, una mayor exudación en los hormigones de menor contenido de puzolana.

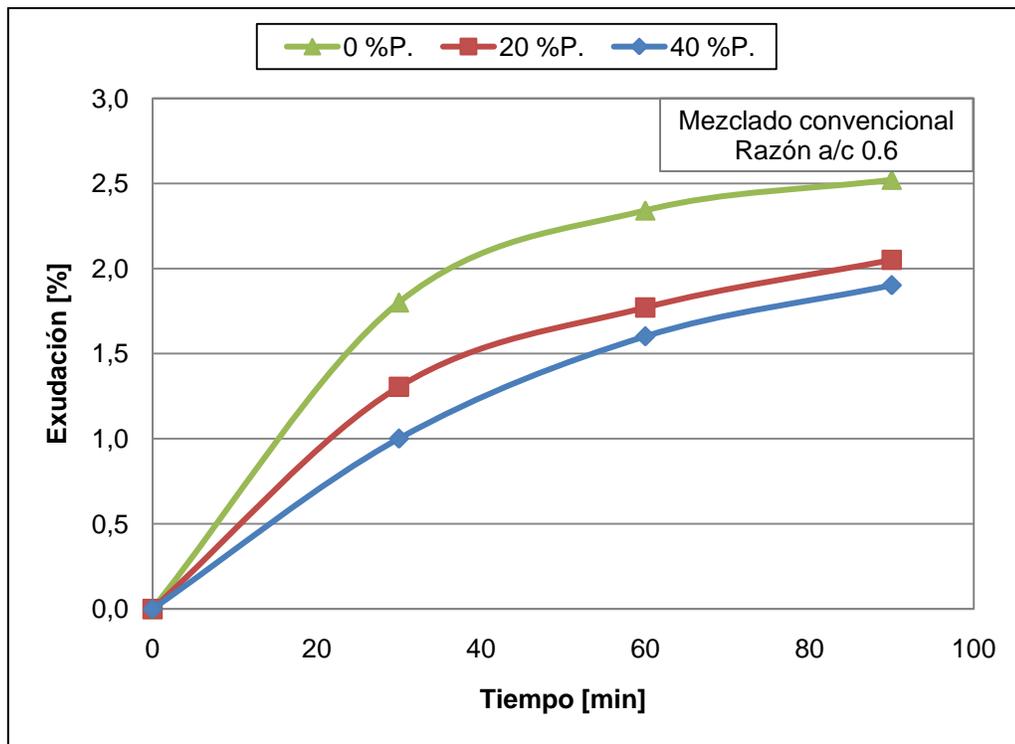


Figura 6.12: Exudación en el tiempo de hormigones de razón agua/material cementíceo 0.6 para diferentes porcentajes de puzolana en el material cementíceo.

Al elaborarse el hormigón, se unen los áridos con el cemento y el agua. Las moléculas de agua y los granos de cemento y partículas finas poseen un gran número de iones en disolución en su superficie. Estos iones tienden a formar flóculos por afinidad electroestática. Dependiendo de las proporciones de agua y material cementíceo, el agua podrá o no ser retenida en estos flóculos. Este proceso comienza al unir los materiales durante el mezclado.

Además, dado que entre los materiales componentes del hormigón, el agua es el material de menor densidad, el resto de los materiales tiende a decantar, dejando en la superficie al agua no atrapada por los flóculos. Cuando el hormigón es colocado y compactado, esta etapa de exudación comienza, y evoluciona con la formación de los flóculos en el tiempo.

Dado que para mayores razones agua/material cementíceo, el agua libre se encontrará en mayor proporción que el material cementíceo, la exudación será mayor y se producirá a mayores velocidades, como se observa en las figuras 6.10, 6.11 y 6.12.

6.2.2 Propiedades del hormigón endurecido

6.2.2.1 Resistencia del mortero del hormigón

En la tabla 5.5 se encuentran los resultados de los ensayos de compresión de morteros, extraídos por tamizado, de los hormigones correspondientes a las series confeccionadas mediante mezclado convencional. Con estos resultados se obtienen las figuras 6.13 y 6.14.

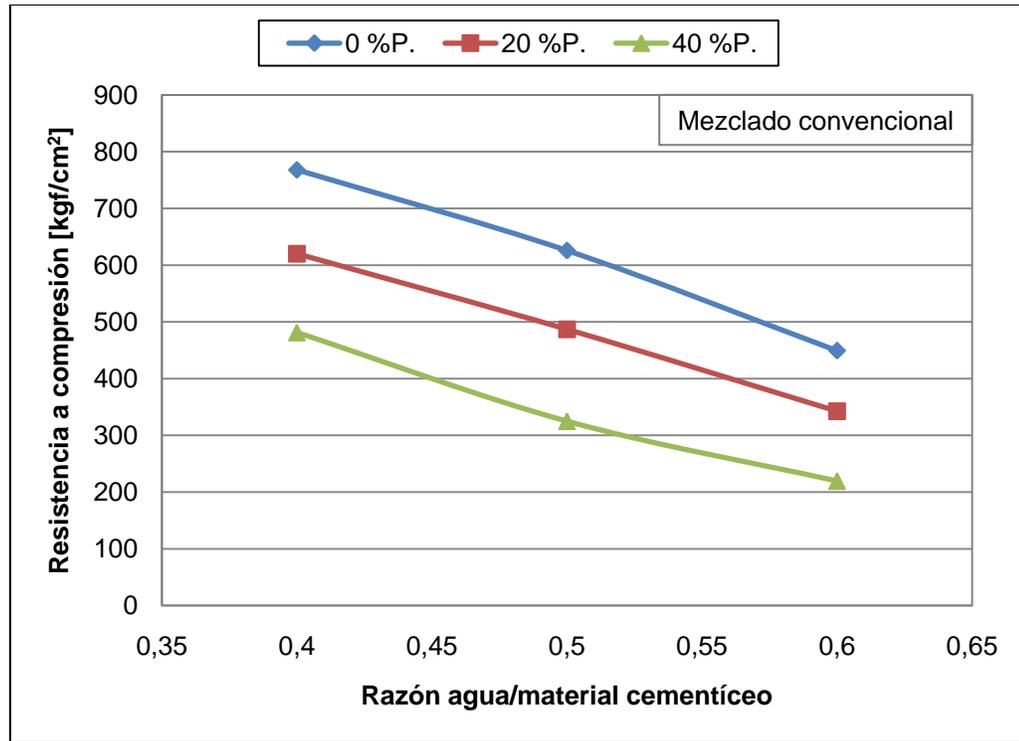


Figura 6.13: Resistencia a compresión a los 28 días de morteros correspondientes a los hormigones estudiados en función de su razón agua/material cementíceo.

Como se observa en la figura 6.13, la resistencia a compresión del mortero presenta un comportamiento similar al de los hormigones correspondientes, disminuyendo linealmente con el incremento de la razón agua/material cementíceo, por lo que se cumple la teoría que indica que al haber más agua, hay mayor porosidad lo que significa una menor resistencia a compresión.

Se observa que esta pérdida de resistencia a compresión con el aumento de razón agua/material cementíceo es lineal, y que presenta la misma pendiente para los tres materiales cementíceos estudiados, siendo mayores las resistencias de los morteros con menor contenido de adiciones puzolánicas.

Con los resultados de resistencia a flexión de los morteros obtenidos por tamizado de las series de hormigones elaborados mediante mezclado convencional, que se encuentran en la tabla 5.5, se obtiene la figura 6.14.

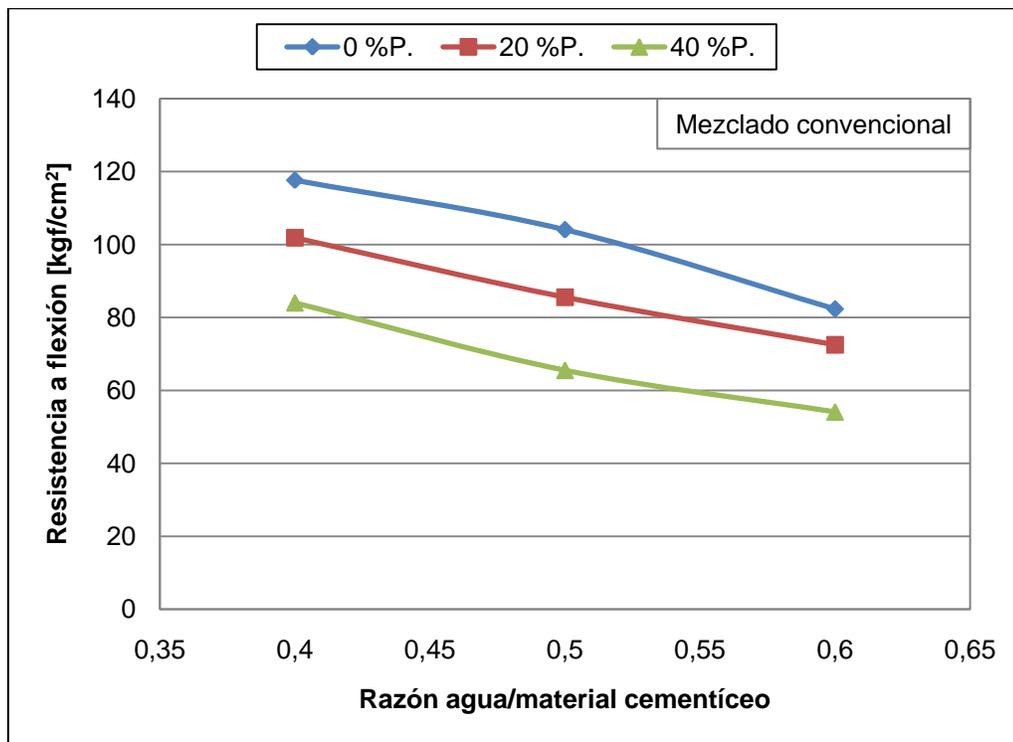


Figura 6.14: Resistencia a flexión a los 28 días de morteros correspondientes a los hormigones estudiados en función de su razón agua/material cementíceo.

Las resistencias a flexión obtenidas presentan el mismo comportamiento que las resistencias a compresión. Se observa una disminución lineal de resistencia al aumentar la razón agua/material cementíceo.

Se observa además, que los morteros de hormigones elaborados con menores contenidos de puzolana presentan mayores resistencias a la flexión.

6.2.2.2 Resistencia mecánica del hormigón

En las figuras 6.15, 6.16 y 6.17 se presentan las curvas de resistencia en función de la razón agua/material cementíceo y contenido de puzolana, correspondientes a las distintas edades de ensayo.

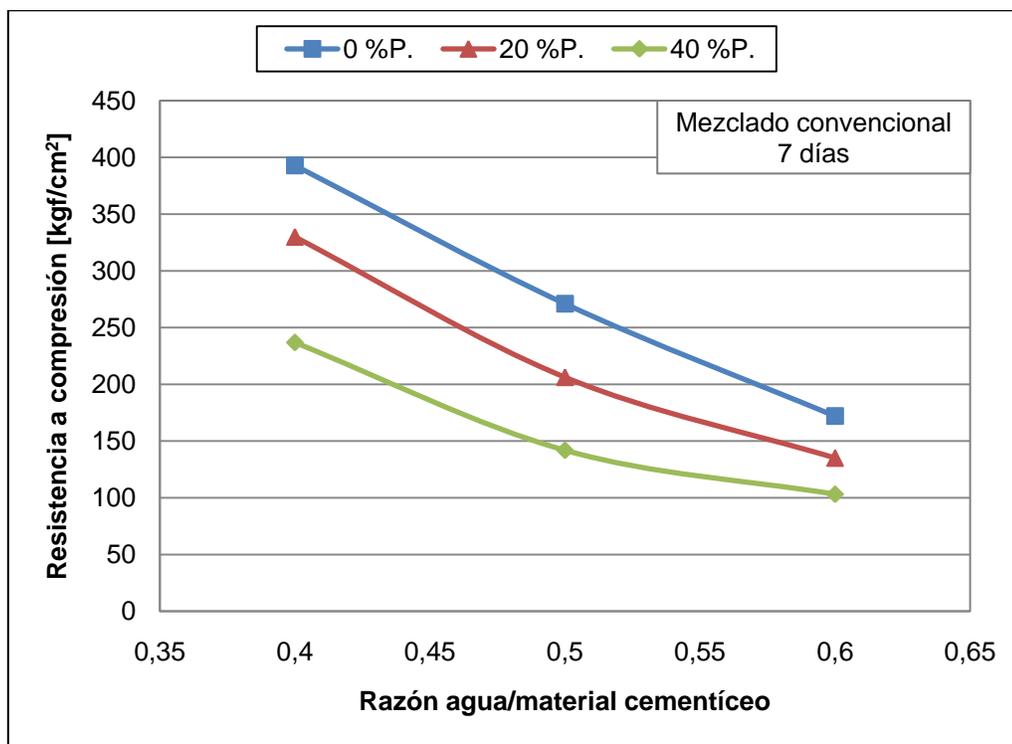


Figura 6.15: Curvas de resistencia a compresión a los 7 días en función de la razón agua/material cementíceo, para hormigones con distinto contenido de adición puzolánica.

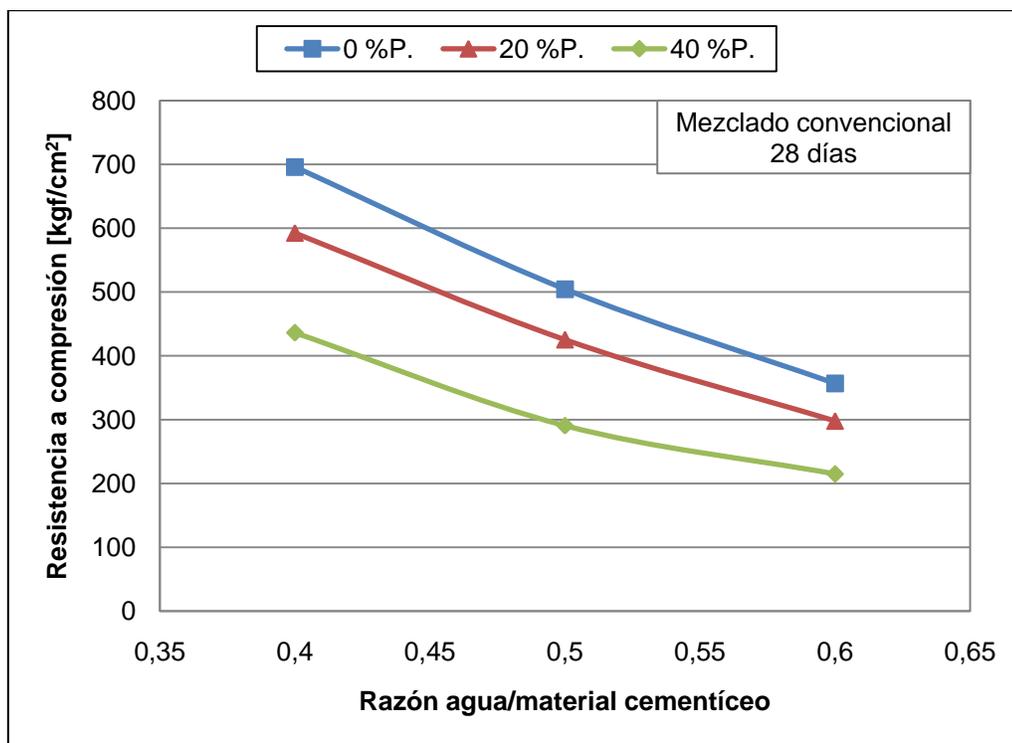


Figura 6.16: Curvas de resistencia a compresión a los 28 días en función de la razón agua/material cementíceo, para hormigones con distinto contenido de adición puzolánica.

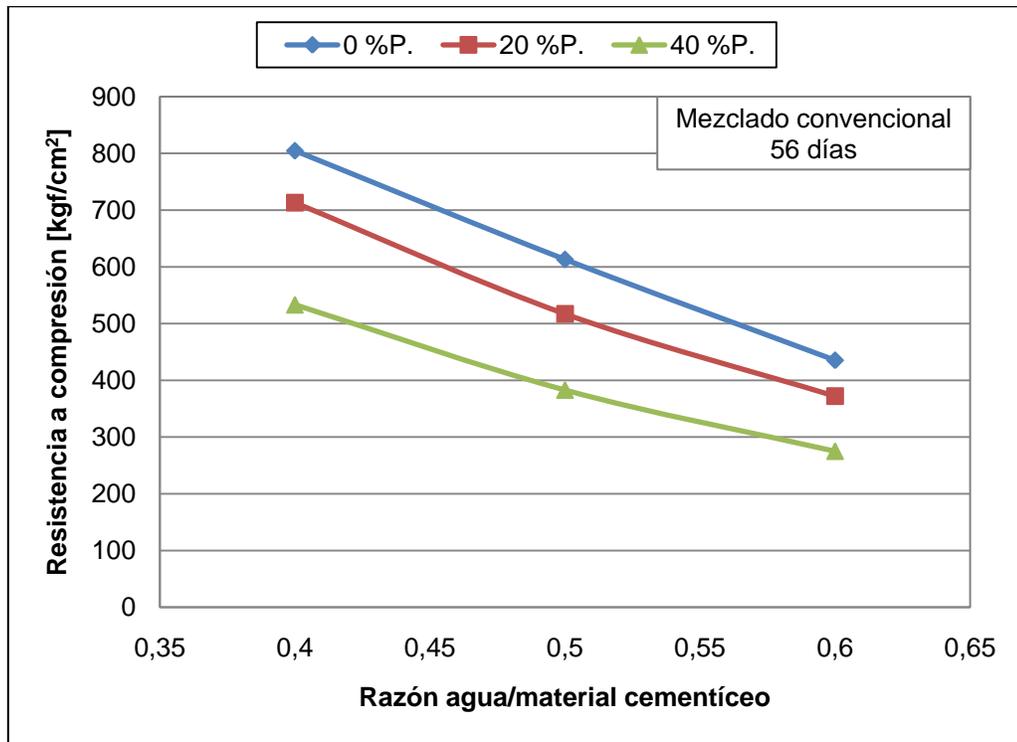


Figura 6.17: Curvas de resistencia a compresión a los 56 días en función de la razón agua/material cementíceo, para hormigones con distinto contenido de adición puzolánica.

Se observa en las curvas anteriores que los resultados de resistencia a la compresión de los hormigones elaborados mediante mezclado convencional presentan un comportamiento conforme a lo esperado ajustándose a la Ley de Abrams.

Se observa además, que el aumento del contenido de adiciones puzolánicas en el material cementíceo, disminuye la resistencia a compresión de los hormigones.

Para comparar el comportamiento de la resistencia a compresión en función de la razón agua/material cementíceo para los distintos hormigones estudiados, ensayados a distintas edades, se grafican todas las curvas en la figura 6.18.

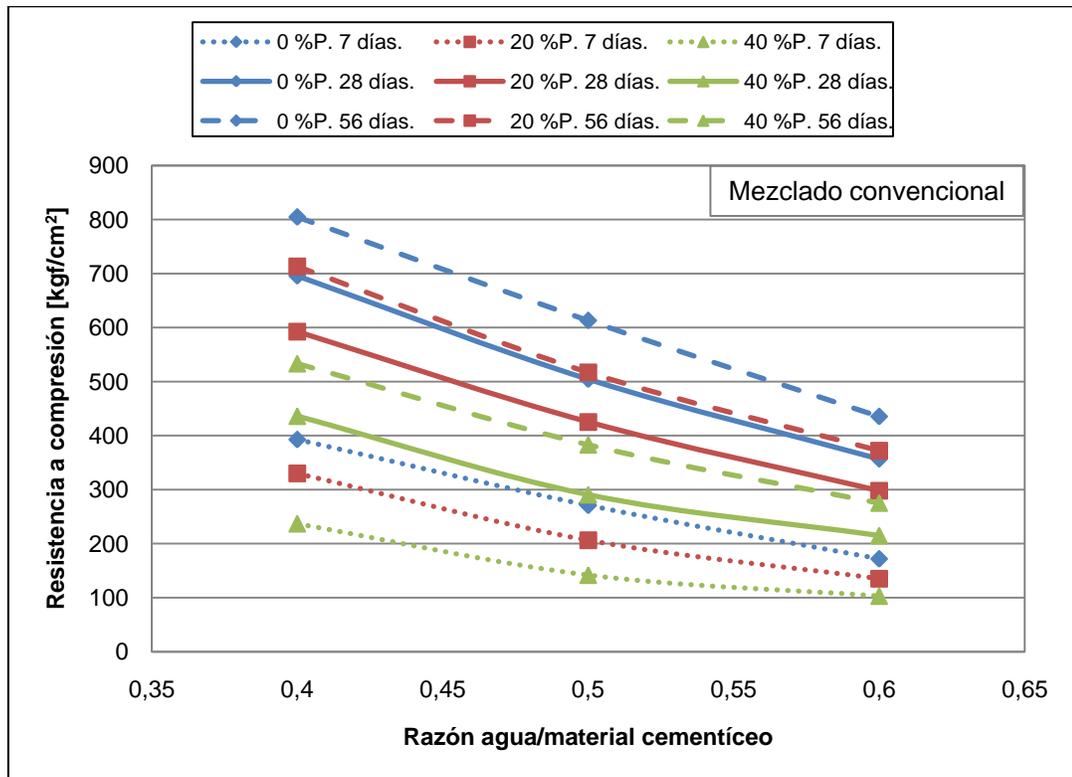


Figura 6.18: Resistencia a la compresión versus razón agua/material cementíceo, para todos los hormigones elaborados mediante mezclado convencional.

El aumento de las resistencias en el tiempo se debe a que las reacciones de hidratación se concretan y la puzolana toma parte en este proceso produciendo mayor contenido de CSH, producto de hidratación del cemento Pórtland y de la puzolana que entrega resistencia al hormigón elaborado.

Se observa en la figura 6.18 que el crecimiento de resistencia que hay entre los 7 y 28 días es muy superior al que se observa entre los días 29 y 56. Esto se debe a que por el tamaño de las probetas y las condiciones de curado impuestas, las reacciones de hidratación evolucionan rápidamente, observándose aumentos menores después de alcanzadas las resistencias de 28 días.

En la tabla 6.1 se presentan las ganancias porcentuales de resistencia respecto a las resistencias obtenidas a los 7 días.

Tabla 6.1: Ganancia de resistencia en el tiempo con respecto a la resistencia a los 7 días en hormigones elaborados mediante mezclado convencional.

Serie	Ganancia de resistencia a compresión [%]	
	28 días	56 días
0.4 - 0 %P - C	77	105
0.4 - 20 %P - C	80	116
0.4 - 40 %P - C	84	125
0.5 - 0 %P - C	86	126
0.5 - 20 %P - C	106	151
0.5 - 40 %P - C	105	170
0.6 - 0 %P - C	107	153
0.6 - 20 %P - C	121	176
0.6 - 40 %P - C	109	167

Analizando los valores entregados en la tabla 6.1, se concluye que la ganancia de resistencia en función del tiempo aumenta en mayor medida en los hormigones de mayor razón agua/material cementíceo, lo que, se estima, se debería a que para este tipo de mezclado se logra una mejor hidratación de las partículas de cemento Pórtland y puzolana incrementando el contenido de agua libre.

Se observa además que, en general, hay mayores ganancias de resistencia en los hormigones elaborados con materiales cementíceos con adición puzolánica, lo que confirma el hecho de que la puzolana tiene un efecto a largo plazo en la resistencia del hormigón, haciéndola crecer por sobre lo que lo haría el cemento Pórtland sin adiciones.

En los hormigones normalmente utilizados en obra, la diferencia de resistencia de un hormigón a los 28 y 56 días es pequeña, pero dado el cuidadoso curado dado a las probetas, la puzolana funciona de mejor manera, permitiendo aumentar las resistencias a los 56 días notoriamente.

Para comparar la funcionalidad de la puzolana en el material aglomerante según la razón agua/material cementíceo y el tiempo de endurecimiento del hormigón, se analiza la figura 6.19.

Se observa en ella, que la resistencia disminuye con el incremento de aditivo mineral en el material cementíceo independiente de las razones agua/material cementíceo.

A los 7 días, el material cementíceo no se ha hidratado completamente, por lo que la influencia de un material cementíceo que reacciona a largo plazo no es tan influyente a esa edad, como a los 28 y 56 días. Esto se ve en las pendientes de las curvas de la figura 6.19, las que son mayores en los hormigones de mayor edad.

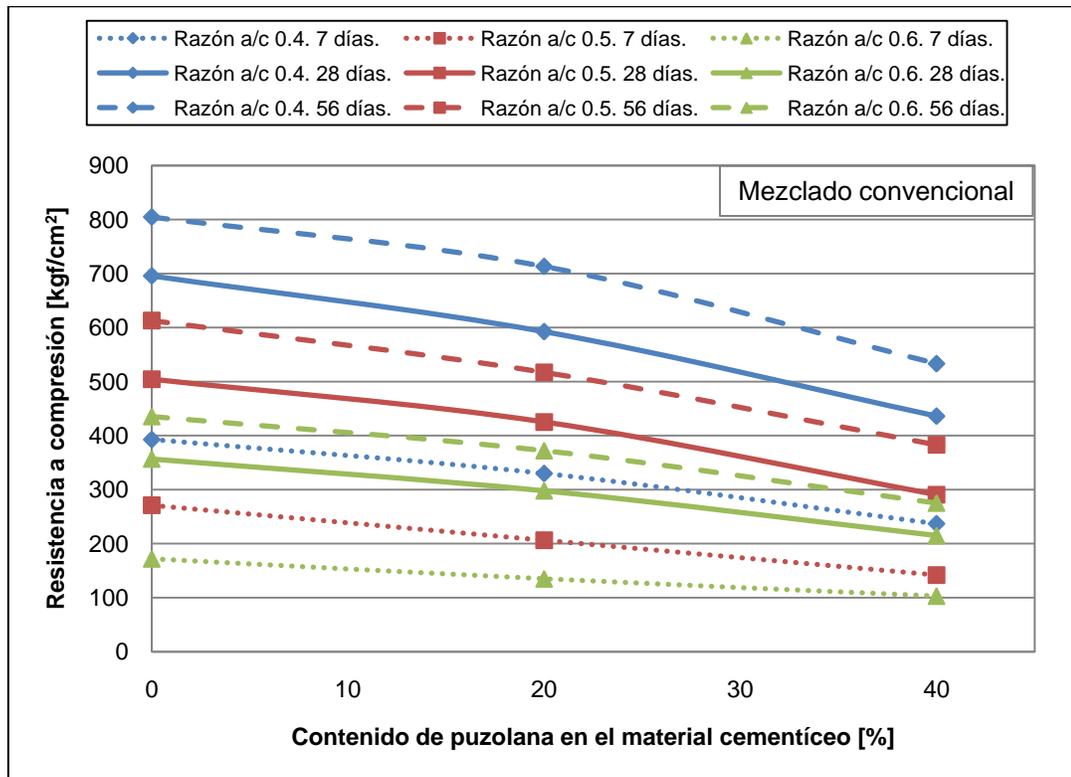


Figura 6.19: Curvas de resistencia a compresión versus contenido de puzolana en el material cementíceo para todos los hormigones elaborados mediante mezclado convencional.

En la tabla 6.2, se presenta una comparación de resistencias porcentuales, respecto a la resistencia del cemento Pórtland para cada razón agua/material cementíceo estudiada.

Tabla 6.2: Comparación de resistencias a compresión de los hormigones con adiciones de puzolana con respecto a los hormigones elaborados con cemento Pórtland.

Serie	Comparación de resistencia [%]		
	7 días	28 días	56 días
0.4 - 0 %P - C	100	100	100
0.4 - 20 %P - C	84	85	89
0.4 - 40 %P - C	60	63	66
0.5 - 0 %P - C	100	100	100
0.5 - 20 %P - C	76	84	84
0.5 - 40 %P - C	52	58	62
0.6 - 0 %P - C	100	100	100
0.6 - 20 %P - C	79	83	85
0.6 - 40 %P - C	60	60	63

En la tabla 6.2 se observa que las pérdidas de resistencia al utilizar adiciones de puzolana presentan el comportamiento esperado, pues si bien la puzolana tiene propiedades aglomerantes, el cemento Pórtland es el que entrega la mayor parte de los compuestos cementíceos de la pasta del hormigón endurecido.

Además, se aprecia una pérdida menor con el crecer del tiempo, lo que también tiene justificación en la teoría. La puzolana actúa a largo plazo, por lo que su aporte en resistencia se ve reflejado a mayores edades.

La eficiencia del cemento Pórtland en los distintos hormigones estudiados, viene dada por la razón de la resistencia del hormigón en el contenido de cemento Pórtland por metro cúbico utilizado. Estos valores se presentan en la tabla 6.3.

Tabla 6.3: Eficiencia del cemento Pórtland en cada hormigón analizado.

Serie	Razón resistencia/contenido de cemento Pórtland/m ³		
	7 días	28 días	56 días
0.4 - 0 %P - C	0.8	1.3	1.5
0.4 - 20 %P - C	0.6	1.1	1.4
0.4 - 40 %P - C	0.5	0.8	1.0
0.5 - 0 %P - C	0.5	1.0	1.2
0.5 - 20 %P - C	0.4	0.8	1.0
0.5 - 40 %P - C	0.3	0.6	0.7
0.6 - 0 %P - C	0.3	0.7	0.8
0.6 - 20 %P - C	0.3	0.6	0.7
0.6 - 40 %P - C	0.2	0.4	0.5

En la tabla 6.3, se observa que la eficiencia del cemento Portland en los hormigones elaborados, aumenta con el tiempo. Además, se presentan disminuciones en la eficiencia del mismo, al aumentar el contenido de adiciones puzolánicas en un hormigón de cierta razón agua/material cementíceo.

Comparando las razones agua/material cementicio analizadas, se presentan menores eficiencias cuando esta razón es mayor.

6.3 Mezclado en etapas

6.3.1 Áridos a temperatura normal

6.3.1.1 Propiedades del hormigón fresco

6.3.1.1.1 Asentamiento de cono

Los resultados correspondientes al comportamiento en el ensayo de asentamiento de cono de las series de hormigones elaboradas según el procedimiento de mezclado en etapas, se analizan a través de las figuras 6.20 y 6.21.

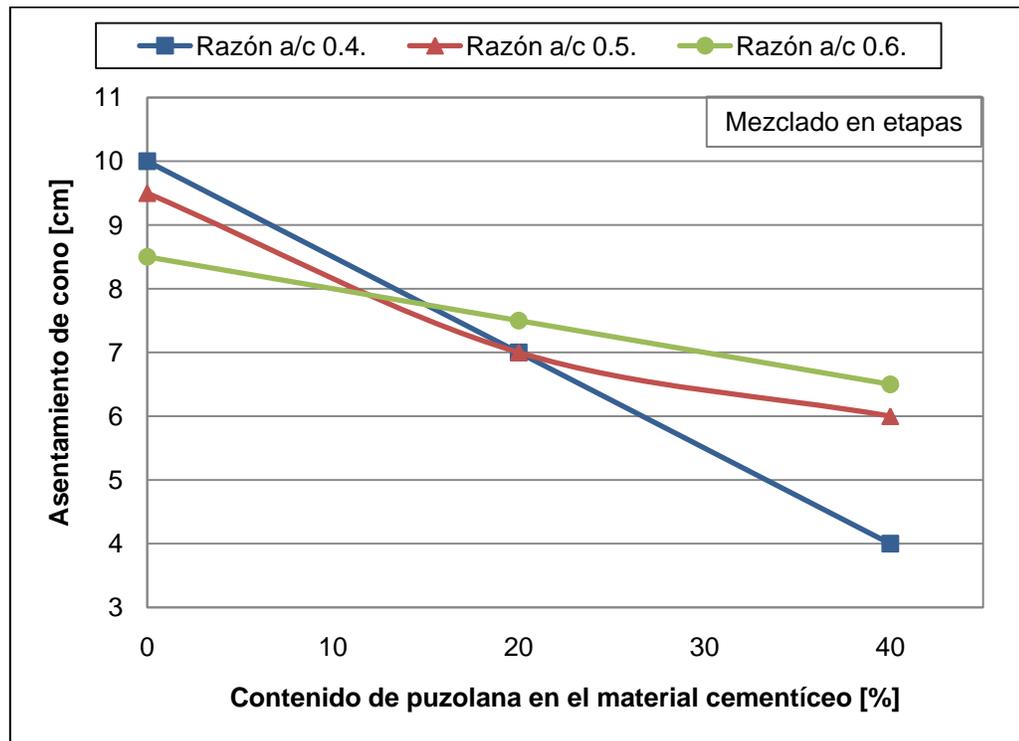


Figura 6.20: Variación del asentamiento de cono en función del contenido de puzolana en hormigones con distintas razones agua /material cementíceo.

Las curvas de la figura 6.20 describen el comportamiento de los distintos hormigones elaborados según el procedimiento de mezclado en etapas, teniendo en cuenta que en el diseño de las mezclas se impuso un nivel de asentamiento de cono entre 12 y 16 [cm] para el hormigón fabricado con el método convencional y elaborado con cemento Pórtland. En este caso se puede deducir lo siguiente:

- La incorporación de contenidos de 20 y 40 % de puzolana en el material cementíceo, en las series correspondientes de razón 0.4, origina un notorio aumento de la cohesión que provee la pasta, lo que disminuye notoriamente el asentamiento de cono de los hormigones en aproximadamente 6 [cm].
- Para las series correspondientes a mezclas con razón agua/material cementíceo 0.5 y 0.6, se observa un comportamiento distinto. La disminución del asentamiento de cono con el aumento del contenido de puzolana en el material cementíceo es menor, variando en aproximadamente 3.5 y 2 [cm] respectivamente.

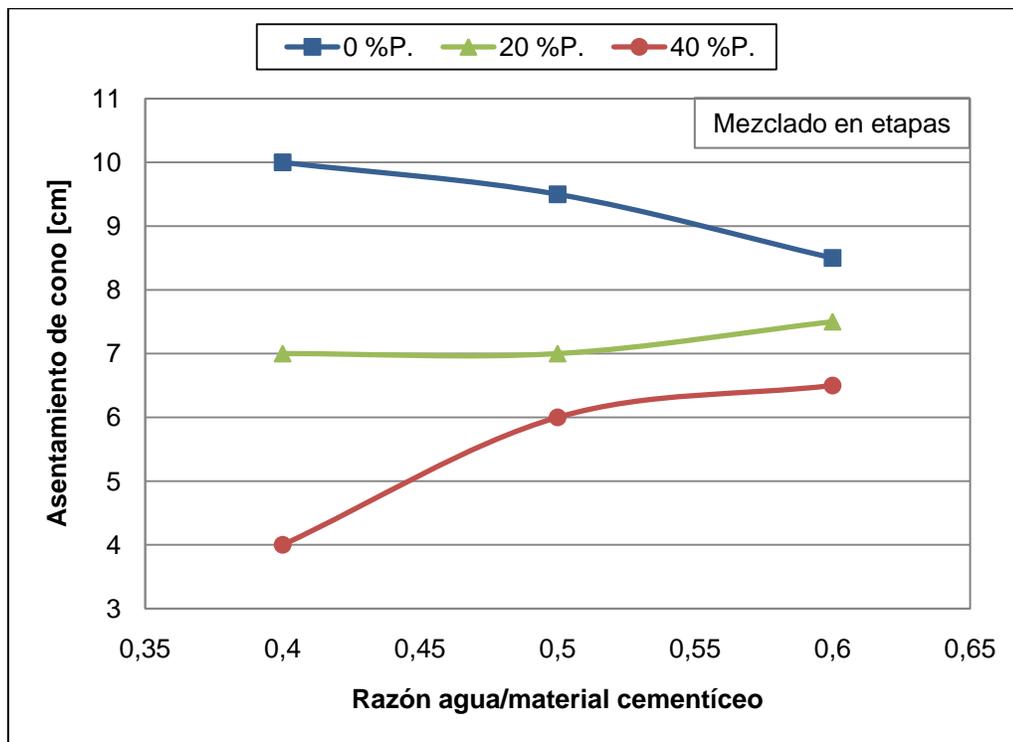


Figura 6.21: Curvas asentamiento de cono versus razón agua/material cementíceo, para hormigones con 0, 20 y 40 % de puzolana en el material cementíceo.

Las curvas de la figura 6.21 muestran que al variar la razón agua/material cementíceo de 0.4 a 0.5 y 0.6, los hormigones con contenidos de adiciones de 20 y 40 % de adición, tienden a una estabilización del asentamiento de cono en torno a los 7 [cm], mientras que los hormigones elaborados con cemento Pórtland y razón agua/material cementíceo 0.4, muestran una tendencia a la pérdida de cono, manteniéndose una alta cohesión.

6.3.1.1.2 Densidad

Con los resultados presentados en la tabla 5.8, la cual entrega los valores de densidad registrados durante la fabricación de las series de los hormigones elaborados en etapas, se grafican las curvas de las figuras 6.22 y 6.23, para realizar el análisis correspondiente.

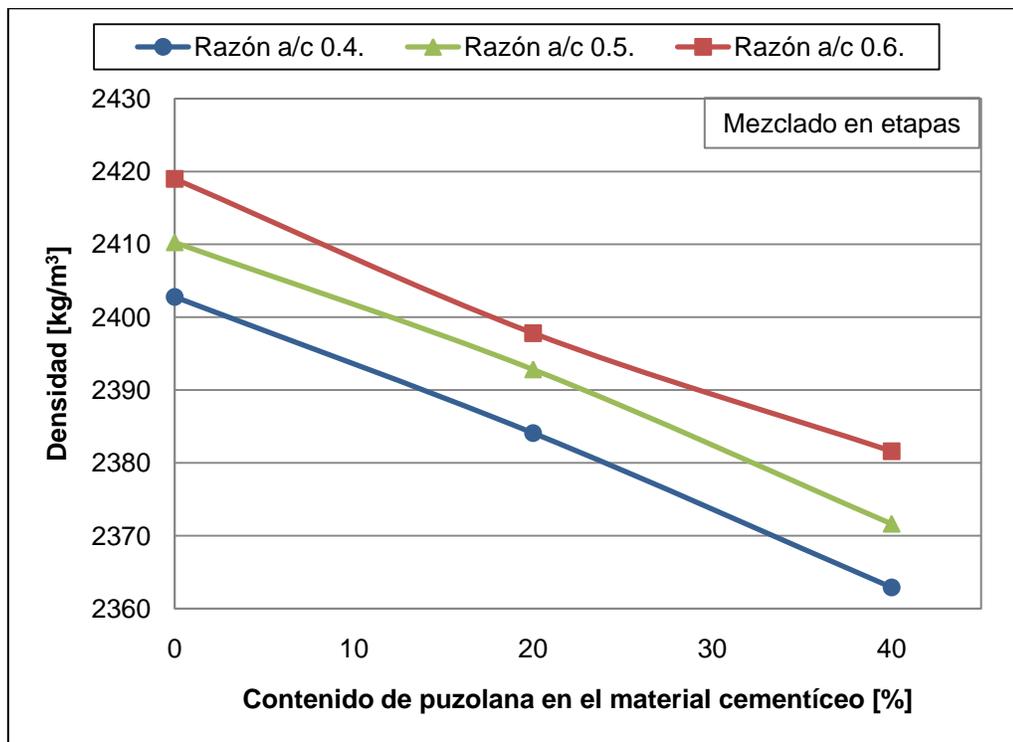


Figura 6.22: Variación de densidad en función del contenido de puzolana, en hormigones con diferentes razones agua/material cementíceo.

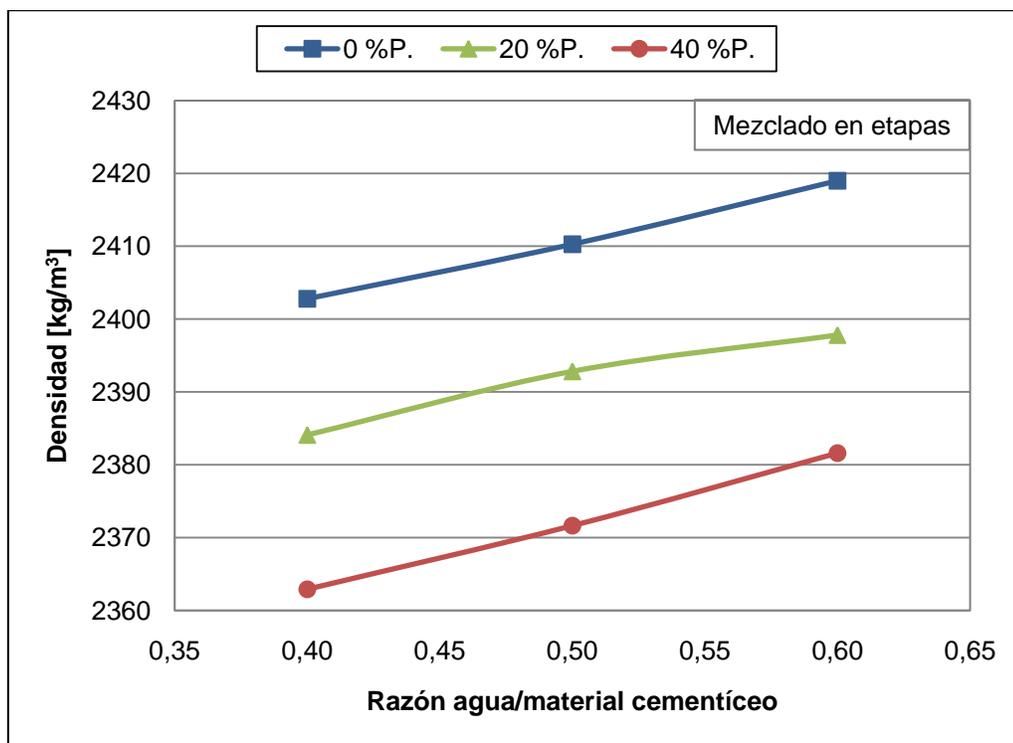


Figura 6.23: Variación de la densidad en función de la razón agua/material cementíceo del hormigón, para diferentes contenidos de puzolana.

En la figura 6.22 se observa que la densidad para los distintos hormigones disminuye al aumentar el porcentaje de puzolana en el material cementíceo, y por otra parte, se observa una disminución lineal al aumentar la razón agua/material cementíceo.

La puzolana, por su menor peso específico y el incremento en el contenido de agua al aumentar la razón agua/material cementíceo, explican el comportamiento de la densidad de los hormigones estudiados.

En la figura 6.23, se observa el efecto del incremento en el contenido de áridos a expensas del contenido de pasta, que resulta de imponer la condición de igual asentamiento de cono a las mezclas con distintas razones agua/material aglomerante. Se tiene así, que los hormigones de razón agua/material cementíceo, son los que poseen mayor contenido de áridos, lo que los hace más densos.

6.3.1.1.3 Contenido de aire

Con los resultados presentados en la tabla 5.9, la cual entrega los valores de contenido de aire registrados durante la elaboración de los hormigones mezclados en etapas, se obtienen las curvas de las figuras 6.24 y 6.25.

Se observa que la disminución del contenido de pasta, al incrementar la razón agua/material cementíceo, implica la disminución en el contenido de aire, debido a que es en la pasta donde se encuentra el mayor porcentaje de aire del hormigón. Dadas las dosificaciones establecidas, al aumentar la razón agua/material cementíceo disminuye la cantidad de pasta, lo que implica una disminución en el contenido de aire, como se muestra en la figura 6.24.

Por otro lado, se observa en la figura 6.25, que al aumentar el contenido de puzolana, aumenta el contenido de aire en el hormigón. Este efecto se podría atribuir al incremento de partículas finas asociado a la incorporación de puzolana, lo que permitiría la formación y estabilización del aire incorporado durante el amasado de la pasta.

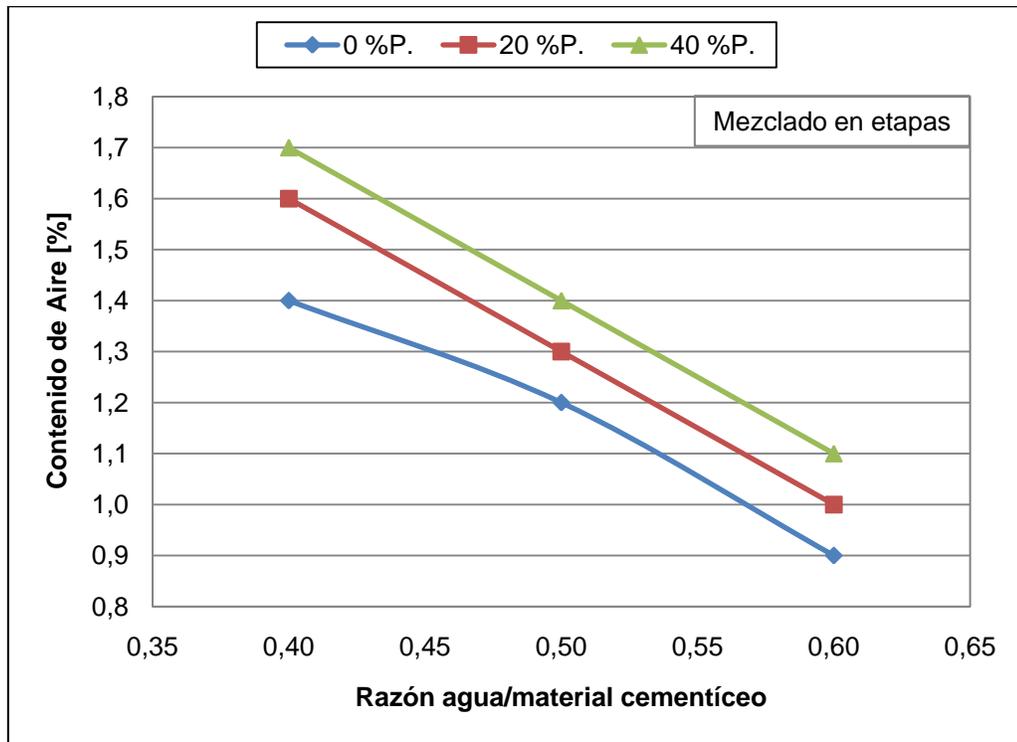


Figura 6.24: Variación del contenido de aire en función de la razón agua/material cementíceo del hormigón, para diferentes contenidos de puzolana.

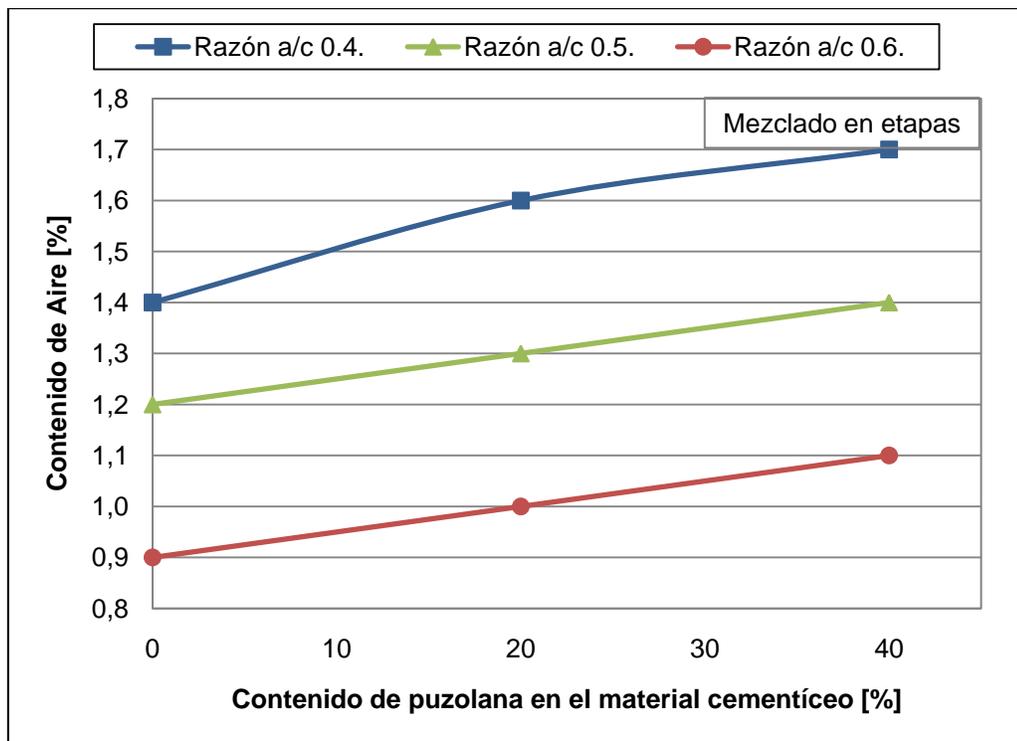


Figura 6.25: Variación del contenido de aire en función del contenido de puzolana, para diferentes razones agua/ material cementíceo.

6.3.1.1.4 Exudación

Tomando las exudaciones totales de los hormigones elaborados mediante mezclado en etapas de la tabla 5.10 se obtienen las figuras 6.26 y 6.27.

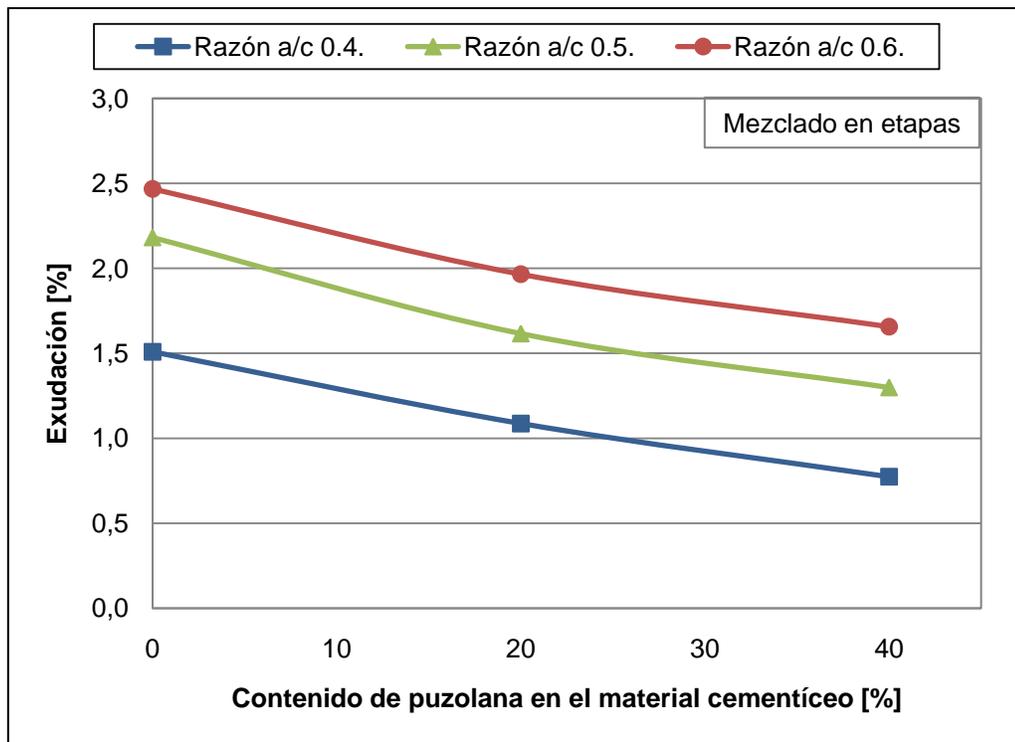


Figura 6.26: Curvas de exudación versus contenido de puzolana, para distintas razones agua/material cementíceo.

Se observa que al aumentar el contenido de puzolana, la exudación disminuye con una tasa similar para hormigones de distinta razón agua/material cementíceo. Este comportamiento podría explicarse considerando que el peso de la puzolana, más liviano respecto al del cemento Pórtland, la mantiene en suspensión más tiempo, impidiendo la exudación superficial ya que desciende más lentamente que los demás componentes del hormigón.

La mayor exudación que presentan los hormigones con mayor razón agua/material cementíceo, se puede explicar como resultado de una mayor disponibilidad de agua libre en las primeras horas, que hace evidente el proceso de decantación de las partículas de árido, efecto que se aprecia en la figura 6.27, para todos los contenidos de puzolana.

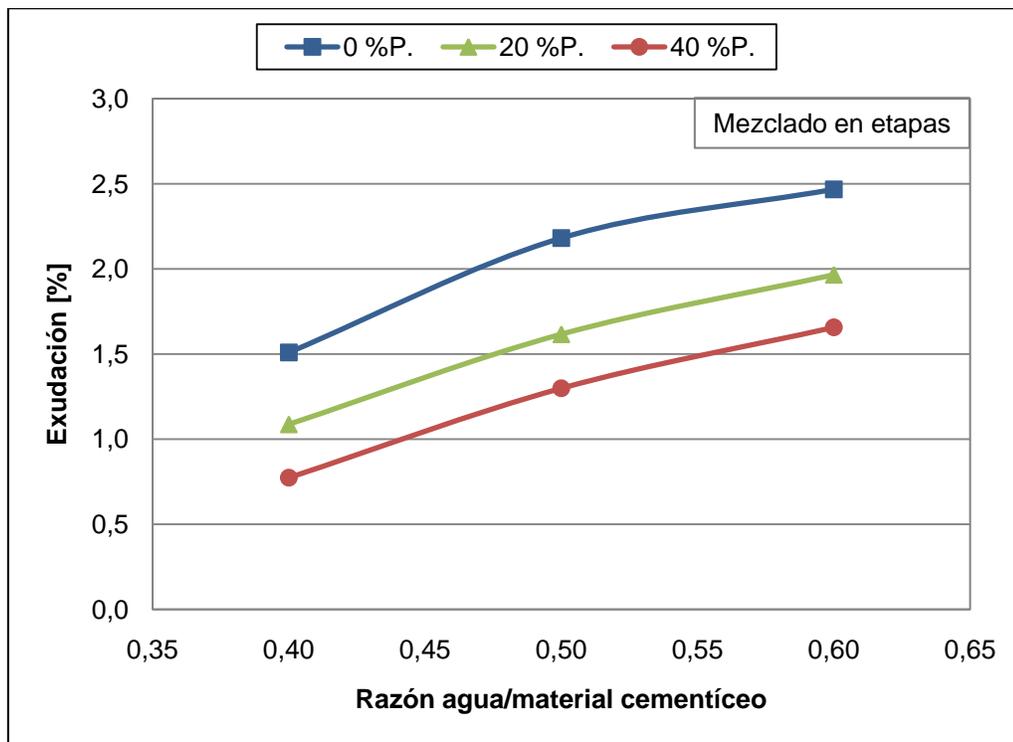


Figura 6.27: Curvas de exudación de hormigones versus razón agua/material cementíceo, al variar el contenido de puzolana.

Los hormigones de mayor razón agua/material cementíceo y menor contenido de adición puzolánica tendrán, por lo tanto, una mayor exudación, lo cual está de acuerdo con la mecánica de la decantación y segregación.

En las figuras 6.28, 6.29 y 6.30 se presentan las curvas que grafican el comportamiento de la exudación a lo largo del tiempo, para los distintos hormigones en estudio.

Se observa en dichas figuras que las curvas para 0, 20 y 40% de contenido de puzolana tienen la misma tendencia, para cada razón agua/material cementíceo estudiada. Además, en cada una de las figuras se observa que la mayor exudación se da en los hormigones elaborados con menor contenido de adición puzolánica.

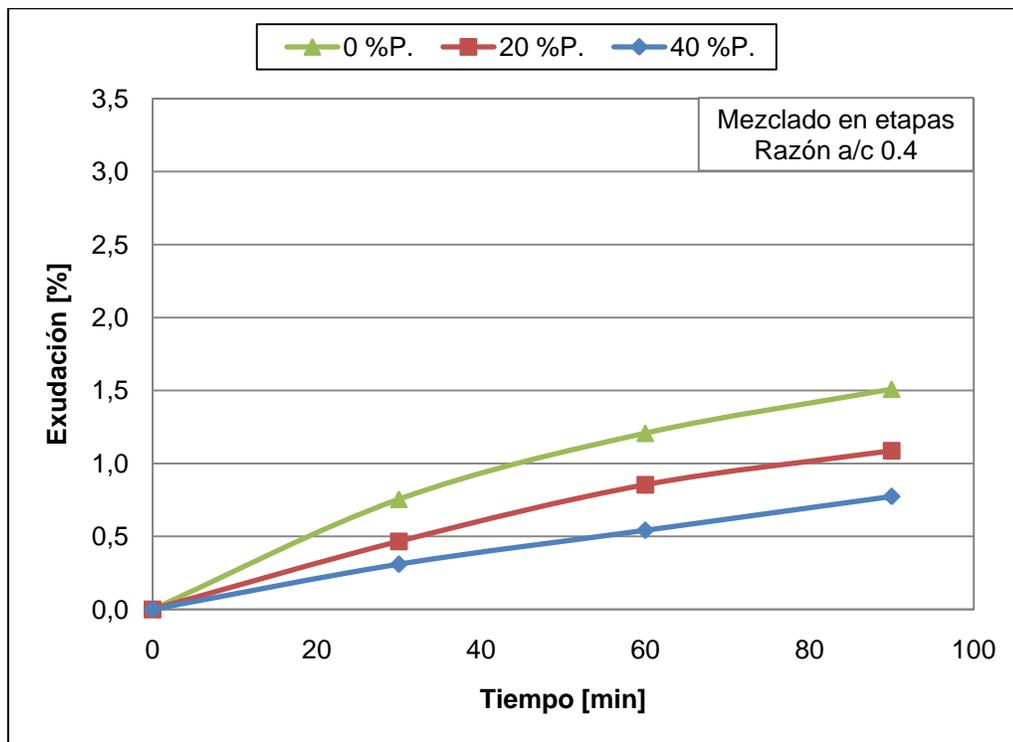


Figura 6.28: Curva de exudación versus tiempo, de hormigones de razón agua/material cementíceo 0.4 para diferentes contenidos de puzolana en el material cementíceo.

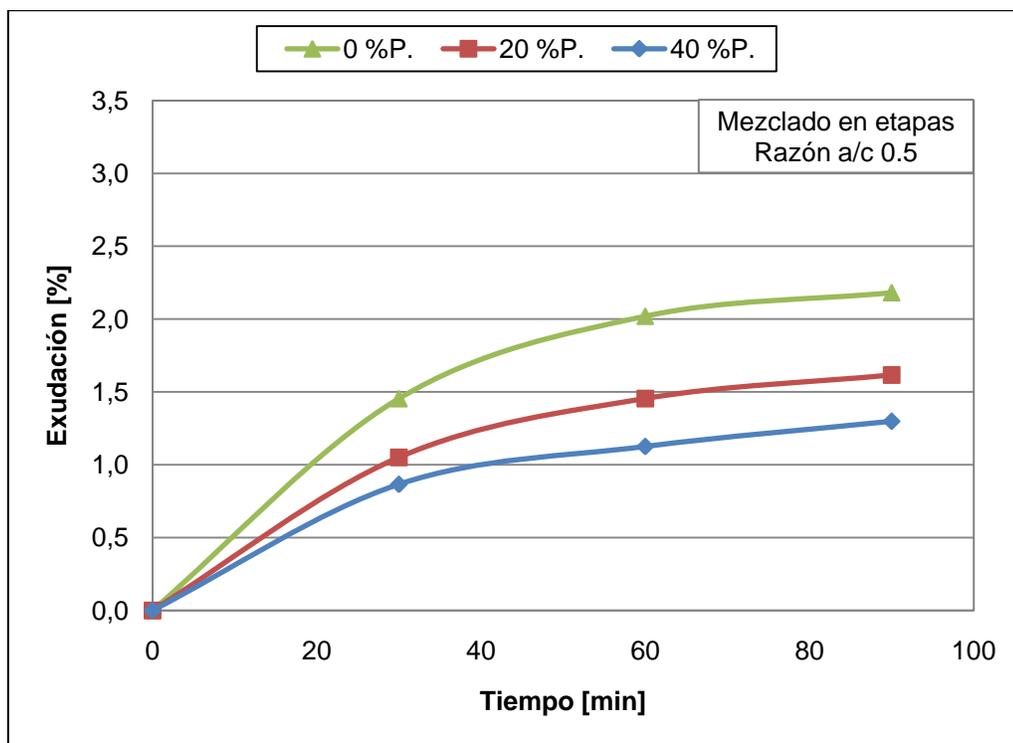


Figura 6.29: Curva de exudación versus tiempo, de hormigones de razón agua/material cementíceo 0.5 para diferentes contenidos de puzolana en el material cementíceo.

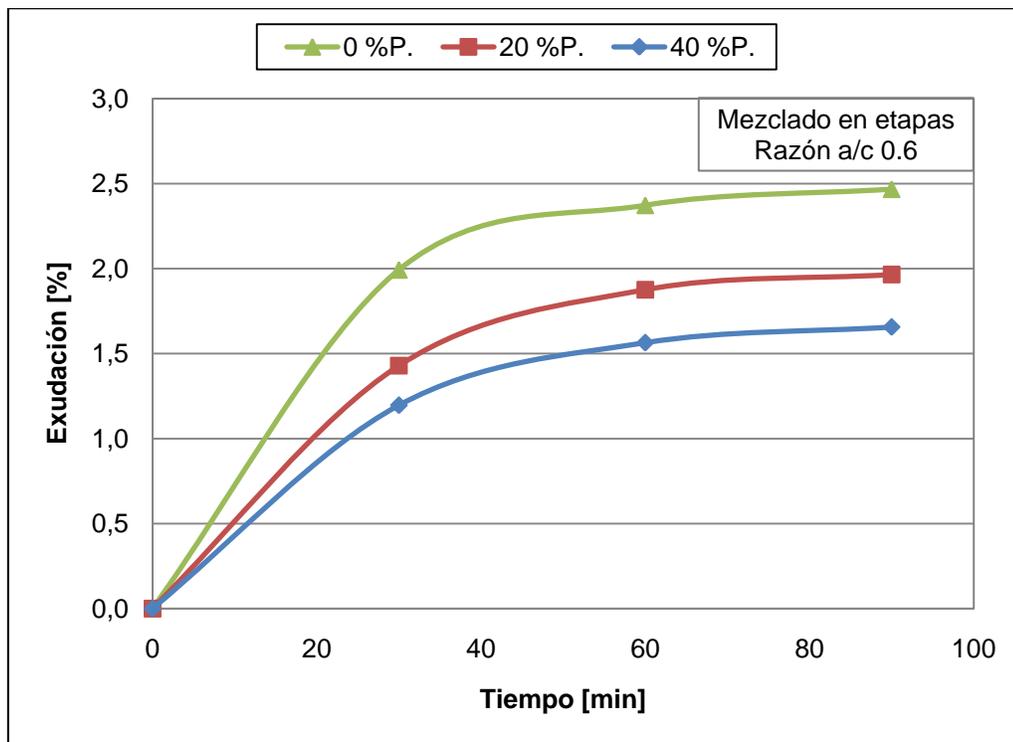


Figura 6.30: Curva de exudación versus tiempo, de hormigones de razón agua/material cementíceo 0.6 para diferentes porcentajes de puzolana en el material cementíceo.

Comparando las figuras 6.28, 6.29 y 6.30, se observa que la exudación es mayor en los hormigones de razón agua/material cementíceo 0.6, ya que si bien la pendiente de crecimiento es inicialmente positiva para todos los hormigones, los hormigones fabricados con razón agua/material cementíceo 0.6 presentan curvas de mayor inclinación.

6.3.1.1.5 Densidad de pasta

La tabla 5.11 entrega el resultado del ensayo de densidad de pasta realizado a los hormigones mezclados en etapas, con cuyos datos se obtienen las figuras 6.31 y 6.32.

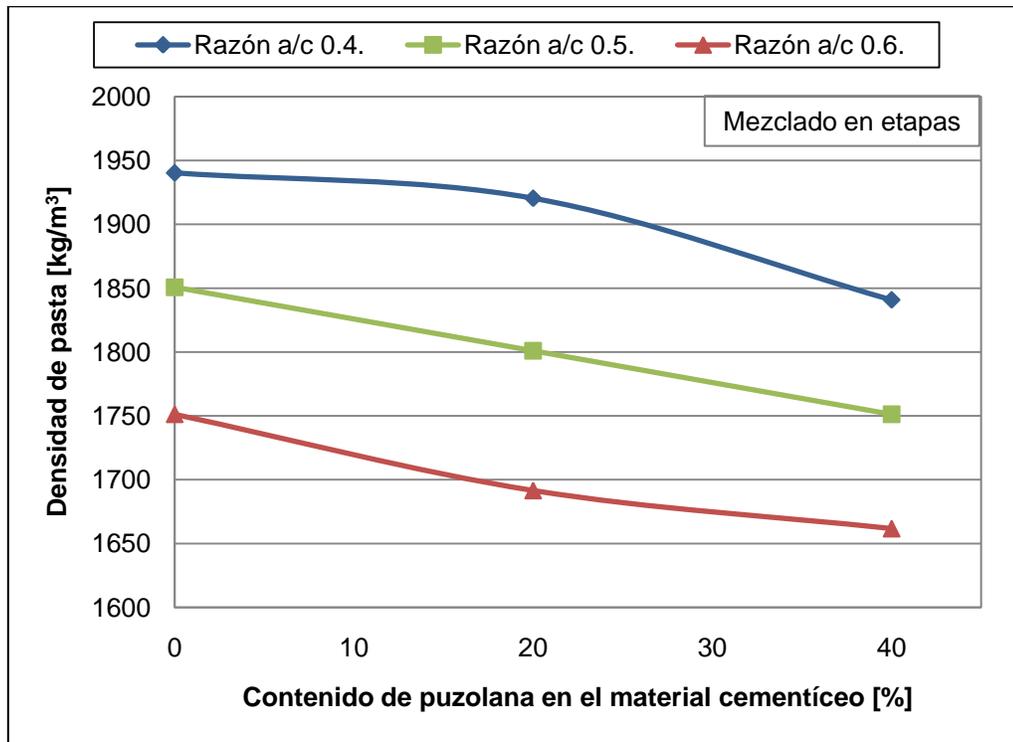


Figura 6.31: Curvas de densidad de pasta versus contenido de puzolana, para hormigones con diferentes razones agua/material cementíceo.

Comparando las curvas de las figuras 6.22 y 6.31, se aprecia que la variación de densidad de pasta con el aumento del contenido de puzolana en el material cementíceo es mucho mayor que la alcanzada por el hormigón de la misma serie.

Los resultados mostrados en la figura 6.31 muestran que al aumentar la proporción de puzolana en el material cementíceo, la densidad de la pasta disminuye para cada razón agua/material cementíceo estudiada. Este comportamiento es atribuible al menor peso específico que presenta la adición, comparativamente con los demás elementos que conforman el material cementíceo, por lo que al aumentar su contenido, disminuye la densidad de la muestra.

Se observa en la figura 6.32 que al aumentar la razón agua/material cementíceo la densidad de la pasta disminuye, lo que se explicaría porque al aumentar esta razón, se está cambiando un componente de mayor peso específico (material cementíceo) por uno de menor peso, como es el agua.

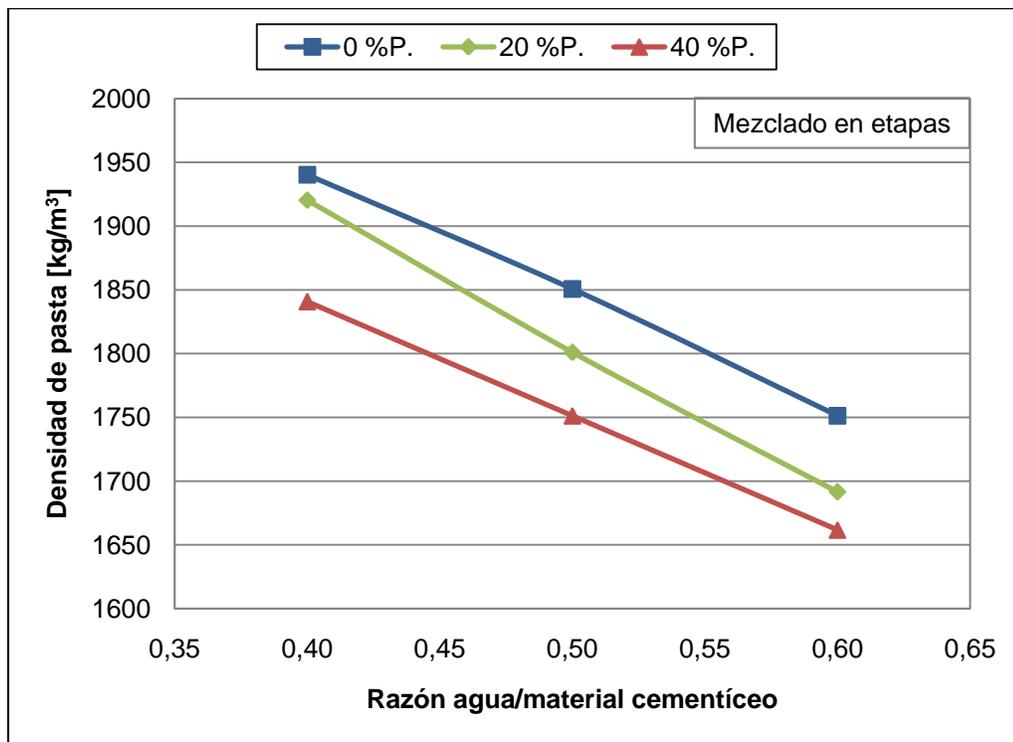


Figura 6.32: Curvas de densidad de pasta versus razón agua/material cementíceo, para diferentes contenidos de puzolana.

6.3.1.2 Propiedades del hormigón endurecido

6.3.1.2.1 Resistencia del mortero del hormigón

En la tabla 5.12 se encuentran los resultados de los ensayos de resistencia a compresión y flexión de morteros extraídos por tamizado de los hormigones correspondientes a las series confeccionadas mediante mezclado en etapas. Con estos resultados se obtienen las figuras 6.33 y 6.34.

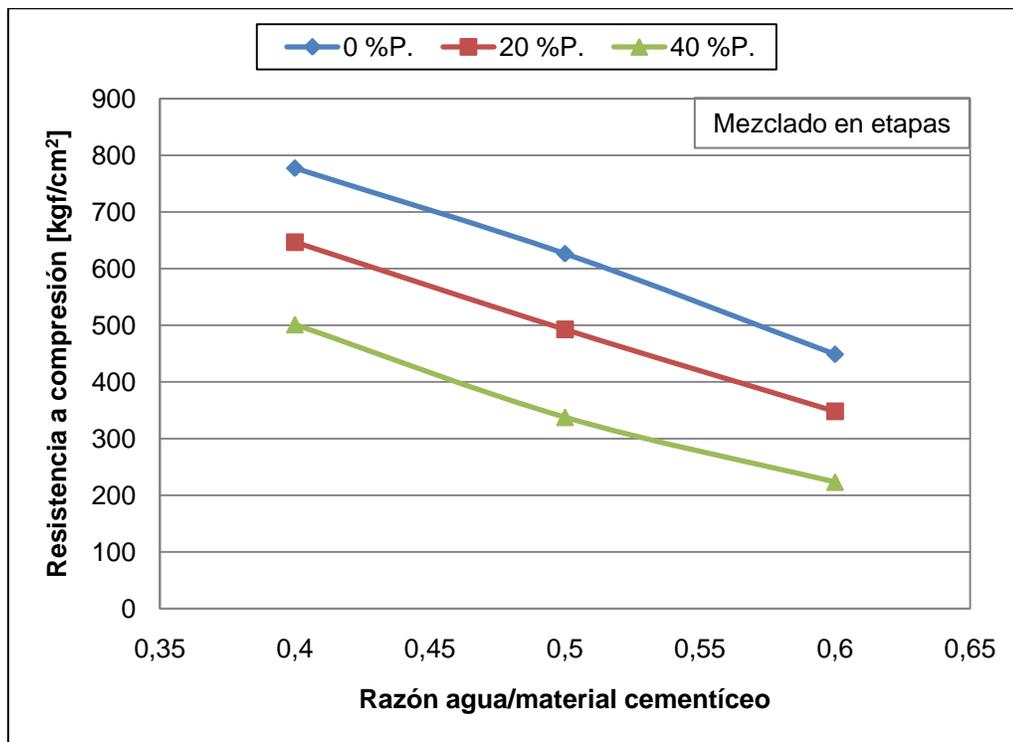


Figura 6.33: Resistencia a compresión a los 28 días de morteros correspondientes a los hormigones estudiados en función de su razón agua/material cementíceo.

Como se observa en la figura 6.33, el mortero del hormigón disminuye linealmente su resistencia a compresión al aumentar la razón agua/material cementíceo, comportamiento similar al de los hormigones correspondientes, por lo que se cumple la teoría que indica que al haber mayor proporción de agua, hay mayor porosidad, lo que significa una menor resistencia a compresión.

Se observa que esta pérdida de resistencia a compresión con el aumento de razón agua/material cementíceo es lineal, y que presenta la misma pendiente para los tres materiales cementíceos estudiados.

Con los resultados de resistencia a flexión de los morteros obtenidos por tamizado de las series de hormigones elaborados mediante mezclado en etapas, que se encuentran en la tabla 5.12, se obtiene la figura 6.34.

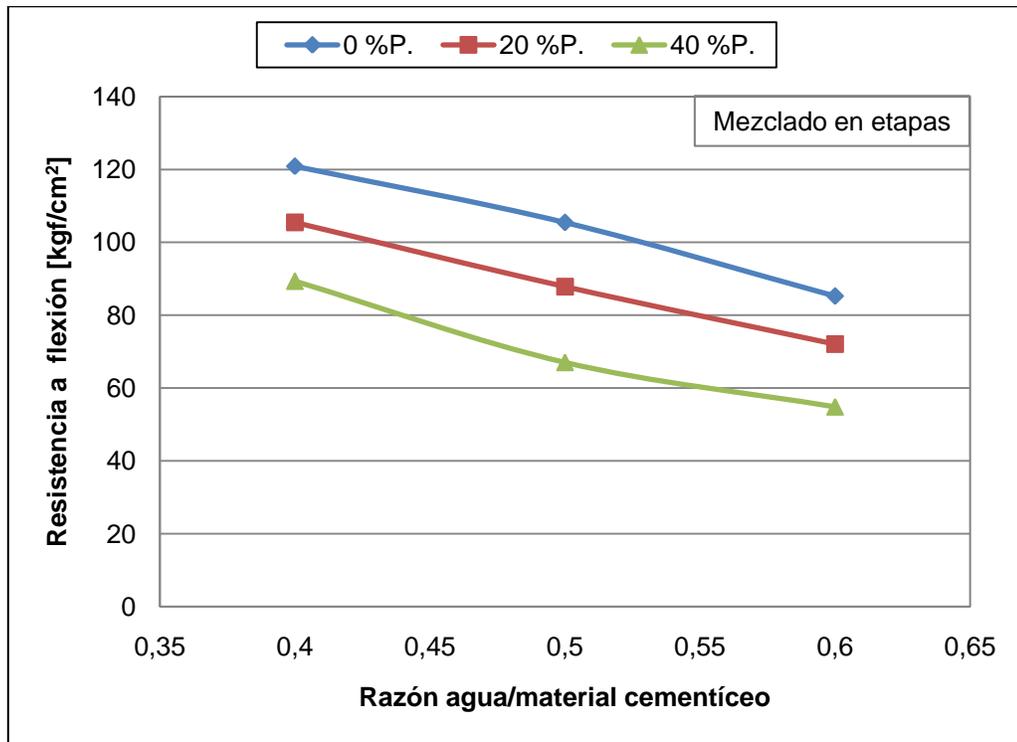


Figura 6.34: Resistencia a flexión a los 28 días de morteros correspondientes a los hormigones estudiados en función de su razón agua/material cementíceo.

Las resistencias a flexión obtenidas por los morteros de los hormigones a analizar, presentan el mismo comportamiento que las resistencias a compresión. Se observa que la resistencia disminuye linealmente al aumentar la razón agua/material cementíceo.

Se observa además, que los morteros de hormigones elaborados con menores contenidos de puzolana presentan mayores resistencias a la flexión.

6.3.1.2.2 Resistencia mecánica del hormigón

Con los resultados de las resistencias mecánicas obtenidos de los hormigones mezclados en etapas, a distintas edades de ensayo, que se encuentran en la tabla 5.13, se obtuvieron las figuras 6.35, 6.36, 6.37 y 6.38.

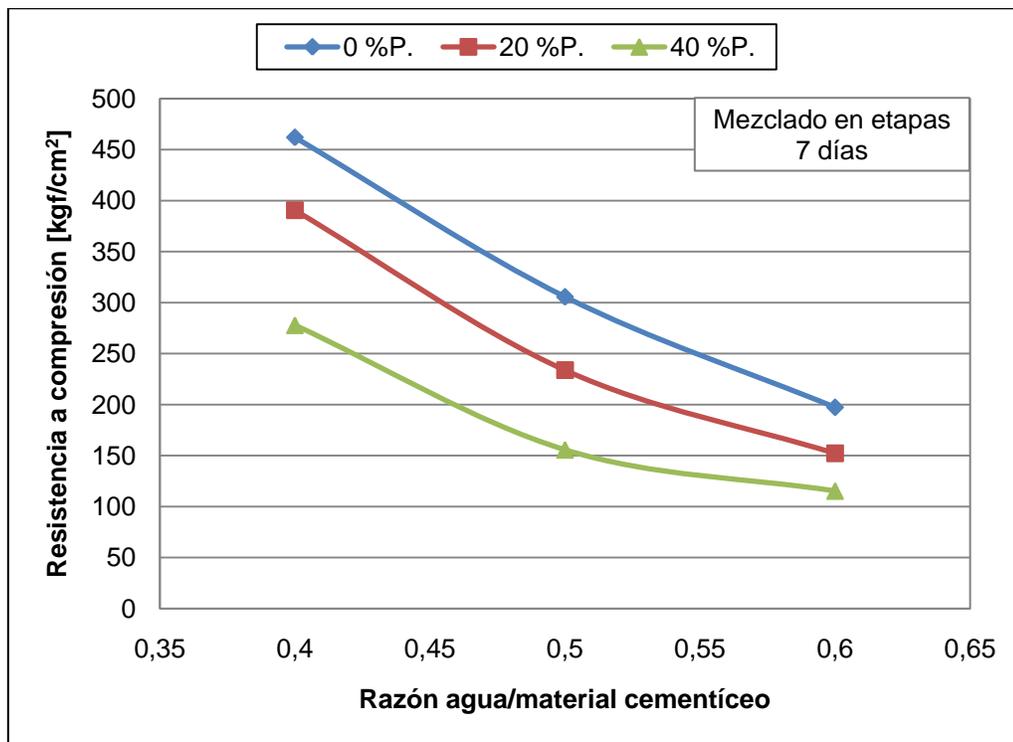


Figura 6.35: Curvas de resistencia a compresión a los 7 días en función de la razón agua/material cementíceo, para hormigones con distinto contenido de adición puzolánica.

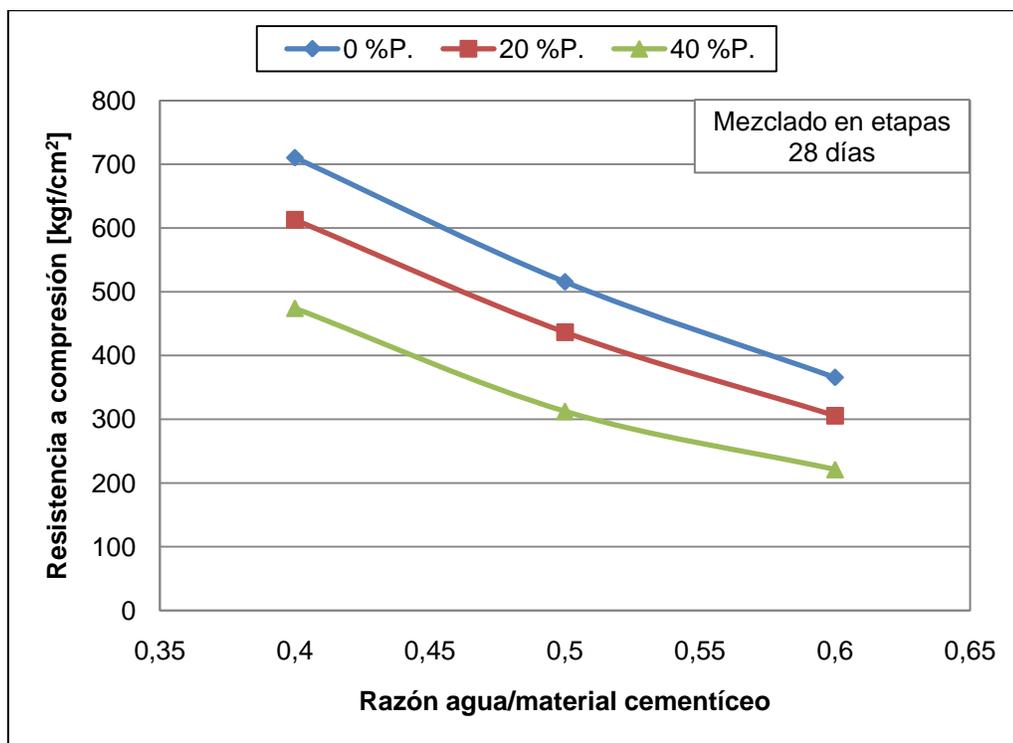


Figura 6.36: Curvas de resistencia a compresión a los 28 días en función de la razón agua/material cementíceo, para hormigones con distinto contenido de adición puzolánica.

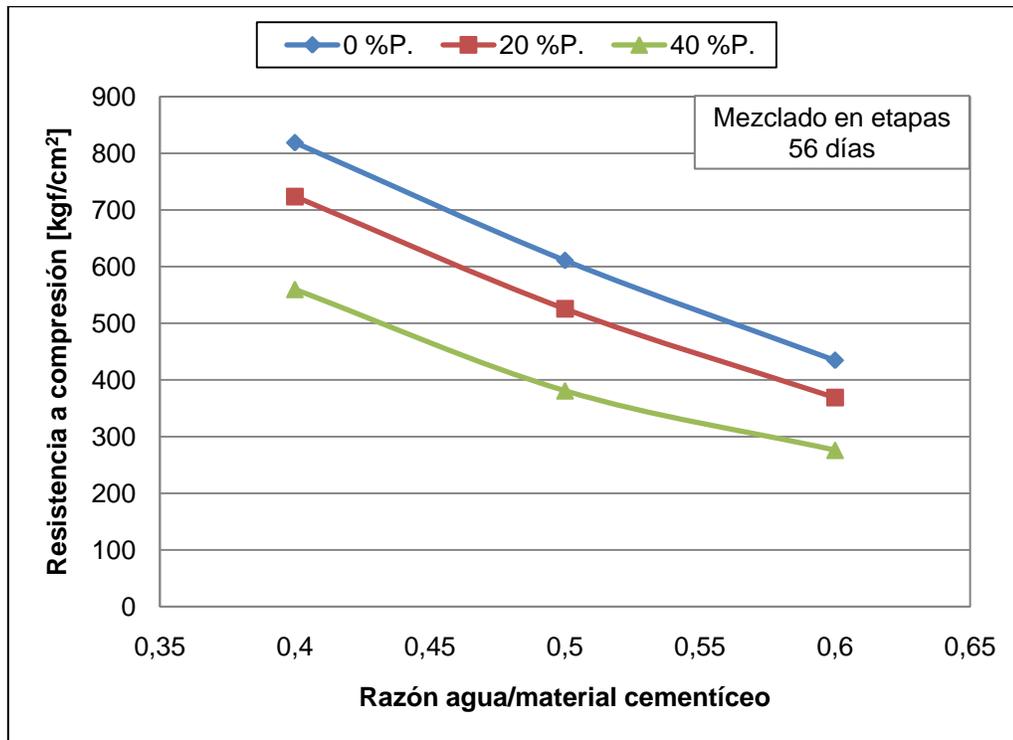


Figura 6.37: Curvas de resistencia a compresión a los 56 días en función de la razón agua/material cementíceo, para hormigones con distinto contenido de adición puzolánica.

Se observa en las curvas anteriores, que los resultados de resistencia a la compresión de los hormigones elaborados en etapas fueron los esperados. Para las tres edades analizadas, la resistencia disminuyó al aumentar la razón agua/material cementíceo debido al aumento de la porosidad que otorga el agua en la mezcla y la disminución del material cementante.

Para comparar el comportamiento de la resistencia a compresión en función de la razón agua/material cementicio para los distintos hormigones estudiados, ensayados a distintas edades, se grafican todas las curvas en la figura 6.38.

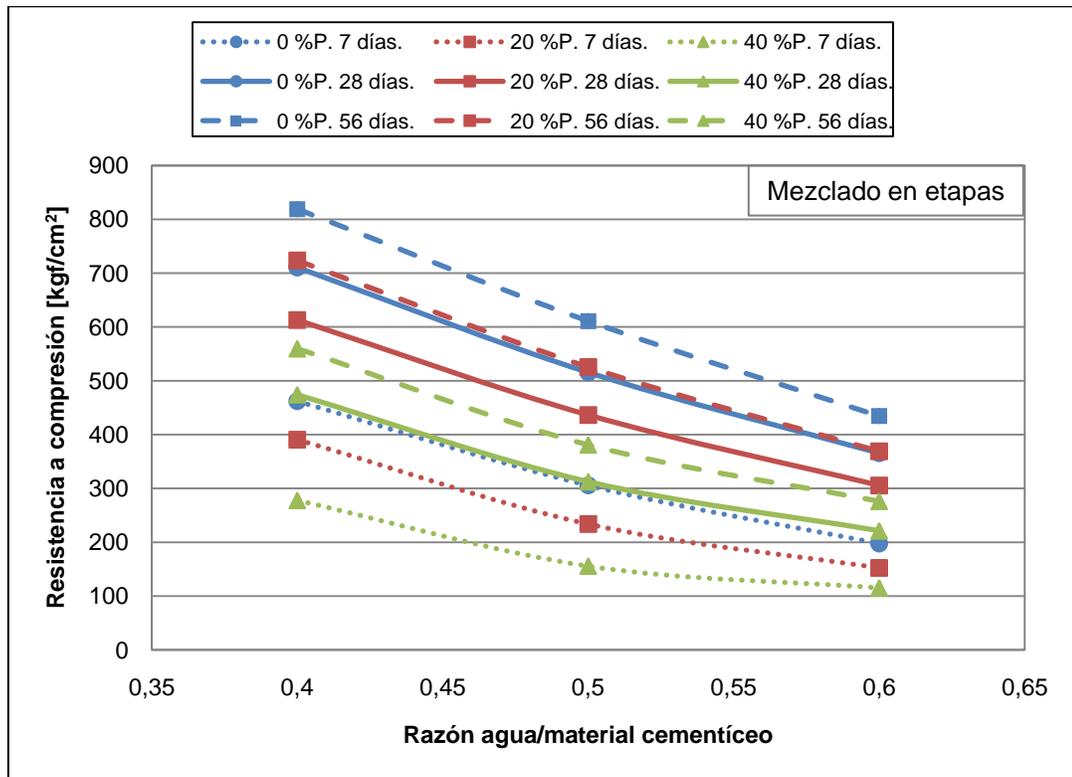


Figura 6.38: Resistencia versus razón agua/material cementíceo para todos los hormigones elaborados mediante en etapas.

Comparando los resultados de las resistencias para los distintos contenidos de puzolana en el tiempo, se observa que las mayores resistencias ocurren a mayor edad, lo que podría deberse a que las reacciones de hidratación han avanzado y la puzolana comienza a cumplir su rol de disminuir la porosidad, debido a su finura mayor y a su reacción con los productos de la hidratación del cemento Pórtland, para originar mayor contenido de CSH que entrega resistencia al hormigón.

En la tabla 6.4 se presentan las ganancias porcentuales de resistencia respecto a las resistencias obtenidas a los 7 días.

Tabla 6.4: Ganancia de resistencia en el tiempo con respecto a la resistencia a los 7 días en hormigones mezclados en etapas.

Serie	Ganancia de resistencia a compresión [%]	
	28 días	56 días
0.4 - 0 %P - E	54	77
0.4 - 20 %P - E	57	85
0.4 - 40 %P - E	71	102
0.5 - 0 %P - E	69	100
0.5 - 20 %P - E	87	125
0.5 - 40 %P - E	101	145

Serie	Ganancia de resistencia a compresión [%]	
	28 días	56 días
0.6 - 0 %P - E	85	120
0.6 - 20 %P - E	101	142
0.6 - 40 %P - E	92	139

El estudio de los valores entregados en la tabla 6.4, permite concluir que a mayor razón agua/material cementíceo, la ganancia de resistencia en el tiempo aumenta. Se observa además, que en general hay mayores ganancias de resistencia en los hormigones elaborados con materiales cementíceos con adición puzolánica.

Las resistencias obtenidas a los 56 días son notoriamente mayores que las que mostraron las muestras a 28 días, lo que podría deberse al cuidadoso curado que se le dio a cada uno de los hormigones elaborados.

Para comparar la utilidad de la puzolana en el material cementíceo, se analiza la figura 6.39.

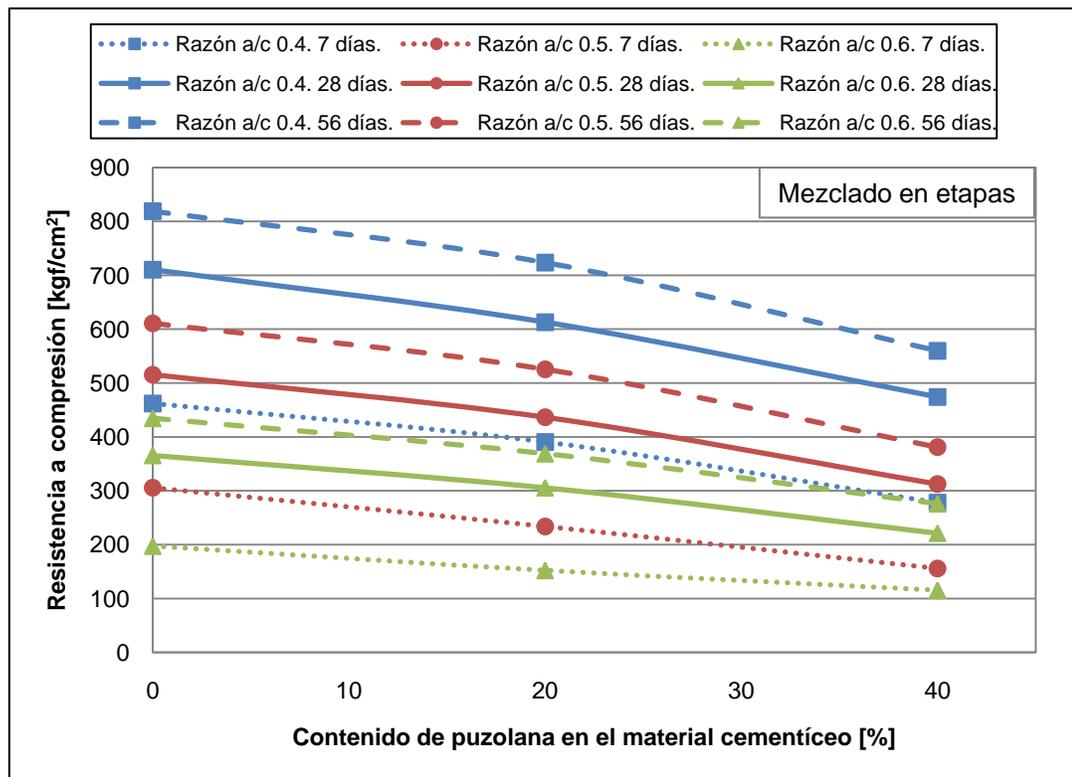


Figura 6.39: Curvas de resistencia a compresión versus contenido de puzolana en material cementíceo, para todos los hormigones elaborados mediante mezclado en etapas.

Se observa en la figura 6.39 que la influencia de la puzolana en la disminución de resistencia afecta de mayor manera a los hormigones de menor razón agua/material cementíceo. Además, se observa que esta pérdida de resistencia con el aumento de la adición puzolánica es menor a edades más tempranas.

A continuación se presenta una comparación de resistencias porcentuales, respecto a la resistencia del cemento Pórtland para cada razón agua/material cementíceo estudiada.

Tabla 6.5: Comparación de resistencias a compresión de los hormigones con adiciones de puzolana con respecto a los hormigones elaborados con cemento Pórtland.

Serie	Comparación de resistencia [%]		
	7 días	28 días	56 días
0.4 - 0 %P - E	100	100	100
0.4 - 20 %P - E	85	86	88
0.4 - 40 %P - E	60	67	68
0.5 - 0 %P - E	100	100	100
0.5 - 20 %P - E	76	85	86
0.5 - 40 %P - E	51	61	62
0.6 - 0 %P - E	100	100	100
0.6 - 20 %P - E	77	84	85
0.6 - 40 %P - E	58	61	64

Se observa en la tabla 6.5, que se producen pérdidas mayores de resistencia, cuando el contenido de adiciones aumenta en el material cementíceo. Además, el incremento de la edad de ensayo permite disminuir las pérdidas de resistencia, lo que podría deberse a la intervención de la puzolana en el largo plazo.

La eficiencia del cemento Pórtland en los distintos hormigones estudiados, viene dada por la razón de la resistencia del hormigón en el contenido de cemento Pórtland por metro cúbico utilizado. Estos valores se presentan en la tabla 6.6.

Tabla 6.6: Eficiencia del cemento Pórtland en cada hormigón analizado.

Serie	Razón resistencia/contenido de cemento Pórtland/m ³		
	7 días	28 días	56 días
0.4 - 0 %P - E	0.9	1.4	1.6
0.4 - 20 %P - E	0.7	1.2	1.4
0.4 - 40 %P - E	0.5	0.9	1.1
0.5 - 0 %P - E	0.6	1.0	1.2
0.5 - 20 %P - E	0.4	0.8	1.0
0.5 - 40 %P - E	0.3	0.6	0.7
0.6 - 0 %P - E	0.4	0.7	0.8
0.6 - 20 %P - E	0.3	0.6	0.7
0.6 - 40 %P - E	0.2	0.4	0.5

En la tabla 6.6, se observa que la eficiencia del cemento Portland en los hormigones elaborados, aumenta con el tiempo. Además, se presentan disminuciones en la eficiencia del mismo, al aumentar el contenido de adiciones puzolánicas en un hormigón de cierta razón agua/material cementíceo.

Además, comparando las razones agua/material cementicio analizadas, se presentan menores eficiencias cuando esta razón es mayor.

6.3.2 Áridos a alta temperatura

6.3.2.1 Propiedades del hormigón fresco

6.3.2.1.1 Asentamiento de cono

A partir de los resultados presentados en la tabla 5.15, la cual corresponde al resultado del ensayo de asentamiento de cono realizado a los hormigones mezclados en etapas con áridos a altas temperaturas, se obtiene la curva de la figura 6.40.

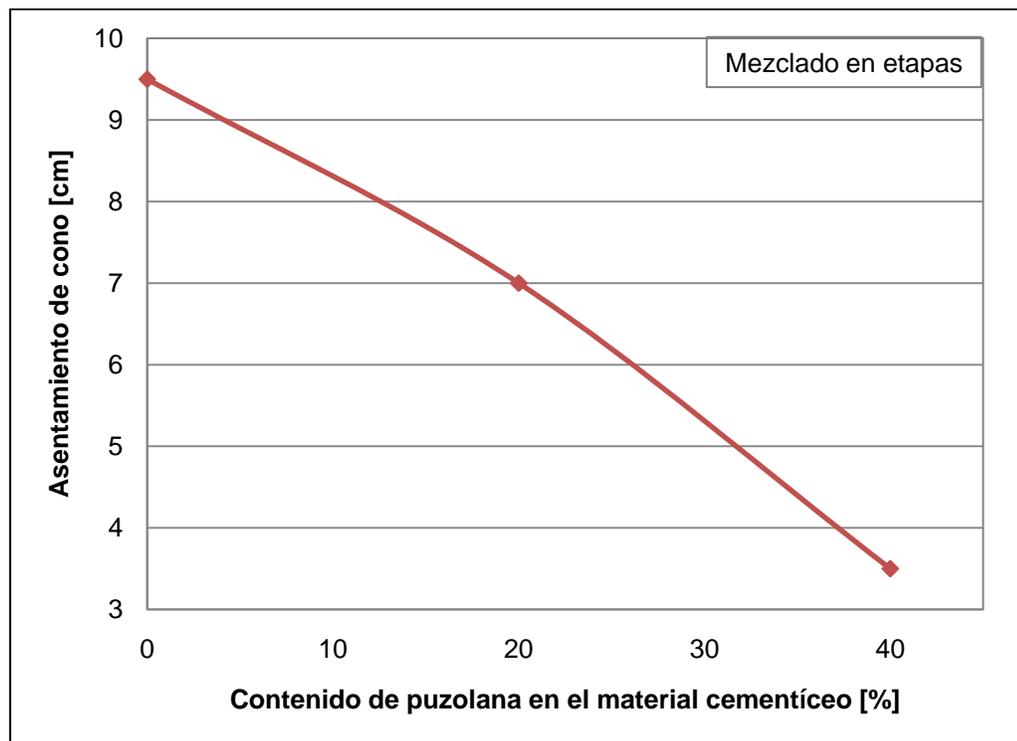


Figura 6.40: Variación del asentamiento de cono en función del contenido de puzolana, para hormigones fabricados con áridos a altas temperaturas.

Se observa en la figura 6.40, que el asentamiento de cono tiene un rápido descenso cuando se agrega puzolana en el material cementíceo. Esto se debería a que la puzolana presenta una mayor demanda de agua, como se explicaba anteriormente, y a que las reacciones de hidratación se ven aceleradas tanto por el proceso de mezclado de la pasta, por separado del resto de los materiales, como por la temperatura de los áridos que son agregados para la fabricación del hormigón, que precipita la hidratación y el fraguado.

6.3.2.1.2 Densidad

Con los resultados presentados en la tabla 5.17, la cual corresponde al resultado del ensayo de densidad realizado a los hormigones mezclados en etapas con áridos a altas temperaturas, se obtiene la figura 6.41.

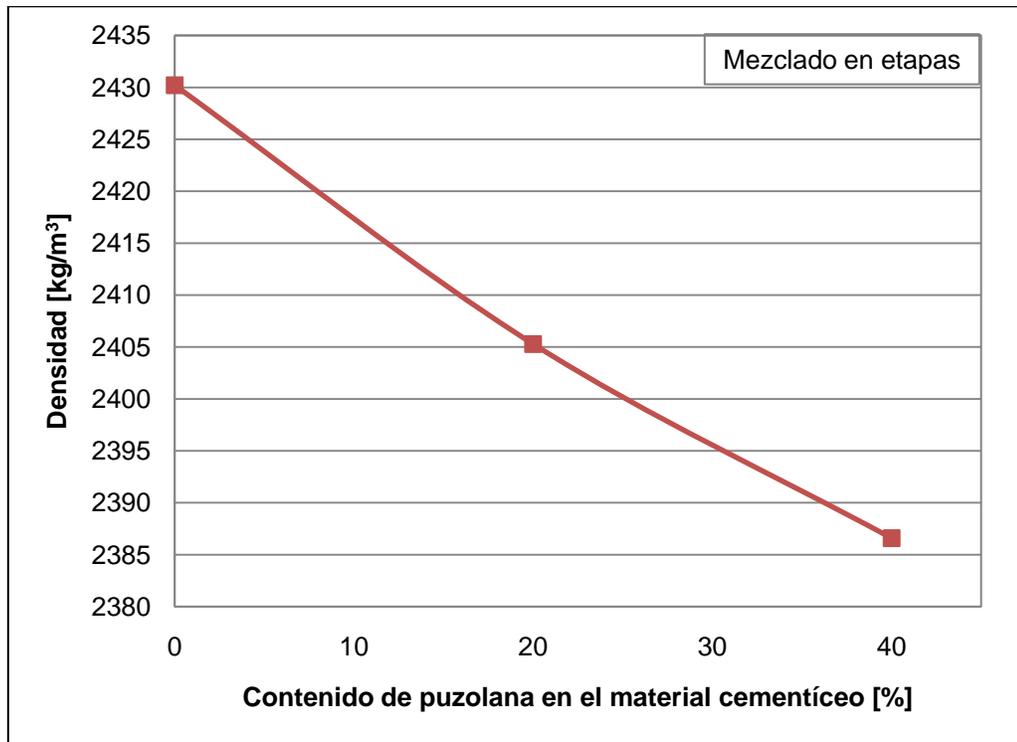


Figura 6.41: Variación de la densidad en función del contenido de puzolana, para hormigones fabricados con áridos a altas temperaturas.

La variación de densidad que se produce al aumentar el porcentaje de puzolana en el material cementíceo se observa en la figura 6.41. Este comportamiento se podría deber al menor peso específico que presenta la puzolana con respecto al cemento Pórtland.

6.3.2.1.3 Contenido de aire

En la figura 6.42, se grafican los resultados, presentados en la tabla 5.17, que corresponden al contenido de aire de los hormigones fabricados con áridos a altas temperaturas mediante el procedimiento de mezclado en etapas.

Se observa que el contenido de aire atrapado en el hormigón aumenta con la adición mineral que se le agrega al material cementíceo (figura 6.42).

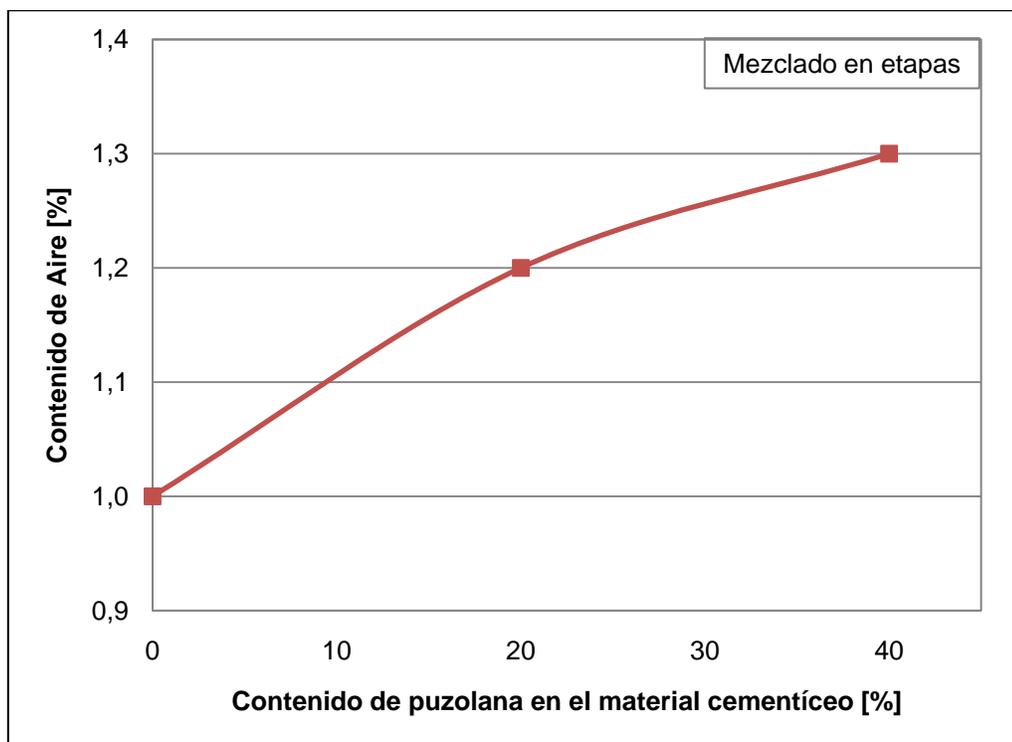


Figura 6.42: Variación del contenido de aire en función de la proporción de puzolana, para hormigones fabricados con áridos a altas temperaturas.

6.3.2.1.4 Densidad de pasta

La tabla 5.18 entrega el resultado del ensayo de densidad de pasta realizado a los hormigones mezclados en etapas con áridos a altas temperaturas, con cuyos datos se obtiene la curva de la figura 6.43.

Se observa que la densidad de pasta de los hormigones elaborados con áridos a temperaturas altas, disminuye al aumentar el porcentaje de puzolana en el material cementíceo. Se aprecia además, comparando con la figura 6.41, que la variación de densidad con el aumento del porcentaje de puzolana en el material cementíceo de la pasta es mucho mayor que la alcanzada por el hormigón de la misma serie.

El comportamiento que se presenta en la figura 6.43, la disminución de la densidad de pasta con el aumento del contenido de puzolana, se justifica, nuevamente, por el bajo peso específico que presenta la puzolana, comparativamente con el cemento Pórtland, que es reemplazado dentro del material cementíceo.

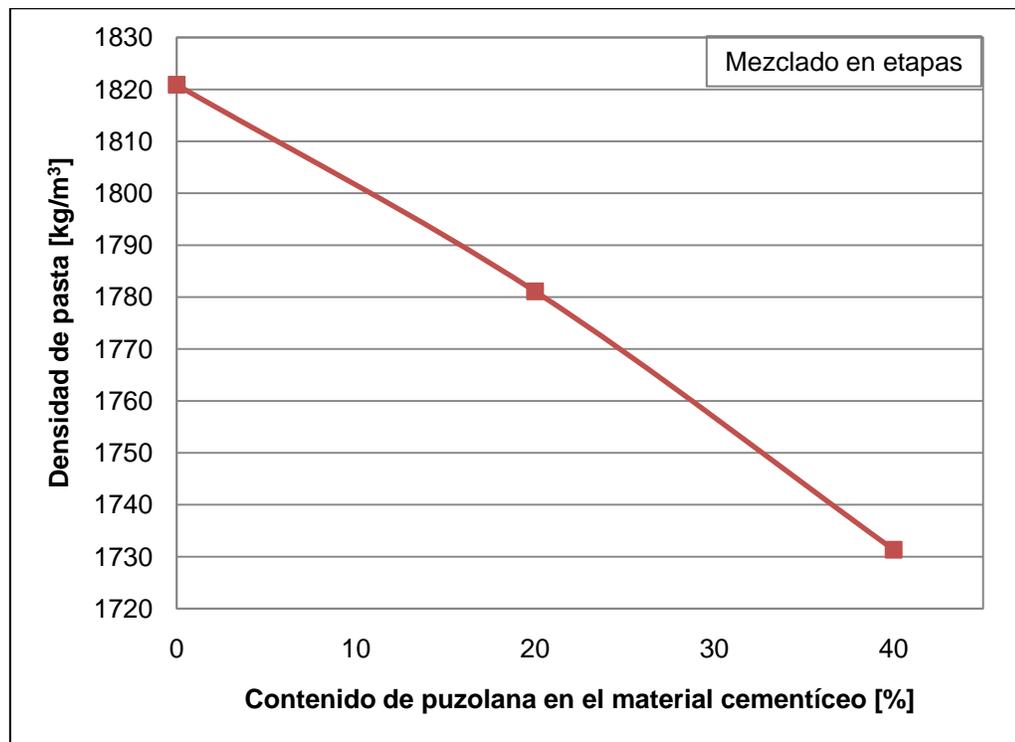


Figura 6.43: Variación de la densidad de pasta en función del contenido de puzolana, para hormigones fabricados con áridos a altas temperaturas.

6.3.2.2 Propiedades del hormigón endurecido

6.3.2.2.1 Resistencia mecánica del hormigón

Con los resultados de las resistencias mecánicas obtenidos de los hormigones mezclados en etapas con áridos a altas temperaturas, que se encuentran en la tabla 5.19, se obtienen las curvas de la figura 6.44.

Se observa en la figura 6.44, que la resistencia del hormigón aumenta en el tiempo, como es esperado. El aumento de resistencia que se produce entre los 7 y 28 días es mucho mayor, comparado con el que se da entre los 28 y 56 días, lo que podría deberse a que la temperatura y el mezclado intenso de la pasta, aceleran la obtención de resistencia a temprana edad, impidiendo mayores incrementos a largo plazo.

Se observa, además, un descenso en la resistencia al aumentar la proporción de adición puzolánica en el material cementíceo en las curvas de todas las edades.

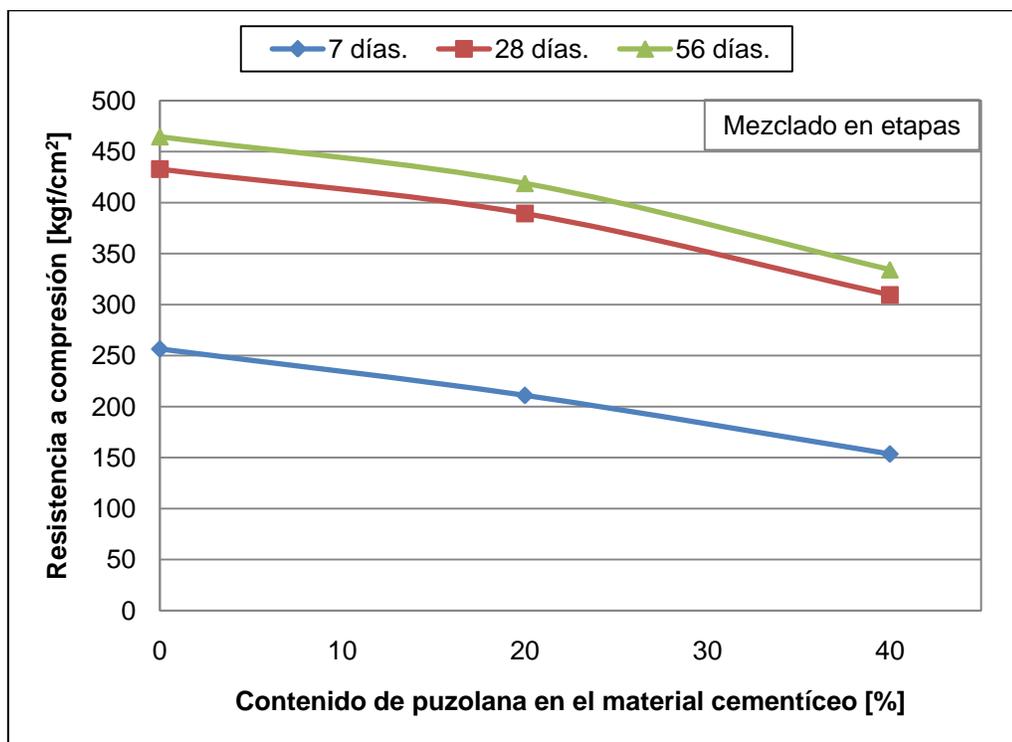


Figura 6.44: Curvas de resistencia a compresión versus contenido de puzolana en material cementíceo, para los hormigones elaborados con áridos a altas temperaturas.

En la tabla 6.7 se presentan las ganancias porcentuales de resistencia respecto a las resistencias obtenidas a los 7 días.

Tabla 6.7: Ganancia de resistencia en el tiempo con respecto a la resistencia a los 7 días en hormigones elaborados con áridos a altas temperaturas

Serie	Ganancia de resistencia a compresión [%]	
	28 días	56 días
0.5 - 0 %P - E - T	69	81
0.5 - 20 %P - E - T	85	99
0.5 - 40 %P - E - T	102	118

Analizando los valores entregados en la tabla 6.7, se concluye que hay un aumento de la resistencia en el tiempo, siendo mayores las ganancias de resistencia cuando hay un mayor contenido de adición puzolánica en el material cementíceo, lo que concuerda con la teoría respecto a la reacción secundaria de hidratación de la puzolana.

A continuación se presenta una comparación de resistencias porcentuales, respecto a la resistencia del cemento Pórtland para la razón agua/material cementíceo 0.5.

Tabla 6.8: Comparación de resistencias a compresión de los hormigones con adiciones de puzolana con respecto a los hormigones elaborados con cemento Pórtland.

Serie	Comparación de resistencia [%]		
	7 días	28 días	56 días
0.5 - 0 %P - E - T	100	100	100
0.5 - 20 %P - E - T	82	90	90
0.5 - 40 %P - E - T	60	72	72

Los datos que entrega la tabla 6.8, indican que la resistencia de los hormigones elaborados con áridos a altas temperaturas disminuye al aumentar el contenido de puzolana en el material cementíceo. Se observa también que la pérdida de resistencia por el uso de material puzolánico disminuye al aumentar el tiempo, es decir, el efecto de la puzolana comienza a hacerse efectivo a largo plazo.

Comparando estos resultados con los de la tabla 6.5, se observa que al aumentar la temperatura de los áridos utilizados en la fabricación de hormigón en etapas, la disminución de la resistencia por el uso de puzolana en el material cementíceo es menor para todas las edades, lo que se debería a que al aumentar la temperatura de los áridos, se aceleran las reacciones de hidratación, por lo que la puzolana, que actúa a largo plazo, podría tener influencia anticipada en la resistencia del hormigón.

La eficiencia del cemento Pórtland en los hormigones elaborados con áridos a altas temperaturas, está dada por la razón de la resistencia del hormigón en el contenido de cemento Pórtland por metro cúbico utilizado. Estos valores se presentan en la tabla 6.9.

Tabla 6.9: Eficiencia del cemento Pórtland en cada hormigón analizado.

Serie	Razón resistencia/contenido de cemento Pórtland/m ³		
	7 días	28 días	56 días
0.5 - 0 %P - E - T	0.5	0.8	0.9
0.5 - 20 %P - E - T	0.4	0.7	0.8
0.5 - 40 %P - E - T	0.3	0.6	0.6

En la tabla 6.9, se observa que la eficiencia del cemento Portland en los hormigones elaborados con áridos a altas temperaturas, aumenta con el tiempo. Además, se presentan disminuciones en la eficiencia del mismo, al aumentar el contenido de adiciones puzolánicas en el material cementíceo.

Comparando con los datos que se encuentran en la tabla 6.6, se observan eficiencias del cemento Pórtland similares a temprana edad, pero menores en el largo plazo.

6.4 Comparación de métodos de elaboración del hormigón

6.4.1 Propiedades del hormigón fresco

6.4.1.1 Asentamiento de cono

Para comparar el comportamiento de los hormigones estudiados en el asentamiento de cono, se presentan las figuras 6.45 y 6.46, que entregan los resultados del ensayo para los hormigones elaborados mediante mezclado convencional y en etapas.

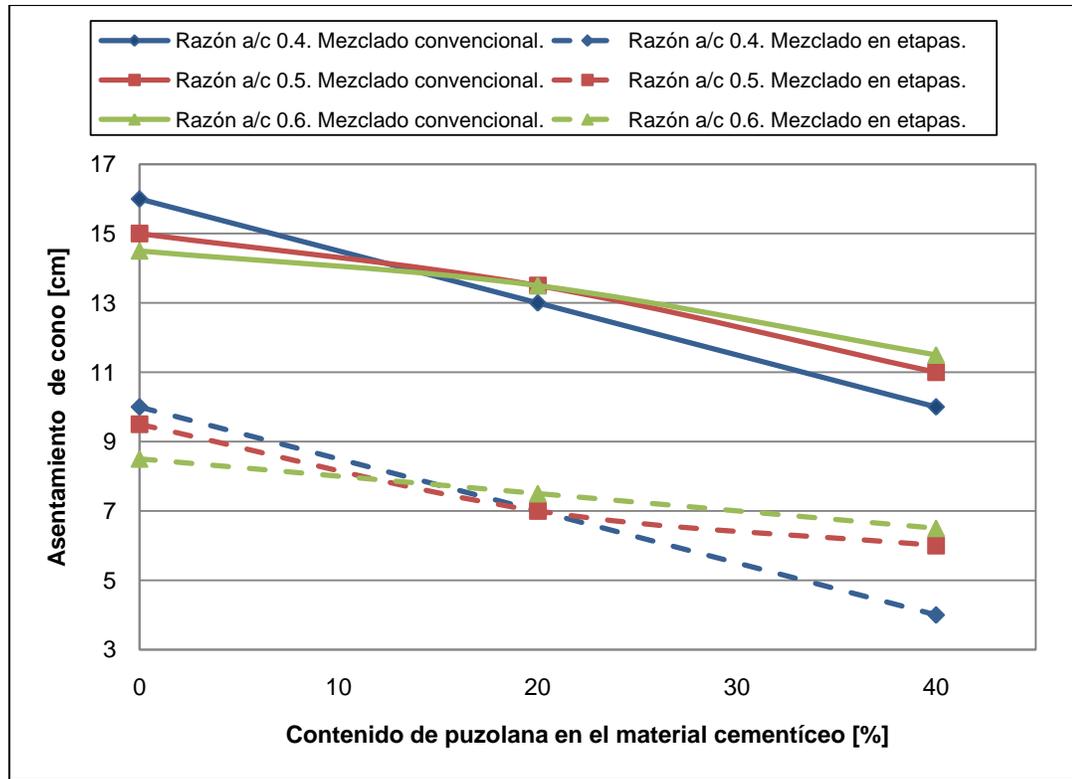


Figura 6.45: Variación del asentamiento de cono en función del contenido de puzolana, en hormigones de distinta razón agua/material cementíceo, según los dos métodos de mezclado.

Se observa que si bien la tendencia de las curvas graficadas para una misma razón agua/material cementíceo es la misma, es decir, ambas curvas de una cierta razón determinada tiene una pendiente frente a las demás que se mantiene para ambos tipos de mezclado, la trabajabilidad que muestran los hormigones mezclados en etapas es menor, en aproximadamente 3 [cm].

Este comportamiento se justificaría en el hecho de que el asentamiento de cono se midió al terminar la homogeneización de los hormigones y dado que el ciclo de mezclado varía según el método utilizado, los conos fueron medidos a distintos tiempos, siendo más tardía la medida tomada en los hormigones elaborados mediante mezclado en etapas.

Por otro lado, se pudo apreciar durante la fabricación de los hormigones, que por efecto de la mayor intensidad del amasado de la pasta, se obtuvieron hormigones más cohesivos y con mayor estabilidad (no segregabilidad) que la observada para los hormigones correspondientes amasados según procedimiento convencional.

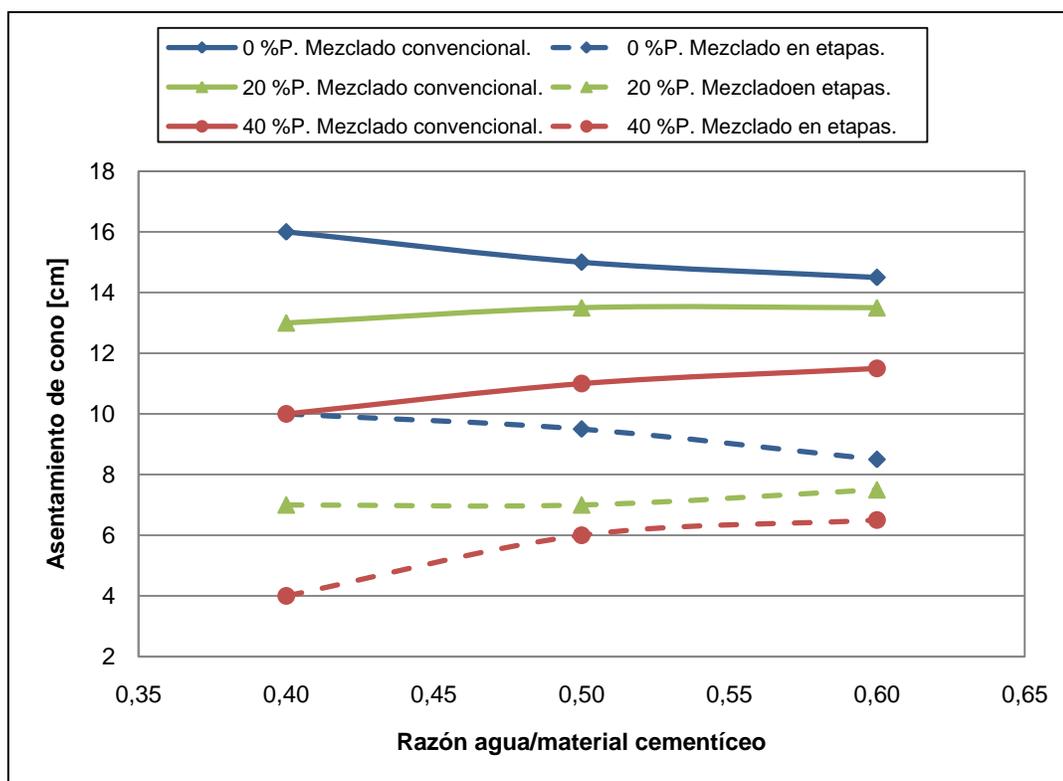


Figura 6.46: Curvas de asentamiento de cono versus razón agua/material cementíceo, con 0, 20 y 40 % de adición puzolánica, según los dos métodos de mezclado.

El mezclado en etapas, como se aprecia en la figura 6.46, modifica significativamente las características de trabajabilidad de los hormigones. Se observa, en efecto, menores asentamientos de cono, manteniéndose comportamientos similares en cuanto al efecto de la incorporación de distintos contenidos de puzolana en el material cementíceo, que para los hormigones elaborados mediante el mezclado convencional.

De esta forma, los hormigones fabricados mediante mezclado convencional obtuvieron alta trabajabilidad, mientras que las mismas dosificaciones bajaron su asentamiento de cono de Abrams al ser fabricados mediante mezclado en etapas.

6.4.1.2 Densidad

A partir de los resultados expuestos en las tablas 5.8 y 5.2, que presentan las densidades del hormigón, se obtienen las curvas de densidad en función de las variables estudiadas.

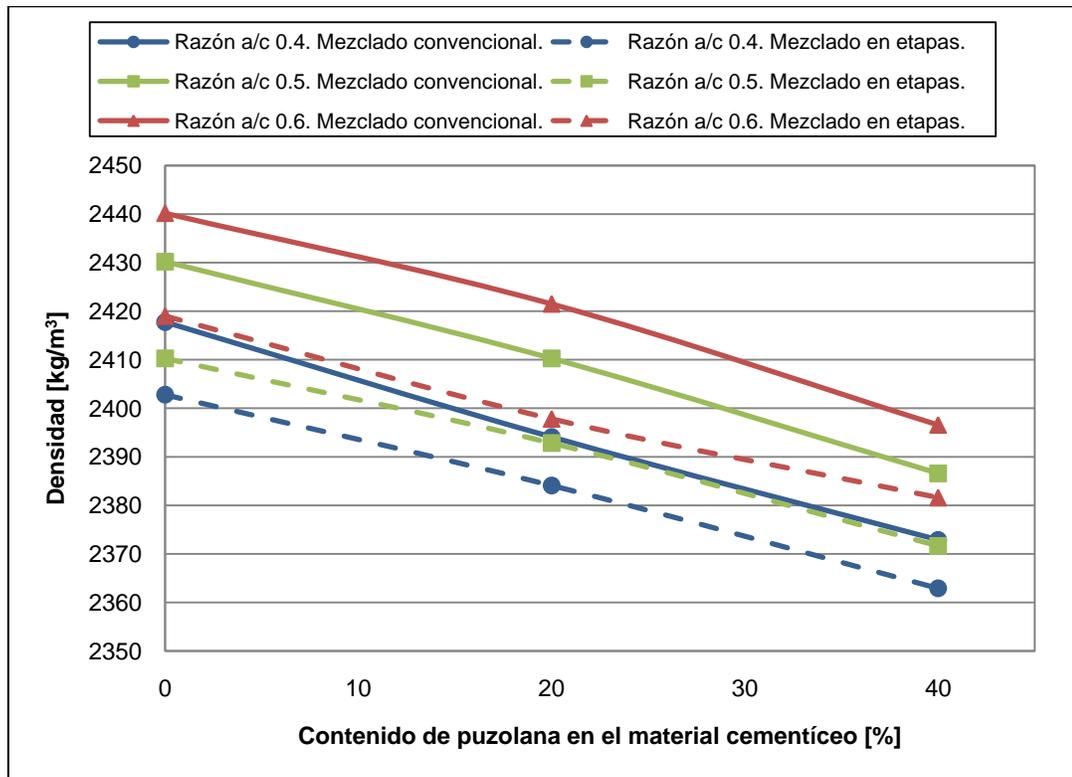


Figura 6.47: Variación de la densidad en función del contenido de puzolana, en hormigones de distinta razón agua/material cementíceo, según los dos métodos de mezclado.

Se observa que para todos los hormigones estudiados, la densidad disminuye, al aumentar el contenido de puzolana en el material cementíceo y para una determinada razón agua/material cementíceo, la densidad del hormigón es mayor cuando se fabrica mediante método convencional. Esto se produciría debido a que la elaboración del hormigón en etapas implica un contenido de aire mayor, lo que reduce el peso de un determinado volumen.

Además, todos los hormigones fabricados con uno u otro método, aumentan su densidad al aumentar la razón agua/material cementíceo y dado un cierto porcentaje de puzolana, los hormigones fabricados utilizando mezclado convencional tienen mayor densidad.

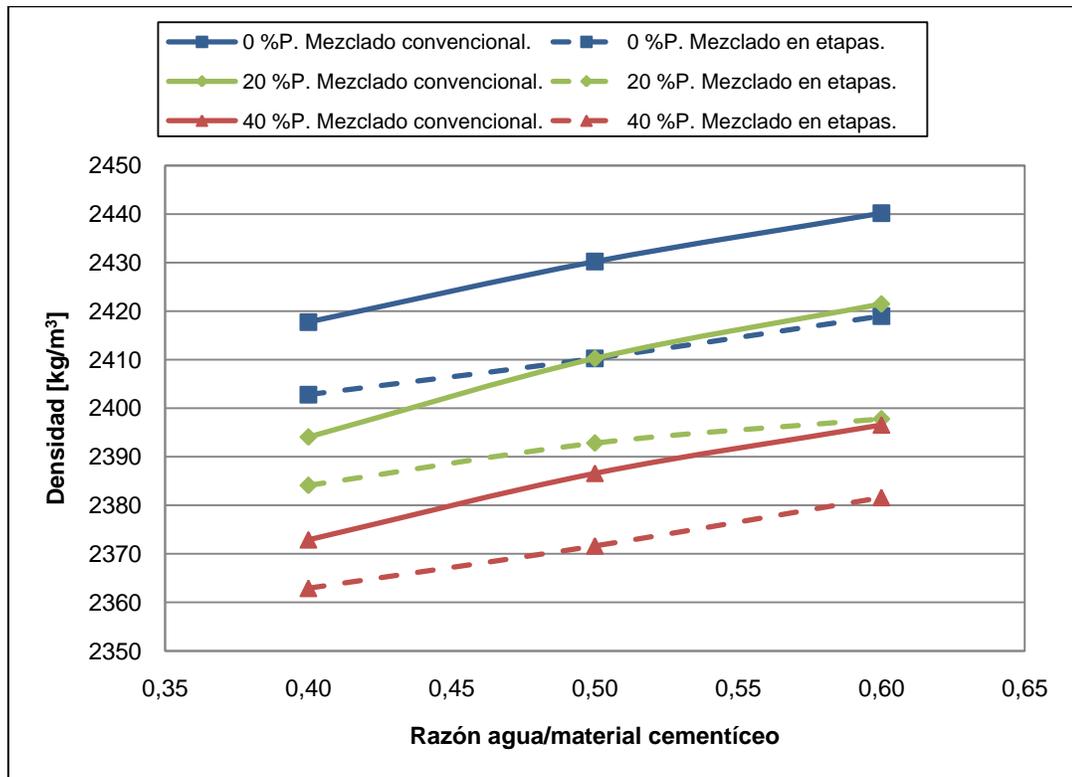


Figura 6.48: Curvas de densidad versus razón agua/material cementíceo, con 0, 20 y 40 % de adición puzolánica, según los dos métodos de mezclado.

Se observa en la figura 6.48 que el aumento de la densidad con la razón agua/material cementíceo es mayor en los hormigones elaborados mediante mezclado convencional, para cada porcentaje de puzolana en el material cementíceo, esto podría explicarse por el menor porcentaje de aire atrapado que presentan los hormigones obtenidos mediante mezclado convencional (figura 6.49).

6.4.1.3 Contenido de aire

En las figuras 6.49 y 6.50, se presentan las curvas de comportamiento del contenido de aire obtenido en los hormigones fabricados mediante el procedimiento convencional y en etapas.

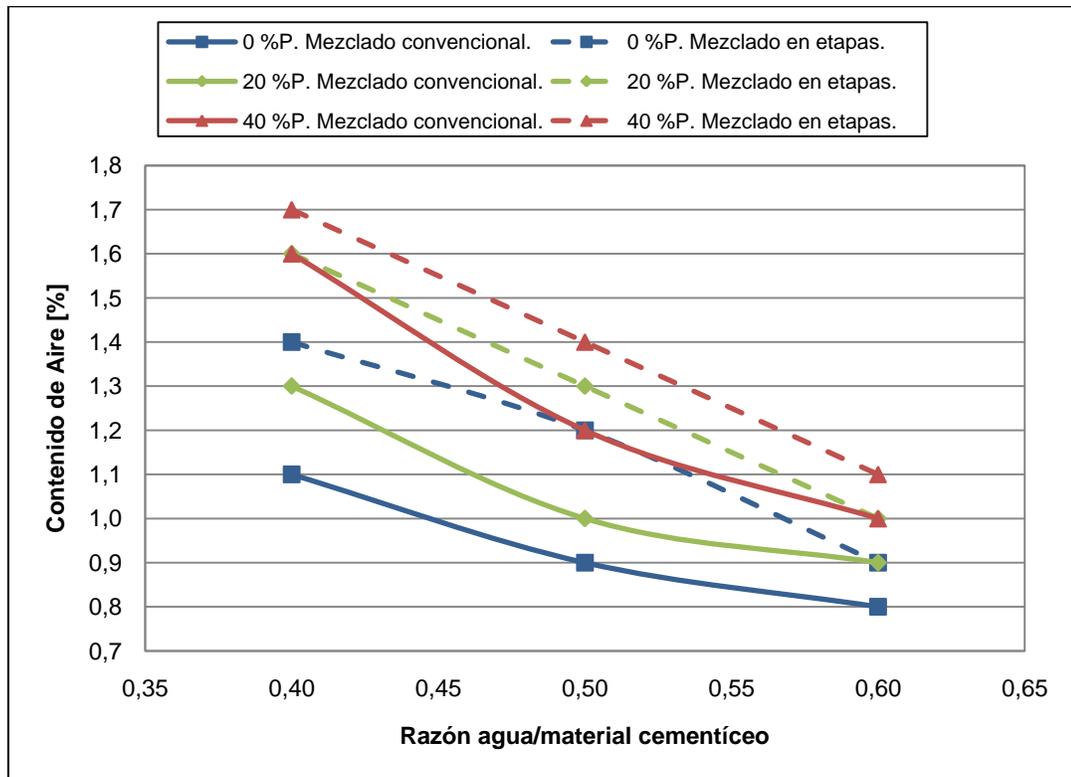


Figura 6.49: Curvas de contenido de aire versus razón agua/material cementíceo, con 0, 20 y 40% de adición puzolánica, según los dos métodos de mezclado.

Se observa en la figura 6.49, que si bien todos los hormigones fabricados presentan menor contenido de aire al aumentar la razón agua/material cementíceo y también al disminuir la adición de puzolana en el material cementíceo (figura 6.50), la tendencia de las curvas es distinta cuando se usa un método de mezclado u otro.

Los hormigones fabricados utilizando mezclado en etapas tienen un descenso lineal en el contenido de aire al aumentar la razón agua/material cementíceo, no así los hormigones elaborados mediante mezclado convencional, que presentan un rápido descenso en el contenido de aire entre la razón agua/material cementíceo 0.5 y 0.6, para los distintos contenidos de adición puzolánica. Dado este comportamiento, para una cierta razón agua/material cementíceo, los hormigones fabricados mediante mezclado en etapas tienen mayor contenido de aire que los confeccionados mediante mezclado convencional, como se observa en la figura 6.49.

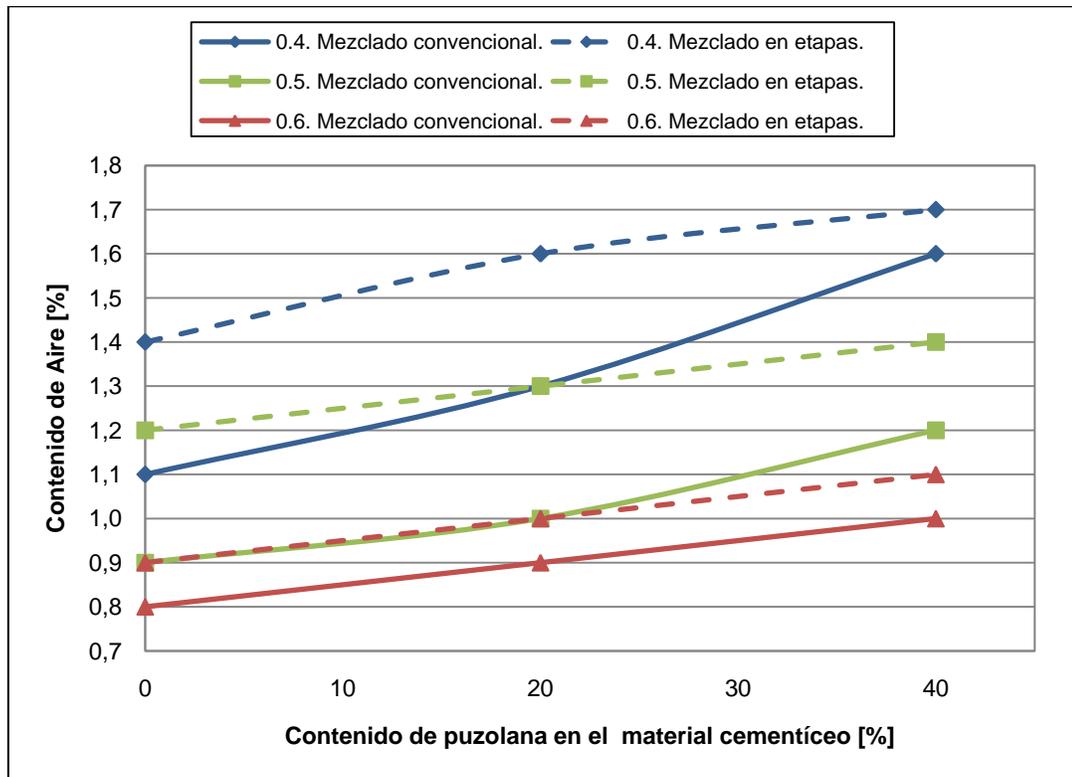


Figura 6.50: Variación del contenido de aire en función del contenido de puzolana, en hormigones de distinta razón agua/material cementíceo, según los dos métodos de mezclado.

Se observa en la figura 6.50, que al aumentar el contenido de puzolana en el material cementíceo, la curva de contenido de aire de los hormigones elaborados en etapas siempre va por sobre la de los elaborados mediante mezclado convencional, lo que podría deberse a que el mezclado de la pasta por separado y su posterior mezcla con los áridos aumente el contenido de aire atrapado.

6.4.1.4 Exudación

Las exudaciones totales obtenidas de los hormigones elaborados mediante ambos sistemas de mezclado, se observan en las figuras 6.51 y 6.52.

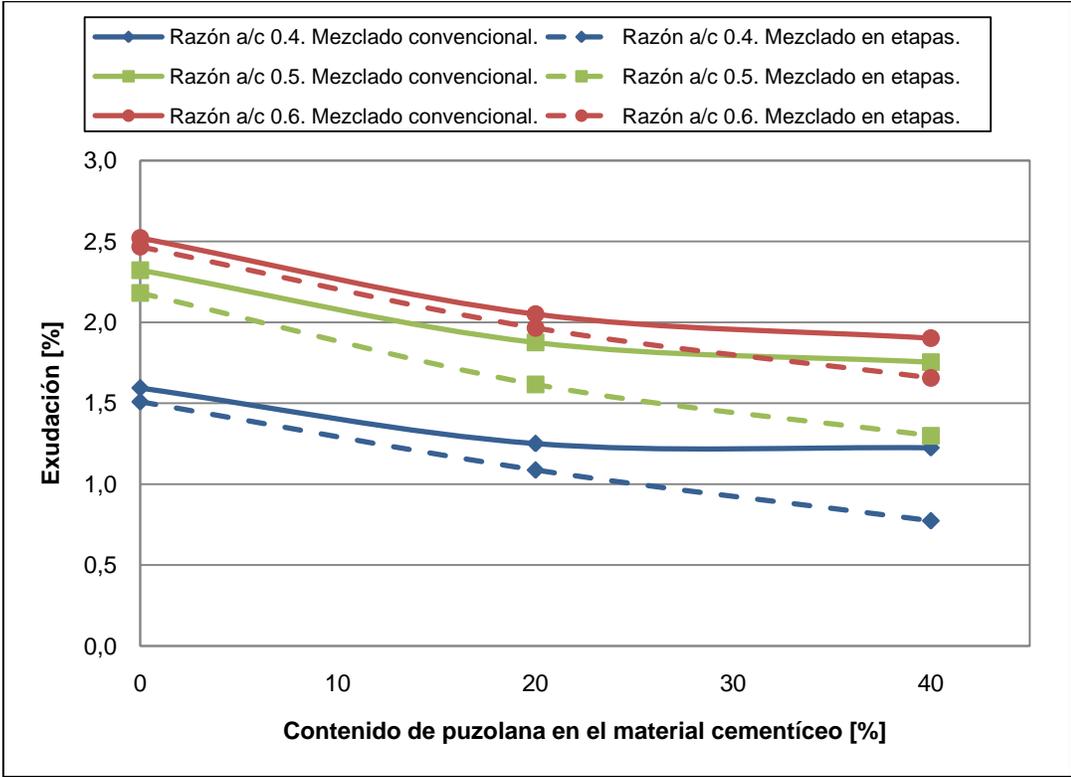


Figura 6.51: Curvas de exudación versus contenido de puzolana, para distintas razones agua/material cementíceo, para ambos sistemas de mezclado.

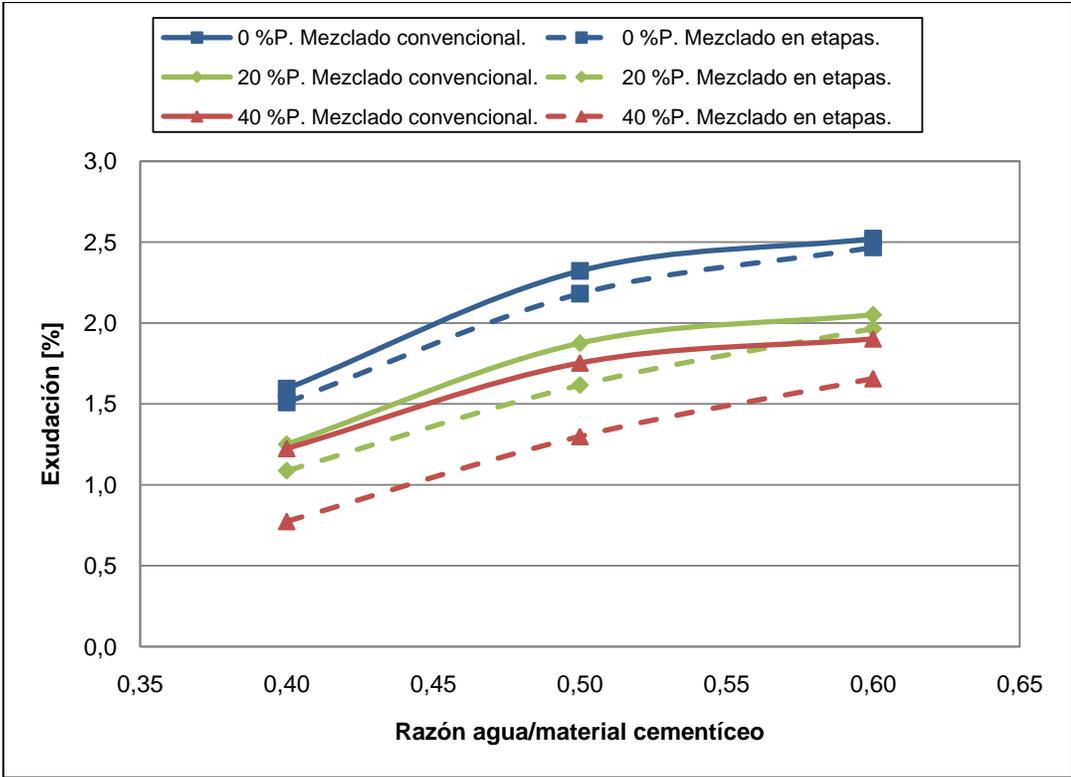


Figura 6.52: Curvas de exudación de hormigones versus razón agua/material cementíceo, al variar el porcentaje de puzolana, para ambos sistemas de mezclado.

Se observa en la figura 6.51 que la exudación de los hormigones fabricados en etapas es menor que la de los hormigones elaborados mediante mezclado convencional, para una cierta razón agua/material cementíceo. Esta reducción es muy baja cuando no hay adición de puzolana en el material cementíceo. A medida que esta aumenta, la diferencia de exudación entre un hormigón fabricado en etapas y otro elaborado mediante mezclado convencional es más amplia. Se aprecia además que esta distancia es mayor cuando el hormigón tiene menor razón agua/material cementíceo.

En la figura 6.52 se observa que para una adición de puzolana dada, la exudación que se da en las mezclas confeccionadas mediante mezclado convencional fue mayor que la que entregó el mezclado en etapas. Esta diferencia es más significativa cuando la adición es mayor.

A través de los resultados que se entregan en las tablas 5.4 y 5.10 se obtienen las curvas de las figuras 6.53, 6.54 y 6.55, donde se presenta la acumulación de exudación en el tiempo para las distintas razones agua/material cementíceo.

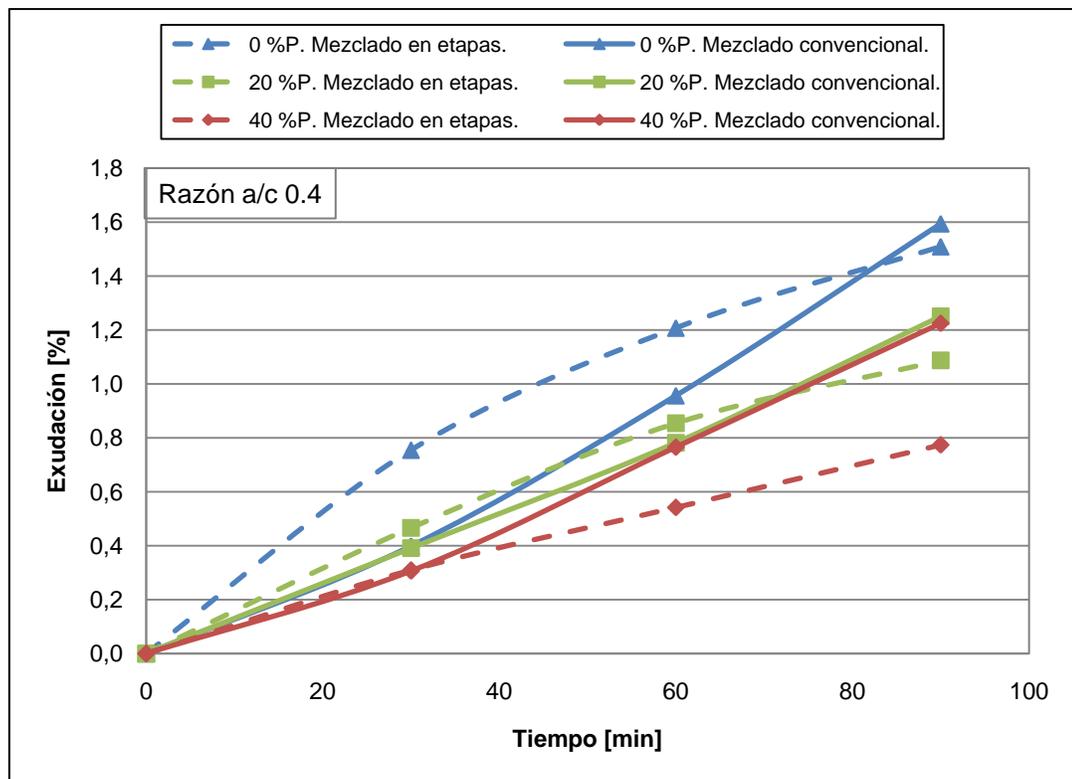


Figura 6.53: Curvas de exudación versus tiempo de hormigones de razón agua/material cementíceo 0.4 para diferentes porcentajes de puzolana, para ambos sistemas de mezclado.

Se aprecia en la figura 6.53 que las curvas de los hormigones elaborados mediante mezclado convencional, presentan una baja exudación en los primeros minutos, que luego se incrementa, superando los resultados obtenidos por los hormigones elaborados en etapas a los 90 minutos. Los hormigones elaborados mediante el procedimiento en etapas incrementan rápidamente su exudación al inicio del ensayo, para luego comenzar a estabilizar sus resultados.

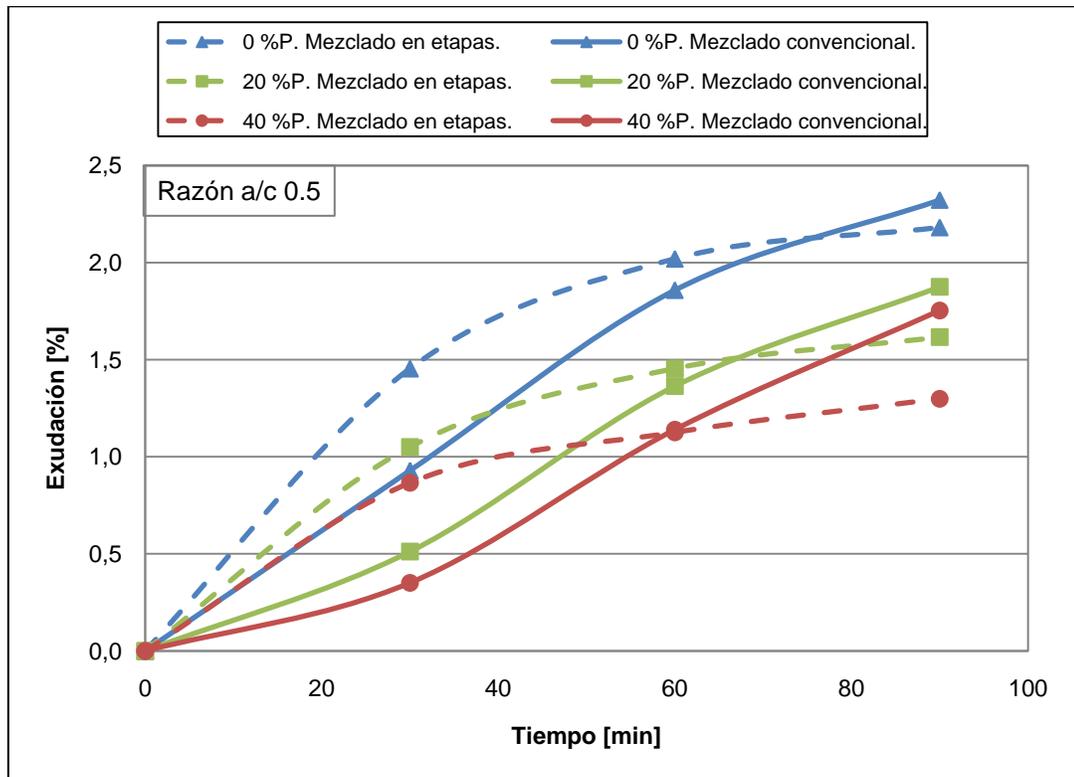


Figura 6.54: Curvas de exudación versus tiempo de hormigones de razón agua/material cementíceo 0.5 para diferentes porcentajes de puzolana, para ambos sistemas de mezclado.

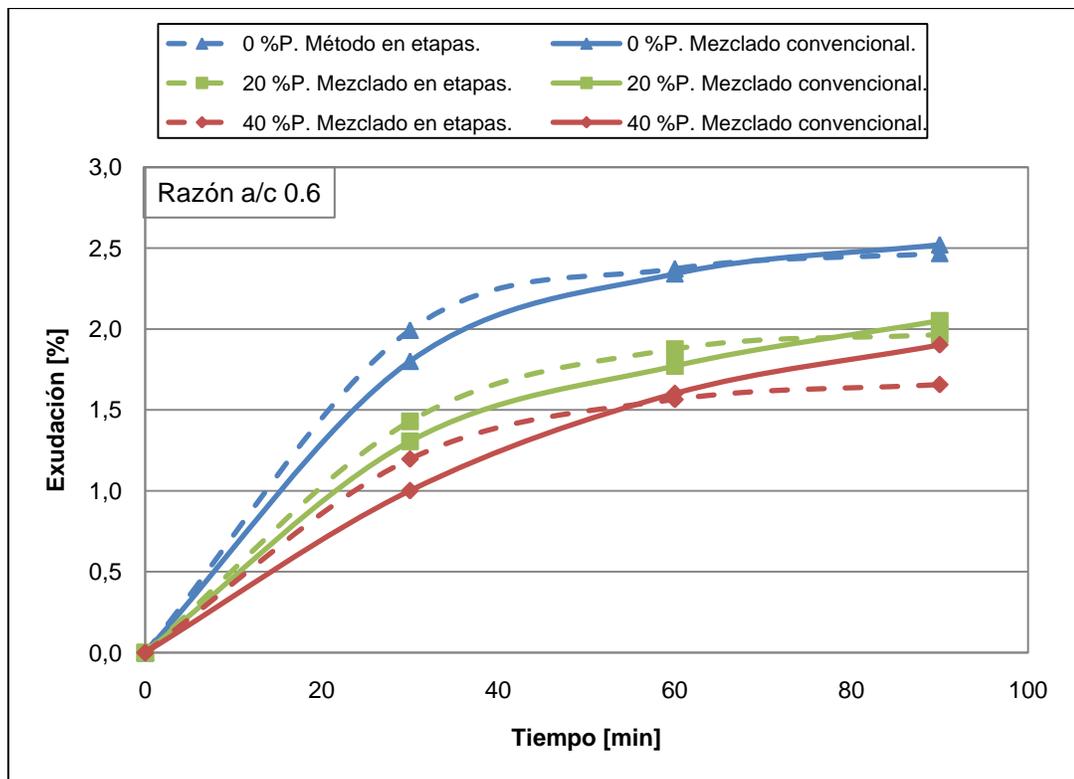


Figura 6.55: Curvas de exudación versus tiempo de hormigones de razón agua/material cementíceo 0.6 para diferentes porcentajes de puzolana, para ambos sistemas de mezclado.

En la figura 6.54 se observa el mismo comportamiento que se muestra en la figura 6.53, es decir, una mayor velocidad inicial de exudación en los hormigones mezclados en etapas. Se observa además, que la exudación total de los hormigones fabricados utilizando mezclado convencional es mayor que la obtenida por los hormigones elaborados mediante el mezclado en etapas.

Las curvas de exudación en el tiempo de los hormigones de razón agua/material cementíceo 0.6 presentan la misma tendencia para ambos sistemas de mezclado y para todos los contenidos de puzolana en el material cementicio estudiados. Se observa además, que inicialmente la exudación de los hormigones mezclados en etapas supera al resultado obtenido por los hormigones elaborados con mezclado convencional, lo que se invierte al llegar a los 90 minutos.

6.4.2 Propiedades del hormigón endurecido

6.4.2.1 Resistencia del mortero del hormigón

Con los resultados entregados por las tablas 5.5 y 5.12, que exhiben los resultados del ensayo a flexión y compresión de probetas RILEM de morteros extraídos por tamizado de los hormigones en estudio, se elaboraron las figuras comparativas 6.56, 6.57, 6.58 y 6.59.

Se observa en las curvas de las figuras 6.56 y 6.57, que las tendencias de las resistencias a la compresión de los morteros de los hormigones analizados son muy similares tanto para el análisis de variación de resistencia con el contenido de puzolana como para el de resistencia versus razón agua/material cementíceo.

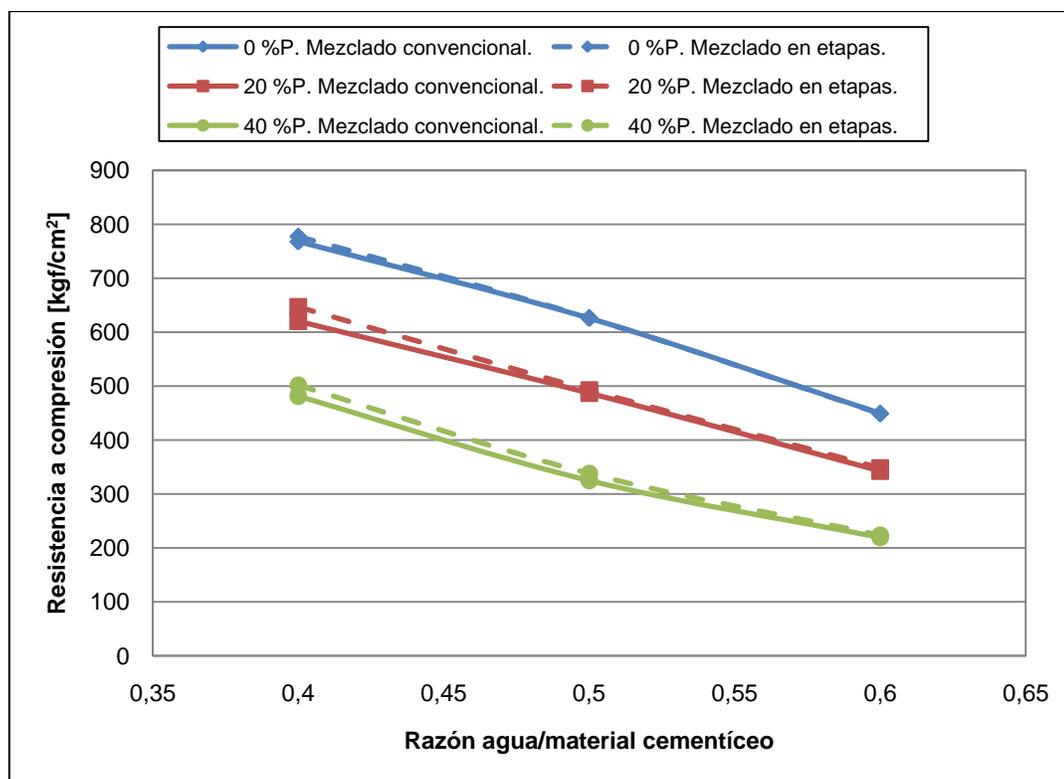


Figura 6.56: Resistencia a compresión a los 28 días de morteros correspondientes a los hormigones estudiados en función de su razón agua/material cementíceo.

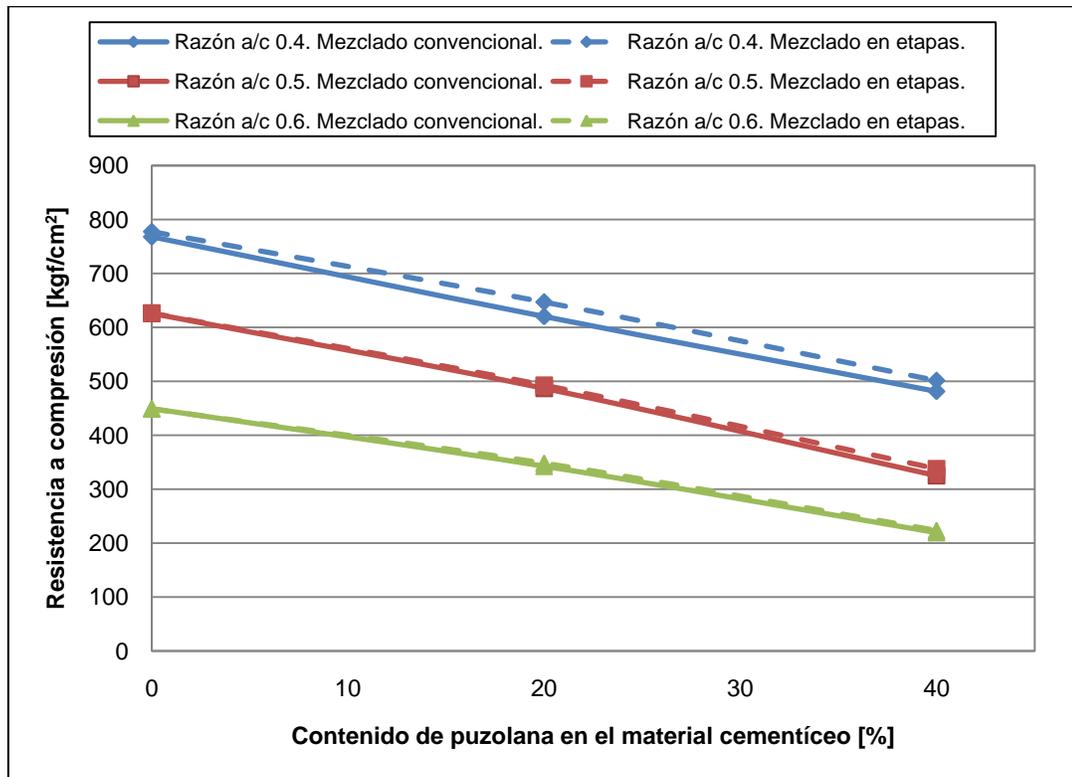


Figura 6.57: Resistencia a compresión a los 28 días de morteros correspondientes a los hormigones estudiados en función del contenido de puzolana en el material cementíceo.

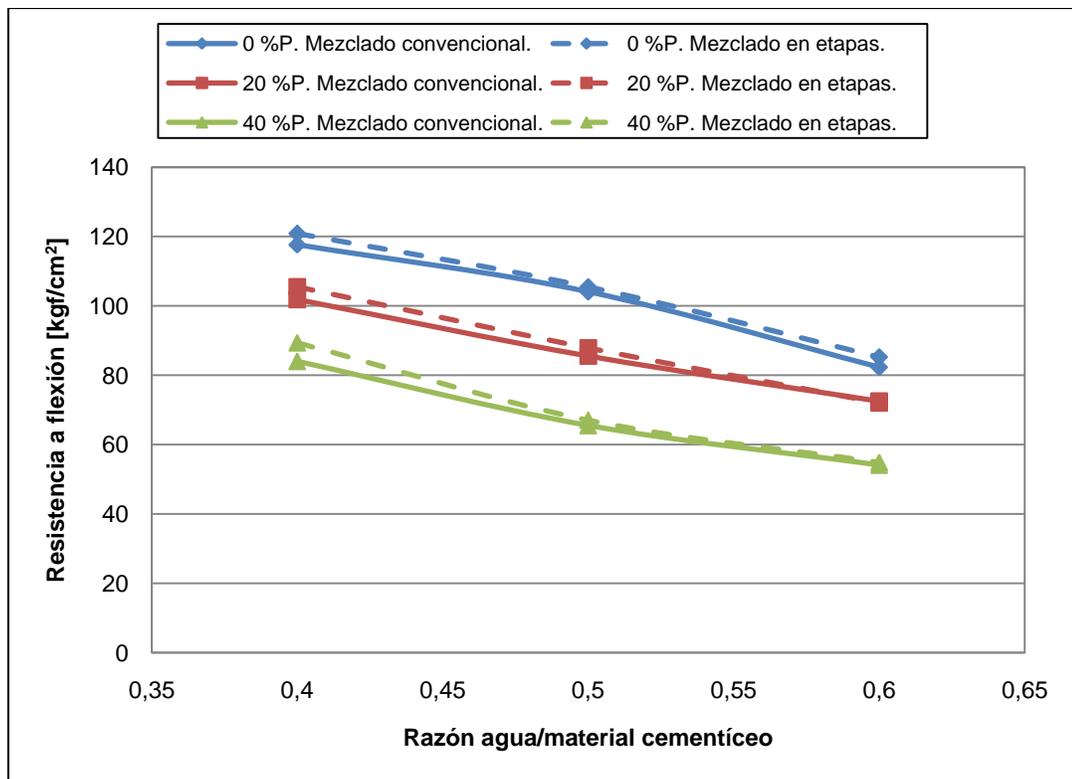


Figura 6.58: Resistencia a flexión a los 28 días de morteros correspondientes a los hormigones estudiados en función de su razón agua/material cementíceo.

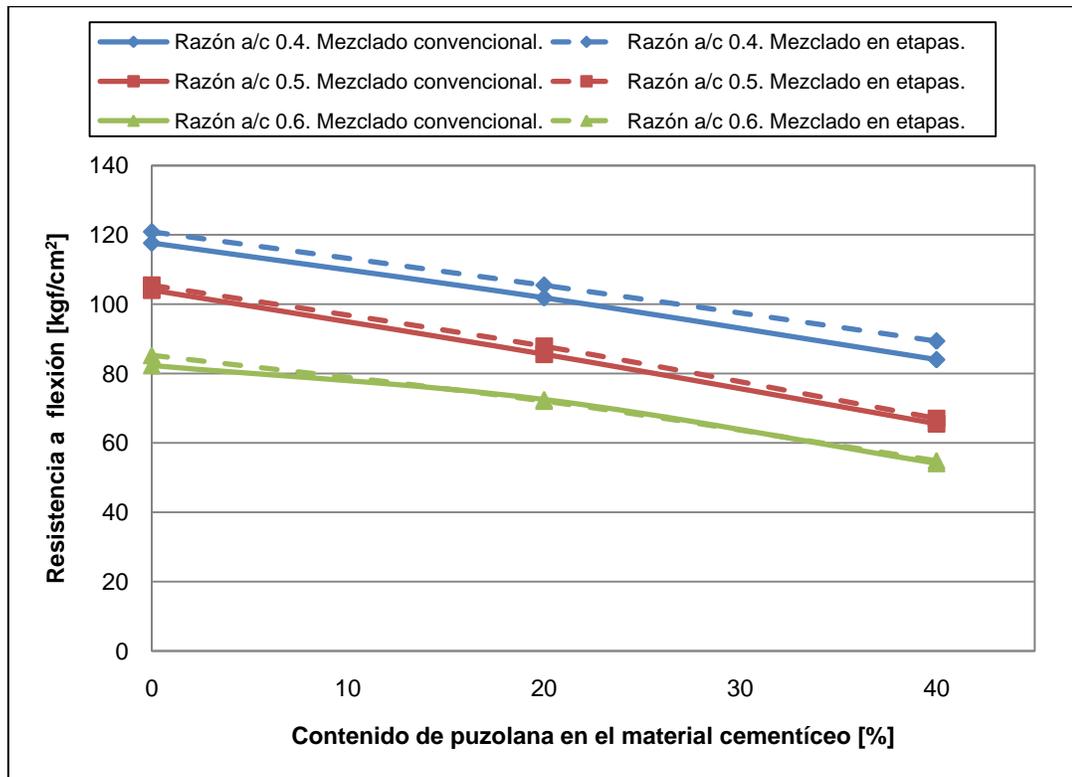


Figura 6.59: Resistencia a flexión a los 28 días de morteros correspondientes a los hormigones estudiados en función del contenido de puzolana en el material cementíceo.

En las figuras 6.58 y 6.59 se observa para la resistencia a la flexión, el mismo comportamiento que en el caso de la resistencia a la compresión de esos morteros. Las resistencias a la flexión varían linealmente con el contenido de puzolana, apreciándose una cierta tendencia a un mejor desempeño para el caso del mezclado en etapas, lo que es más significativo para la menor razón agua/material cementíceo.

6.4.2.2 Resistencia mecánica del hormigón

A partir de los resultados de resistencia a compresión de los hormigones estudiados, que aparecen en las tablas 5.6 y 5.13, en las figuras 6.60, 6.61 y 6.62 se grafican las curvas de resistencia a compresión versus razón agua/material cementíceo, para las distintas edades de ensayo, respectivamente.

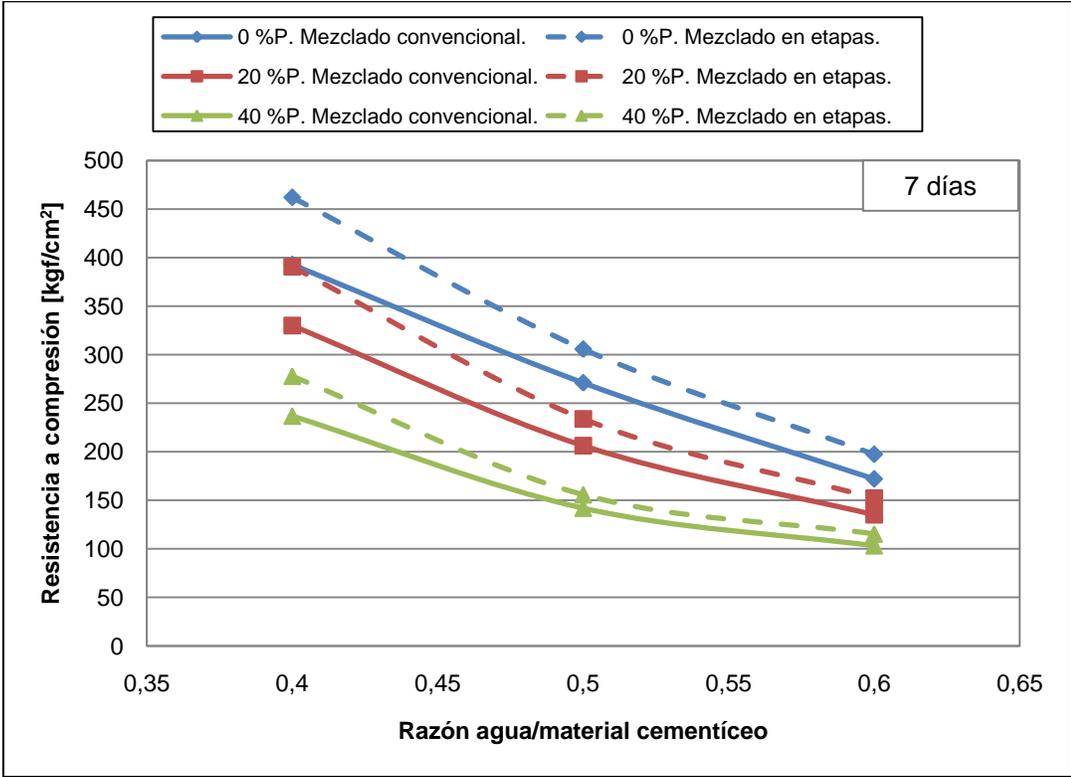


Figura 6.60: Curvas de resistencia a compresión a los 7 días en función de la razón agua/material cementíceo, para ambos sistemas de mezclado.

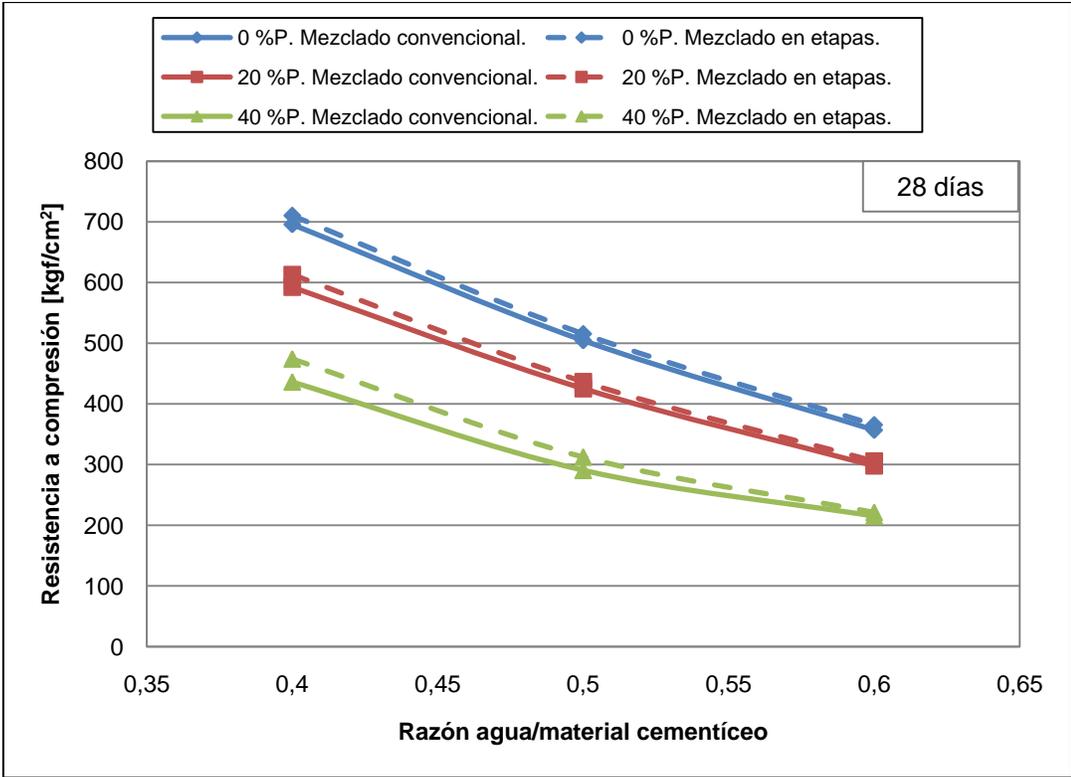


Figura 6.61: Curvas de resistencia a compresión a los 28 días en función de la razón agua/material cementíceo, para ambos sistemas de mezclado.

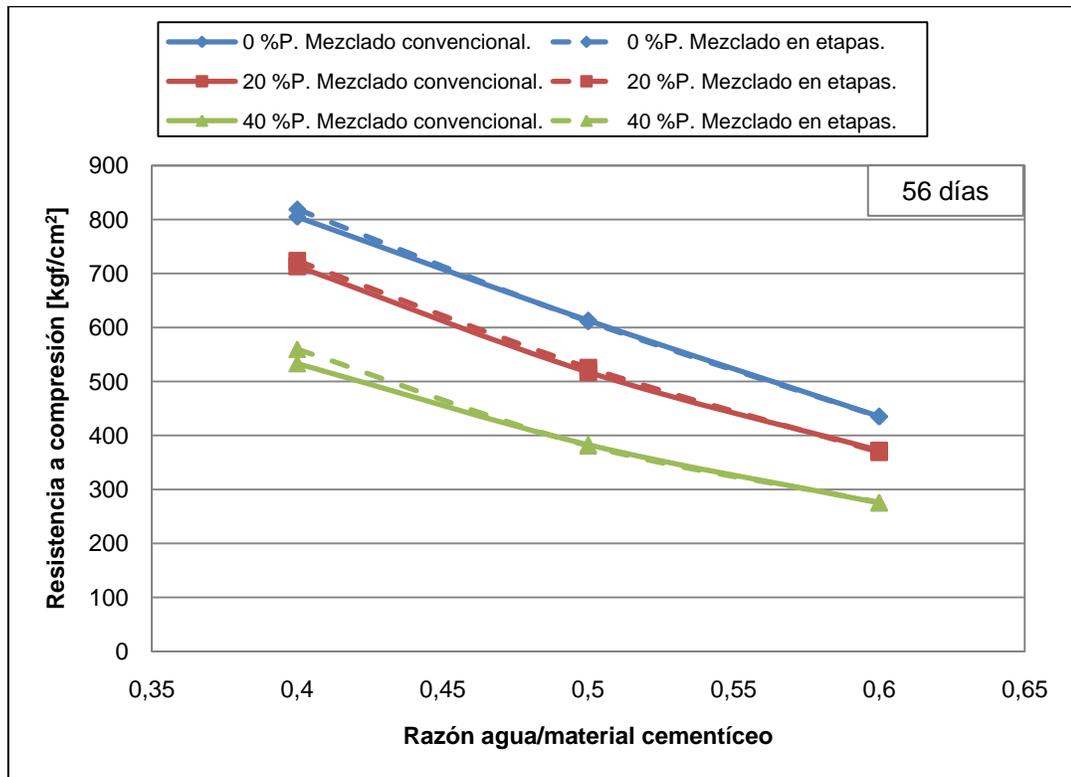


Figura 6.62: Curvas de resistencia a compresión a los 56 días en función de la razón agua/material cementíceo, para ambos sistemas de mezclado.

Al comparar el comportamiento mecánico de estos hormigones se observa, en primer lugar, que el efecto del procedimiento de mezclado resulta significativo, solamente, a edades tempranas, lo que indicaría que un procedimiento intensivo de mezclado produciría una mejor homogeneización de los componentes de la pasta cementante, lo que se traduciría en una mayor reactividad inicial del proceso de hidratación.

La diferencia entre las resistencias obtenidas mediante mezclado convencional y mezclado en etapas puede ser atribuida a:

- La mejor interacción de las partículas de material cementíceo con el agua, que al ser mezcladas previamente a alta velocidad, reduce el contenido de material cementante no hidratado, aumentando de esta forma el rendimiento del mismo.
- Mejor aprovechamiento de la puzolana, que se integra a los productos de hidratación y en la zona interfacial de los áridos, disminuirá el tamaño de los poros más eficientemente.
- El mejor recubrimiento de los áridos con pasta de mayor homogeneidad y uniformidad de espesor, disminuirá el espesor de la zona interfacial que debilita al hormigón en su resistencia mecánica.

Como se observa de la figura 5.61 y 5.62, a los 28 y 56 días la resistencia a compresión de los hormigones convencionales y mezclados en etapas tienen resistencias similares, siendo siempre mayores las de los hormigones mezclados en etapas, por lo que hay un distanciamiento con el comportamiento obtenido para los 7 días. Los procedimientos que se modificaron en el mezclado en etapas, permiten mejorar el comportamiento del hormigón a temprana edad debido a que una mejor hidratación acelerará la formación de las fases que entregan resistencia al hormigón y el completo recubrimiento de los áridos con pasta impide que cemento no hidratado se pegue a sus paredes, en desmedro de la completa hidratación de él.

A los 28 días de comenzado el proceso de hidratación de las partículas de material cementíceo, ésta se encuentra estabilizada, independientemente del mezclado que haya tenido el hormigón, por lo que las resistencias obtenidas serán comparables. En este caso, el mezclado en etapas siempre tiene mayor resistencia que el hormigón elaborado mediante mezclado convencional, lo que puede responder a una completa hidratación del cemento Pórtland y a un mejor aprovechamiento de la puzolana.

La mantención de condiciones de curado óptimas (curado en agua) para todas las probetas, hasta el momento de su ensayo, harían posible que los hormigones elaborados según procedimiento convencional alcancen resistencias similares a las obtenidas con el mezclado en etapas, a edades mayores.

A continuación se presentan las curvas de crecimiento de resistencia en el tiempo para las distintas razones agua/material cementíceo estudiadas, en las figuras 6.63, 6.64 y 6.65.

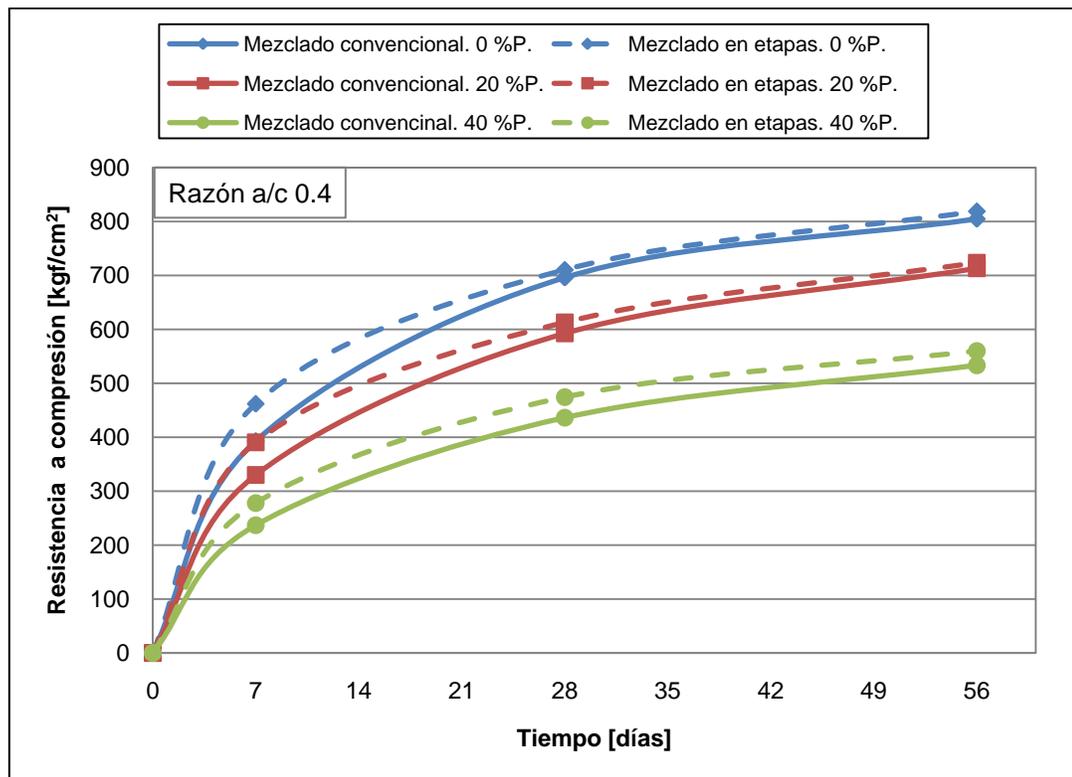


Figura 6.63: Curvas de resistencia a compresión función del tiempo, para la razón agua/material cementíceo 0.4 y ambos sistemas de mezclado.

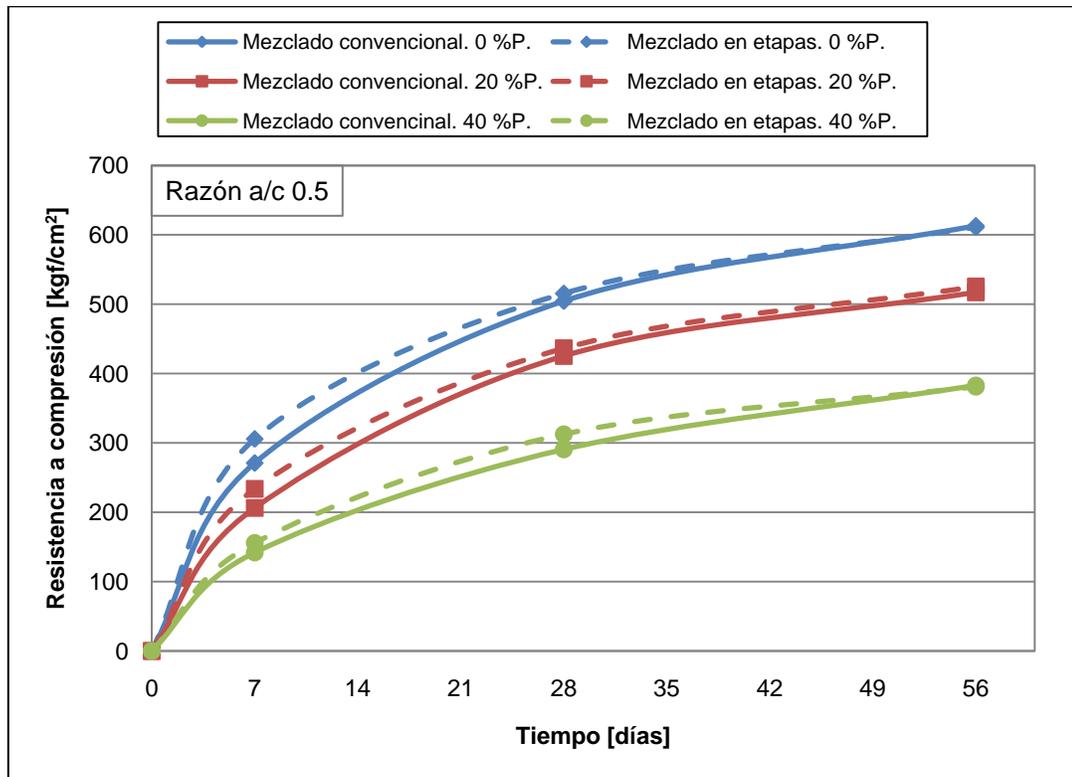


Figura 6.64: Curvas de resistencia a compresión función del tiempo, para la razón agua/material cementíceo 0.5 y ambos sistemas de mezclado.

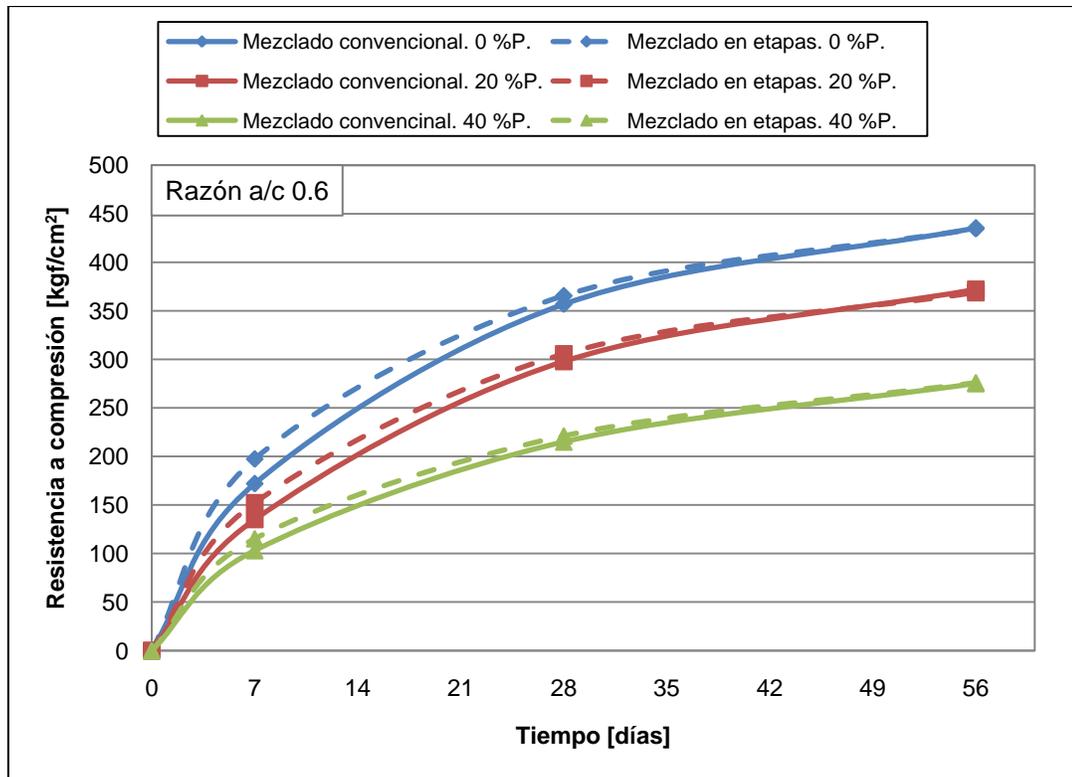


Figura 6.65: Curvas de resistencia a compresión función del tiempo, para la razón agua/material cementíceo 0.6 y ambos sistemas de mezclado.

Se observa en las figuras 6.63, 6.64 y 6.65, que el mezclado en etapas permite obtener mayores resistencias significativas sólo temprana edad.

Normalmente, la curva de resistencia en el tiempo de los hormigones elaborados mediante el mezclado convencional tiende a estabilizarse luego de los 28 días. El comportamiento ascendente de la resistencia a largo plazo, que muestran los hormigones elaborados en este estudio, se podría deber al efectivo curado que se le dio a las probetas de los distintos hormigones, el que le permite lograr mayores resistencias debido a una más completa hidratación de la puzolana y el cemento Pórtland.

Por este motivo, al cumplirse 56 días de elaborado el hormigón, las resistencias de los confeccionados mediante mezclado convencional y mezclado en etapas son comparables, pues el beneficio en aumento de resistencia en el corto plazo que entrega el mezclado en etapas se ve equiparado con las ganancias de resistencia que entrega el curado en los hormigones fabricados mediante mezclado convencional. De esta forma, se puede estimar que si las condiciones de curado no hubiesen sido tan favorables para la hidratación de los materiales cementíceos de los hormigones fabricados con mezclado convencional, la diferencia de resistencia existente entre los hormigones elaborados con uno u otro método a los 28 días, debería mantenerse en el tiempo.

Además, se observa que las curvas de mezclado convencional y en etapas correspondientes a la razón agua/material cementíceo 0.4, para cada contenido de puzolana, mantienen una diferencia de resistencia en el tiempo. Este comportamiento se produciría debido a que si bien el curado mejoraría las condiciones de hidratación de los materiales cementíceos del hormigón, las probetas mas impermeables, como son las de menor razón agua/material cementíceo, se verían menos afectadas por este proceso.

En la tabla 6.10 se presentan las ganancias porcentuales de resistencia que tienen los hormigones mezclados en etapas respecto a las obtenidas por los hormigones elaborados mediante mezclado convencional.

Tabla 6.10: Ganancia de resistencia por uso de mezclados en etapas en vez de mezclado convencional.

Serie	Ganancia de resistencia a compresión [%]		
	7 días	28 días	56 días
0.4 - 0 %P	18	2	<2
0.4 - 20 %P	18	4	<2
0.4 - 40 %P	17	9	5
0.5 - 0 %P	13	2	0
0.5 - 20 %P	13	3	<2
0.5 - 40 %P	10	8	0
0.6 - 0 %P	15	2	0
0.6 - 20 %P	13	3	0
0.6 - 40 %P	12	3	0

Analizando los valores entregados en la tabla 6.7 se concluye que la ganancia de resistencia que se produce por efecto del mezclado en etapas a los 28 y 56 días no es significativa. Este comportamiento sería explicable por el efecto del curado intensivo bajo agua aplicado a todos los hormigones y que logra activar la formación de productos de hidratación a partir de la puzolana.

6.5 Efecto de la temperatura de los áridos

6.5.1 Propiedades del hormigón fresco

6.5.1.1 Asentamiento de cono

Los resultados presentados en las tablas 5.7 y 5.15 permiten comparar los resultados de asentamiento de cono de hormigones fabricados mediante mezclado en etapas con áridos a temperatura normal y a altas temperaturas. La figura 6.66 presenta los datos antes mencionados.

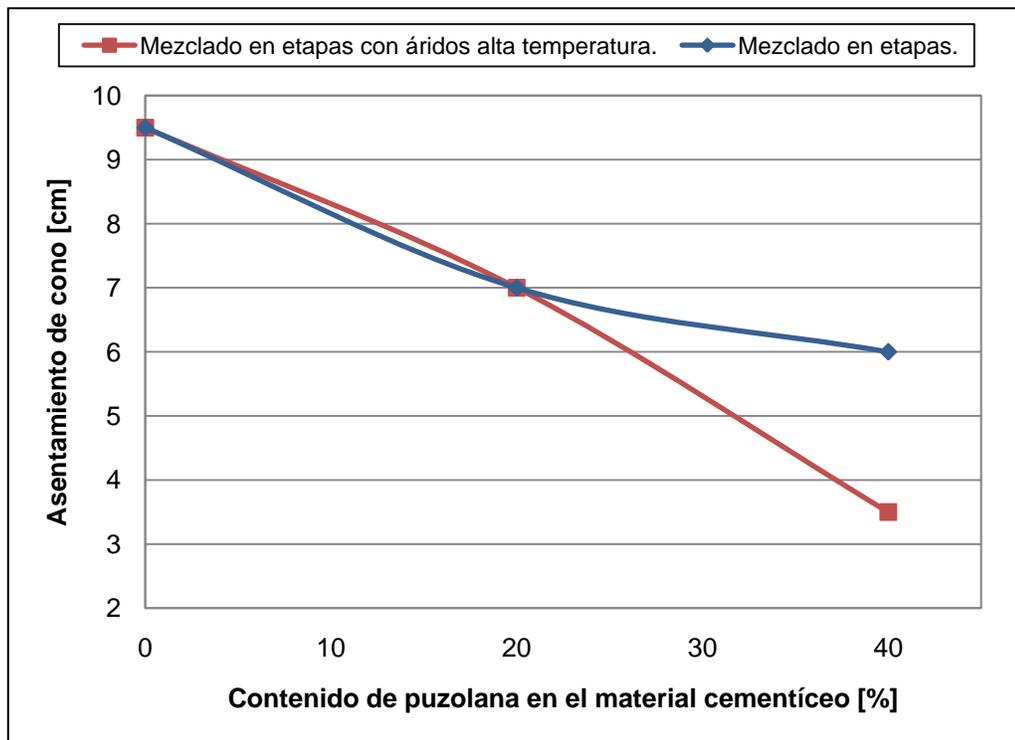


Figura 6.66: Variación del asentamiento de cono en función del contenido de puzolana, en hormigones elaborados con áridos a distinta temperatura.

Se observa en la figura 6.66 que el hormigón fabricado con áridos a altas temperaturas presenta igual asentamiento de cono que el hormigón fabricado en etapas con los áridos a temperatura normal cuando el porcentaje de puzolana es 0 y 20 %, no así cuando la adición es de un 40 %, ya que el cono disminuye en 2.5 [cm].

6.5.1.2 Densidad

Con los resultados del ensayo de densidad realizado a los hormigones de razón agua/material cementíceo 0.5 con áridos a altas temperaturas, que se entregan en las tablas 5.8 y 5.16, se elaboran las curvas de la figura 6.67.

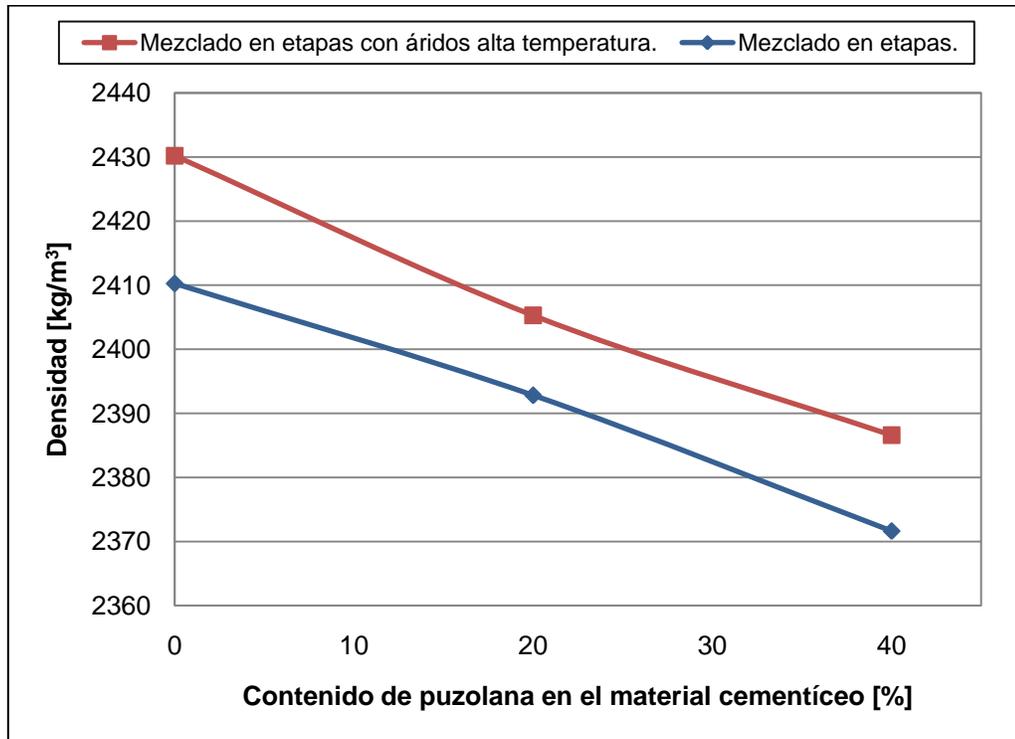


Figura 6.67: Variación de la densidad en función del contenido de puzolana, en hormigones elaborados con áridos a distinta temperatura.

Se observa en la figura 6.67 que la densidad de los hormigones elaborados mediante mezclado en etapas con áridos a temperatura normal es menor que la densidad que muestran los mismos hormigones elaborados mediante mezclado en etapas con áridos a temperaturas normales, lo que podría deberse a que una mayor temperatura acelera las reacciones de hidratación del material cementíceo lo que acopla las partículas permitiéndoles ocupar menos espacio en un determinado volumen.

6.5.1.3 Contenido de aire

En la figura 6.68 se presentan las curvas de comportamiento del contenido de aire del hormigón, cuando este es elaborado con áridos a diferentes temperaturas.

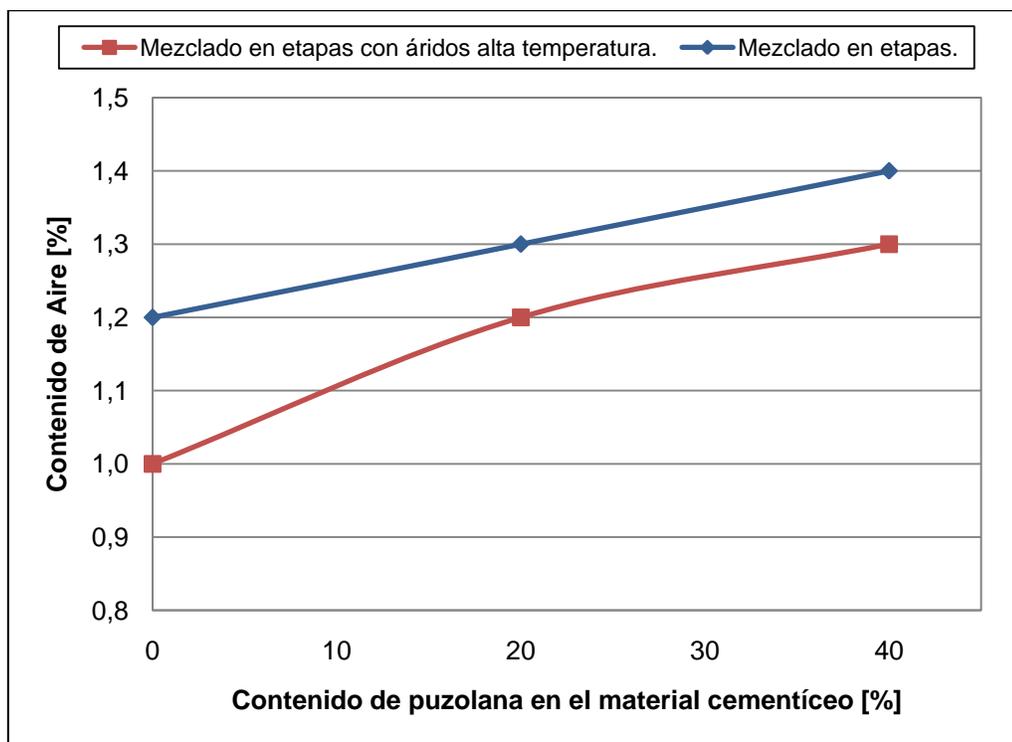


Figura 6.68: Variación del contenido de aire en función del contenido de puzolana, en hormigones elaborados con áridos a distinta temperatura.

El mayor contenido de aire lo presentan, en la figura 6.68, los hormigones mezclados en etapas. El aumento de aire atrapado que se observa en el hormigón elaborado con mezclado en etapas con áridos calientes cuando el porcentaje de puzolana en material cementíceo es 20 % es consecuente con la disminución de densidad que presenta el mismo hormigón, observable en la figura 6.67.

6.5.1.4 Densidad de pasta

Los resultados del ensayo de densidad de pasta realizado a la mezcla luego de la primera etapa de la fabricación de los hormigones, se muestran en la figura 6.69.

La densidad de la pasta confeccionada para cada hormigón elaborado mediante mezclado en etapas, no se ve afectada por la temperatura de los áridos, por lo que los resultados se diferencian por la humedad libre de los áridos, que varía la dosificación de la pasta.

Dado que los áridos a altas temperaturas no presentan humedad libre por procedimiento de ensayo, las pastas elaboradas para hormigones con áridos a temperatura normal tendrán menor contenido de agua, lo que le significa una mayor densidad, como se aprecia en la figura 6.69.

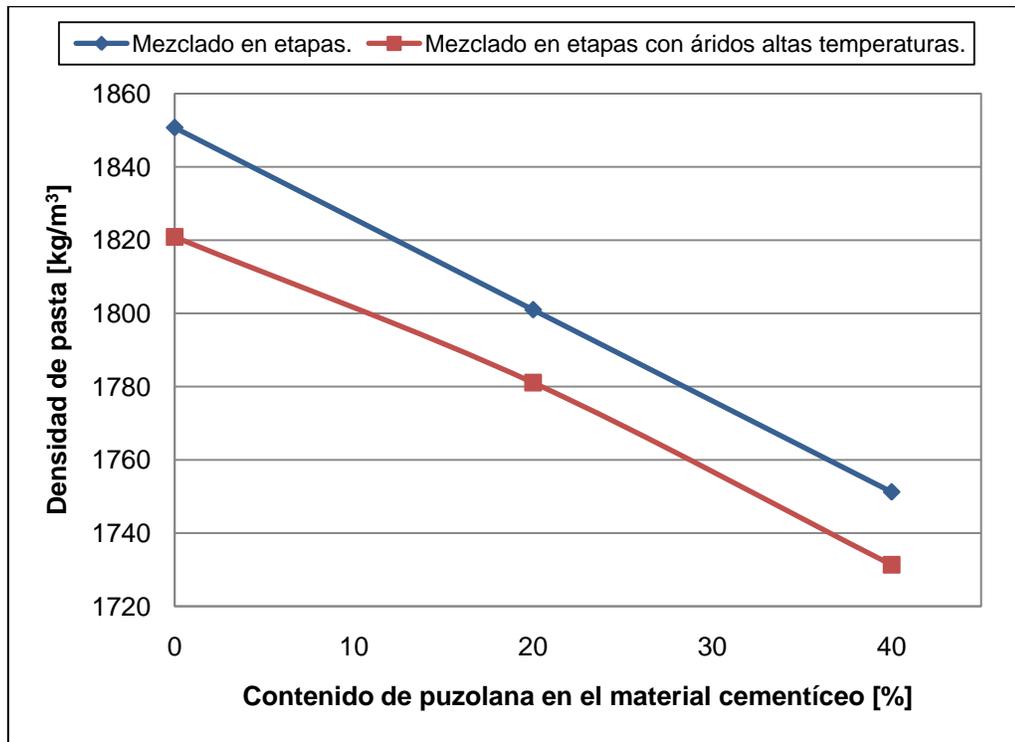


Figura 6.69: Variación de la densidad de pasta en función del contenido de puzolana, en hormigones elaborados con áridos a distinta temperatura.

6.5.2 Propiedades del hormigón endurecido

6.5.2.1 Resistencia mecánica del hormigón

A continuación se analiza el comportamiento de la resistencia mecánicas del hormigón frente al aumento de temperatura de los áridos, cuando se realiza un mezclado en etapas al hormigón, para todas las edades. Las figuras comparativas son la 6.70, 6.71 y 6.72.

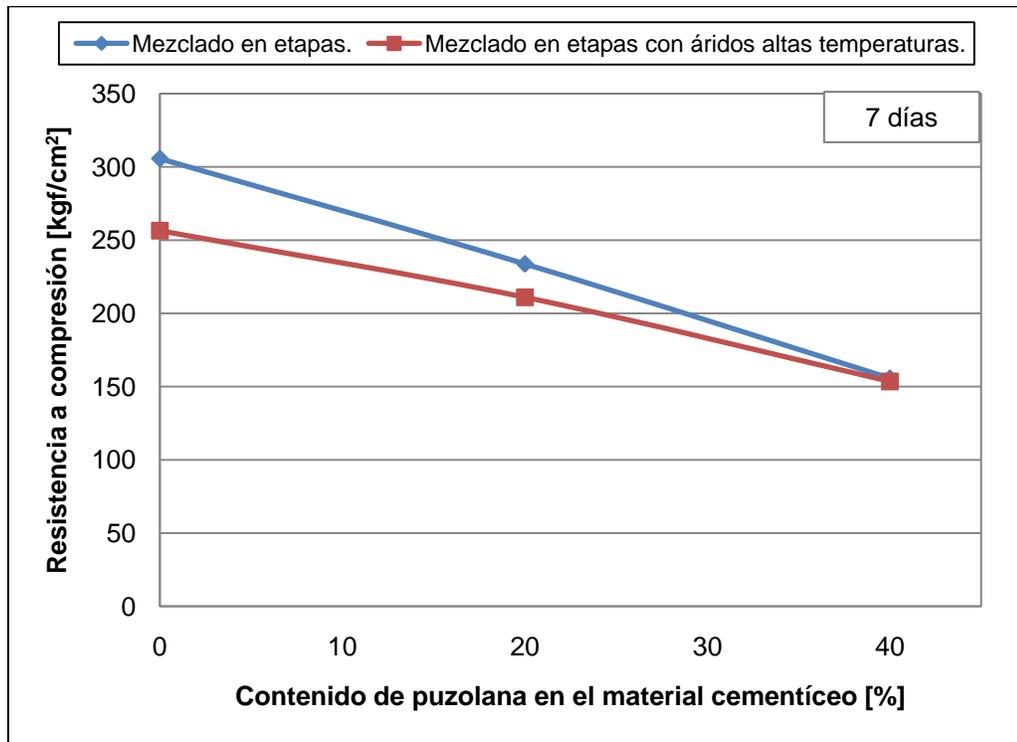


Figura 6.70: Curvas de resistencia a compresión a los 7 días versus contenido de puzolana en el material cementíceo, en hormigones elaborados con áridos a distinta temperatura.

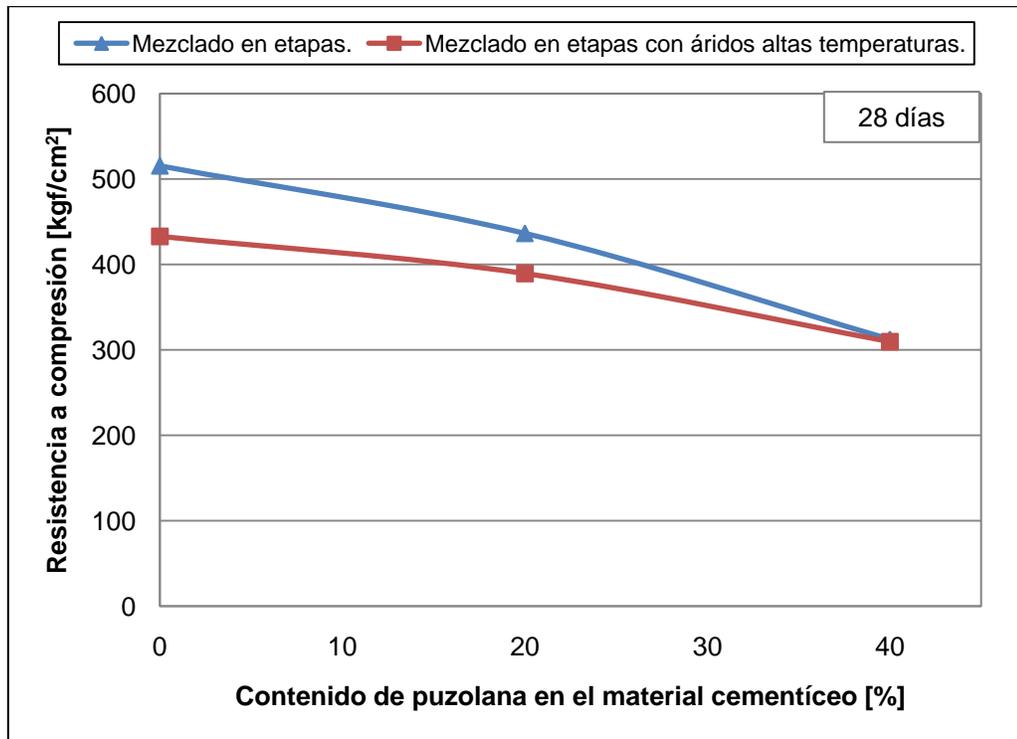


Figura 6.71: Curvas de resistencia a compresión a los 28 días versus contenido de puzolana en el material cementíceo, en hormigones elaborados con áridos a distinta temperatura.

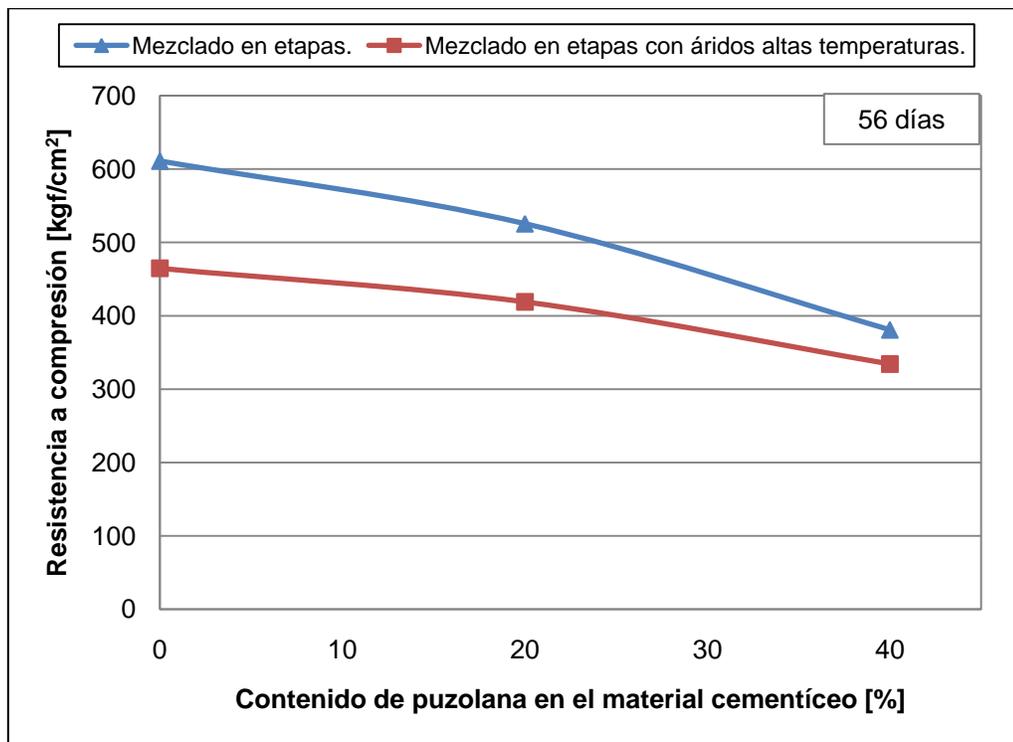


Figura 6.72: Curvas de resistencia a compresión a los 56 días versus contenido de puzolana en el material cementíceo, en hormigones elaborados con áridos a distinta temperatura.

Se observa en la figura 6.70 que la resistencia de los hormigones fabricados mediante mezclado en etapas con áridos a altas temperaturas es siempre menor que la resistencia de los hormigones mezclados en etapas a temperaturas normales. Esta variación disminuye al aumentar el contenido de adición puzolánica, siendo casi nula al llegar al 40 % de adición. Cuando se tiene sólo cemento Pórtland en la mezcla, la temperatura acelera la hidratación alrededor de los áridos, aumentando el espesor la zona interfacial que corresponde a una zona más débil. Cuando existe material puzolánico en la mezcla, éste actúa hidratándose en un proceso posterior que produce CSH, producto que agrega resistencia al hormigón, tiene menor tamaño y participa en la disminución del tamaño de poro en la zona interfacial, lo que se contrapone al efecto de la temperatura de los áridos en la zona interfacial.

Se observa en la figura 6.71, que a los 28 días las resistencias de los hormigones fabricados mediante mezclado en etapas con áridos a altas temperaturas resultaron menores que las resistencias de los hormigones mezclados en etapas a temperaturas normales y existe un favorable efecto al aumentar el contenido de puzolana en el material cementíceo que reduce la pérdida de resistencia por deterioro de la zona interfacial. Al llegar a una adición de 40 % de puzolana las resistencias son similares.

Se observa en la figura 6.72, que a los 56 días, la resistencia a la compresión de los hormigones elaborados con áridos a altas temperaturas mediante mezclado en etapas es siempre menor que la que presentan los hormigones elaborados mediante mezclado en etapas.

Comparando los gráficos 6.70, 6.71 y 6.72, se observa que a los 7 días, las resistencias de los hormigones elaborados en etapas y en etapas con áridos a altas temperaturas son comparables, no así a edades mayores, cuando las resistencias de los hormigones elaborados con áridos calientes van siendo menores.

A continuación se presentan las curvas de crecimiento de resistencia en el tiempo para los distintos contenidos de puzolana en el material cementíceo, en hormigones elaborados con áridos a distinta temperatura.

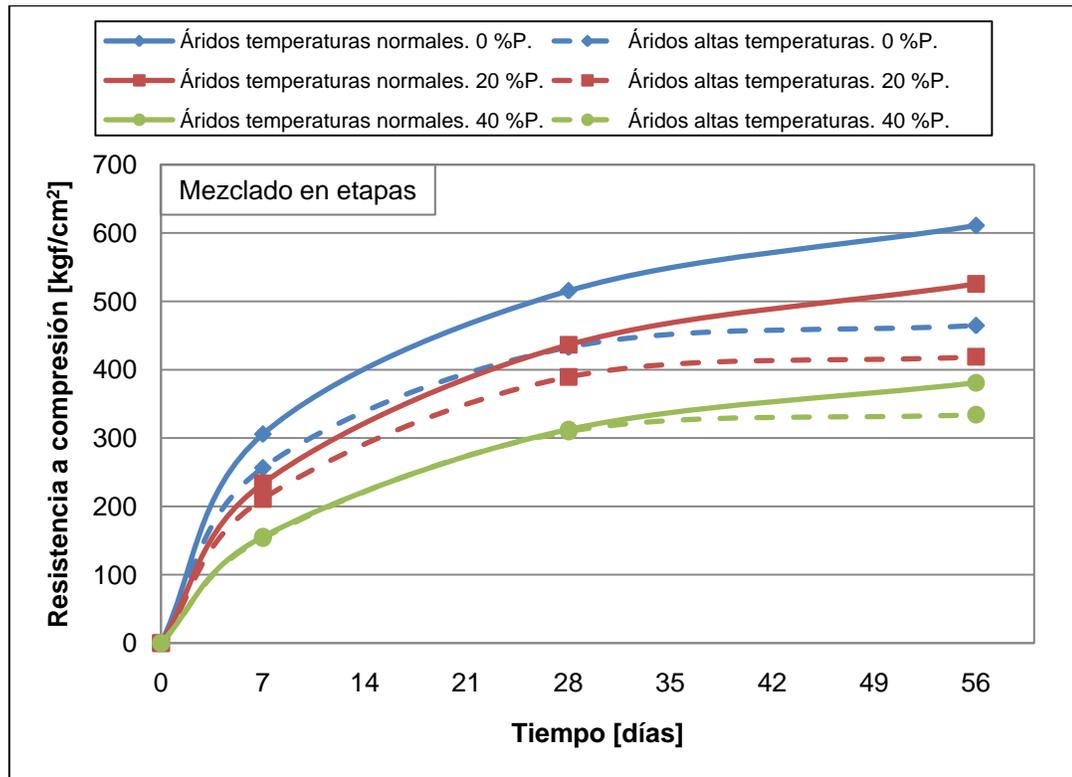


Figura 6.73: Curvas de resistencia a compresión función del tiempo, para áridos utilizados a distintas temperaturas.

El crecimiento de las resistencias que presentaron los hormigones fabricados con áridos a temperatura normal fue muy superior al que tuvieron los hormigones elaborados con áridos a altas temperaturas, lo que dejó a su curva por debajo de las demás, para todos los contenidos de puzolana en el material cementíceo utilizados. Esto podría deberse a que la temperatura de los áridos y el mezclado en etapas realizado aceleró los procesos de hidratación tanto del cemento Pórtland como de la puzolana en el corto plazo, impidiendo que el tiempo de curado sirviera para aumentar las resistencias a largo plazo.

Se observa en la figura 6.73, que las mayores diferencias entre las resistencias dadas por el hormigón elaborado con árido a altas temperaturas y el elaborado con temperaturas normales se dan cuando hay menor contenido de adición puzolánica en el material cementicio, lo que se podría atribuir a que el aumento de temperatura hace más eficaz el uso de la puzolana en el material cementicio debido a la aceleración de la hidratación de los cementantes.

Es importante notar que si bien la temperatura de los áridos podría aumentar el espesor de la zona interfacial del hormigón, eso no significa directamente que su resistencia a la compresión será menor. Esto debido a que no es posible conocer el estado de fisuración que provocan estas temperaturas en la zona interfacial.

Normalmente, el aumento de temperatura de la pasta que se produce por las reacciones de hidratación del cemento Pórtland y de la puzolana provoca microfisuras de tracción en la zona de contacto de la pasta con el árido. En este caso, la mayor temperatura la tiene el árido, por lo que la pasta se vería afectada por tensiones compresivas o de tracción dependiendo de cómo se disipan estas temperaturas y de la resistencia de la pasta a estos esfuerzos.

6.6 Rendimiento de la puzolana en el material cementíceo al mezclar en etapas

Actualmente, los mayores costos del cemento, tanto ambientales como económicos vienen dados por los procesos de elaboración y molienda del clínker. El uso de materiales puzolánicos ha servido para disminuir estos costos debido a su menor dureza y asequible adquisición, entregándole a los hormigones fabricados con cementos Pórtland puzolánicos y puzolánicos propiedades que mejoran su durabilidad, pero a costa de un menor desarrollo de resistencia a temprana edad, dependiendo de su calidad y de la proporción en el material cementíceo que se utilice.

El mezclado en etapas entrega resistencias mayores en hormigones con distinto porcentaje de adición puzolánica para todas las razones agua/material cementíceo analizadas, como se observa en las figuras 6.74, 6.75 y 6.76, donde se comparan las resistencias a 7 y 28 días de los hormigones de razones agua/material cementíceo 0.4, 0.5 y 0.6, para distintos porcentajes de puzolana.

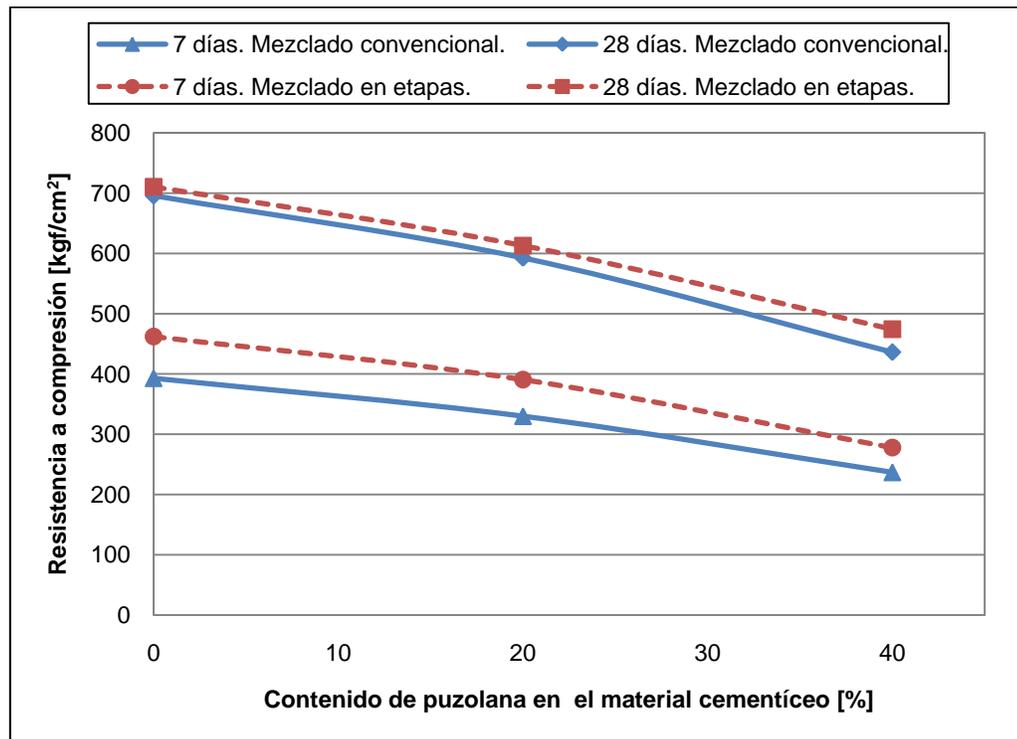


Figura 6.74: Curvas de resistencia a compresión a los 7 y 28 días para hormigones de razón agua/material cementíceo 0.4 en función del contenido de puzolana y para los distintos métodos de mezclado.

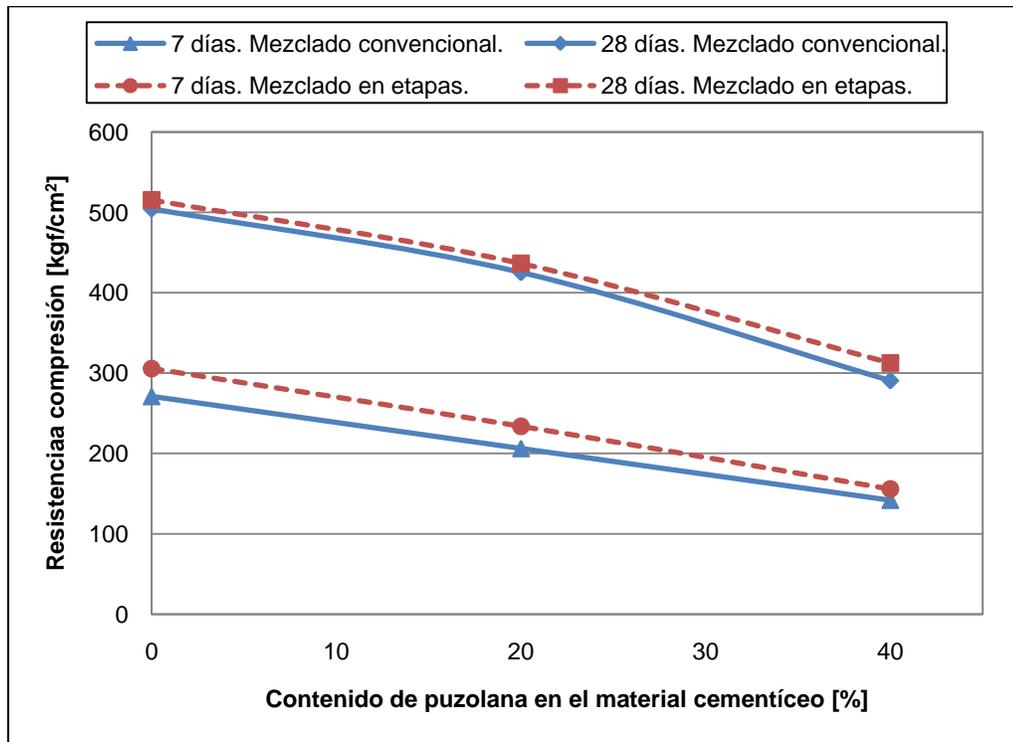


Figura 6.75: Curvas de resistencia a compresión a los 7 y 28 días para hormigones de razón agua/material cementíceo 0.5 en función del contenido de puzolana y para los distintos métodos de mezclado.

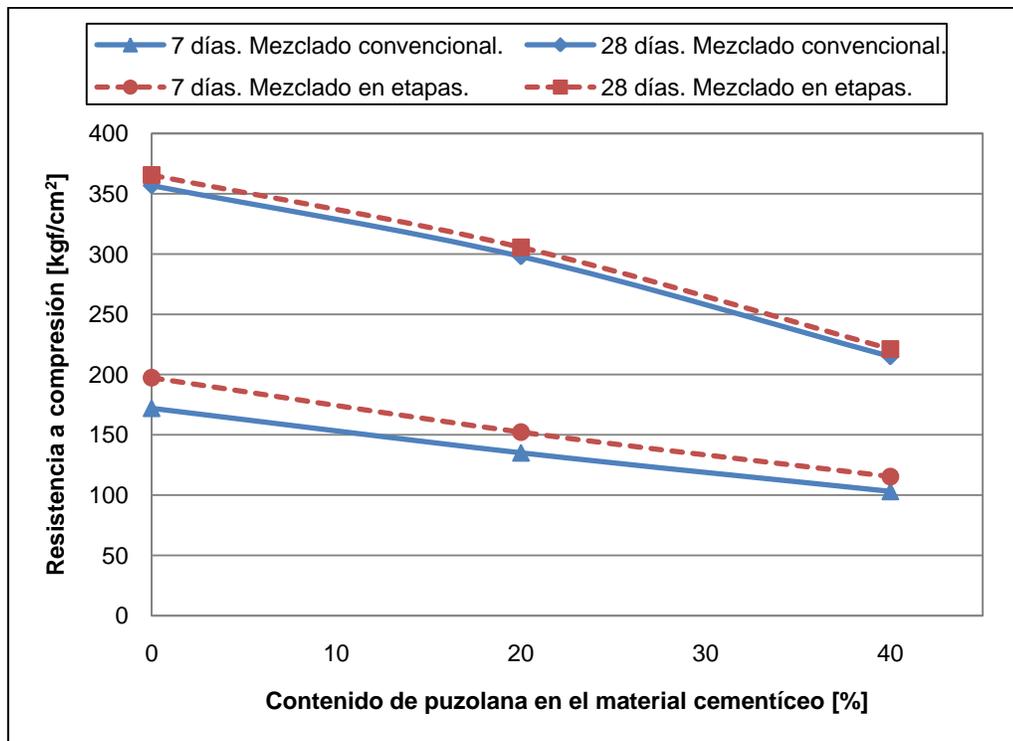


Figura 6.76: Curvas de resistencia a compresión a los 7 y 28 días para hormigones de razón agua/material cementíceo 0.6 en función del contenido de puzolana y para los distintos métodos de mezclado.

Como se observa, un nivel de resistencia dado puede ser alcanzado utilizando distintas proporciones de puzolana dependiendo del método de mezclado utilizado. Aceptando que actualmente, existe la tendencia a no considerar válida la alternativa de utilización de cemento Pórtland sin adiciones para la elaboración de hormigones, y tomando en cuenta los resultados de esta investigación, se aprecia como ventajosa la utilización de métodos de mezclado en etapas para facilitar la homogenización del material cementíceo y favorecer su hidratación.

6.6.1 Razón agua/material cementíceo 0.4

Considerando que las curvas de la figura 6.74 tienen una línea de tendencia cuadrática, las ecuaciones de las curvas permiten conocer la puzolana necesaria para obtener cierta resistencia a los 28 días, para de esta forma obtener el ahorro de cemento Pórtland que se produce por el uso del mezclado en etapas.

En el caso de la razón agua/material cementíceo 0.4, las curvas obedecen a las siguientes ecuaciones:

Mezclado convencional	$R = -0.0002589 \cdot P^2 + 0.13 \cdot P + 30$
Mezclado en etapas	$R = -0.0002530 \cdot P^2 + 0.14 \cdot P + 33$

donde R : Resistencia a compresión objetivo a los 28 días [kgf/cm²]

P : Porcentaje de puzolana natural admisible [%]

Para una resistencia objetivo R_{28}^* , utilizando mezclado en etapas, es posible emplear mayor contenido de puzolana natural en el material cementíceo, como se observa en la tabla 6.11.

Tabla 6.11: Contenido de puzolana admisible según procedimiento de mezclado para distintos niveles de resistencia a compresión a 28 días.

R_{28}^* [kgf/cm ²]	Puzolana admisible Mezclado en etapas [%]	Puzolana admisible Mezclado convencional [%]	Diferencia [%]
500	37.0	33.3	3.7
450	42.5	38.7	3.7
400	46.6	42.9	3.7
350	49.4	45.7	3.7
300	51.0	47.3	3.6

Esta diferencia se traduce en un ahorro de cemento Pórtland debido a que es posible de sustituir por puzolana cuando el hormigón se fabrica mediante mezclado en etapas. Este valor porcentual puede ser llevado a una cantidad de cemento Pórtland ahorrado si se considera la dosis de pasta utilizada en un hormigón y a un aumento sustantivo en las resistencias a 7 días.

Calcularemos la resistencia estimada a los 7 días de un hormigón con los contenidos de puzolana admisibles de la tabla 6.11 y se entregará el beneficio en la resistencia entregado por este porcentaje de puzolana al mezclar el hormigón en etapas.

Los modelos que se ajustan a las curvas de resistencia a los 7 días para la relación agua/material cementíceo 0.4 son:

Mezclado convencional	$R = -0.03773 \cdot P^2 - 2.39 \cdot P + 393$
Mezclado en etapas	$R = -0.05154 \cdot P^2 - 2.54 \cdot P + 462$

Con estas relaciones se tiene que el aumento de resistencia a los 7 días obtenido por el aumento de puzolana en el material cementíceo se presenta en la tabla 6.12.

Tabla 6.12: Comparación de resistencia a los 7 días para los distintos métodos de mezclado, para contenidos de puzolana que permiten una resistencia objetivo a los 28 días con el mezclado en etapas.

R ₂₈ * [kgf/cm ²]	Puzolana [%] Mezclado en etapas	Resistencia a los 7 días [kgf/cm ²]		Aumento de resistencia [kgf/cm ²]
		Mezclado convencional	Mezclado en etapas	
500	37.0	252.5	297.2	44.7
450	42.5	223.2	261.1	37.9
400	46.6	199.5	231.6	32.2
350	49.4	182.4	210.4	28.0
300	51.0	172.8	198.4	25.6
250	51.2	171.2	196.5	25.2

Los hormigones analizados en esta investigación varían su contenido de pasta, dependiendo de la razón agua/material cementíceo utilizada, de esta forma el ahorro producido por el método está sujeto a la dosificación de los materiales a mezclar.

Con los datos entregados en la tabla 4.12, se tiene que el contenido de pasta de un hormigón de razón agua/material cementíceo 0.4 es un 40 % del volumen.

Si se considera la fabricación de 1 [m³] de hormigón, se necesitará 0.4 [m³] de pasta, entonces las cantidades de material cementíceo, agua y pasta para un metro cúbico se indican en la tabla 6.13.

Tabla 6.13: Cantidades material cementíceo y agua.

Material cementíceo [kg/m ³]	559.1
Agua [kg/m ³]	223.6
Pasta [kg/m ³]	782.7

Con los valores de la tabla 6.13 y los porcentajes de puzolana natural de la tabla 6.11, se tiene que la diferencia en peso del cemento Pórtland corresponde a los valores indicados en la tabla 6.14.

Tabla 6.14: Cantidad de cemento Pórtland ahorrado.

R ₂₈ * [kgf/cm ²]	Mezclado en etapas		Mezclado convencional		Ahorro cemento Pórtland [kg]
	Peso puzolana [kg]	Peso cemento Pórtland [kg]	Peso puzolana [kg]	Peso cemento Pórtland [kg]	
500	207.1	352.0	186.3	372.8	20.7
450	237.4	321.7	216.5	342.6	20.9
400	260.5	298.6	239.6	319.4	20.9
350	276.4	282.7	255.7	303.4	20.7
300	285.1	274.0	264.7	294.4	20.4
250	286.5	272.6	266.6	292.5	19.9

6.6.2 Razón agua/material cementíceo 0.5

Considerando las curvas de la figura 6.75 tienen una línea de tendencia cuadrática, los modelos correspondientes permiten estimar el porcentaje de puzolana natural necesaria para obtener un cierto nivel de resistencia a los 28 días, para de esta forma, obtener el ahorro de cemento Pórtland que se produce por el uso del mezclado en etapas.

En el caso de la razón agua/material cementíceo 0.5, las curvas obedecen a las siguientes ecuaciones:

Mezclado convencional	$R = -0.0004520 \cdot P^2 + 0.18 \cdot P + 29$
Mezclado en etapas	$R = -0.0004870 \cdot P^2 + 0.20 \cdot P + 23$

donde R : Resistencia a compresión objetivo a los 28 días [kgf/cm²]
 P : Porcentaje de puzolana natural admisible [%]

Para una resistencia dada de R₂₈*, utilizando mezclado en etapas es posible emplear mayor contenido de puzolana en el material cementíceo, como se observa en la tabla 6.15.

Tabla 6.15: Contenido de puzolana admisible según procedimiento de mezclado para distintos niveles de resistencia a compresión a 28 días.

R ₂₈ * [kgf/cm ²]	Puzolana admisible Mezclado en etapas [%]	Puzolana admisible Mezclado convencional [%]	Diferencia [%]
500	4.3	1.3	3.1
450	17.0	14.4	2.6
400	27.3	25.1	2.2
350	35.4	33.4	2.1
300	41.2	39.2	2.1
250	44.8	42.6	2.3

Este valor porcentual puede ser llevado a una cantidad de cemento Pórtland ahorrado si se considera la dosis de pasta utilizada en un hormigón y a un aumento significativo en las resistencias a 7 días.

Calcularemos la resistencia estimada a los 7 días de hormigones con los contenidos de puzolanas necesarios de la tabla 6.15 y se entregará el beneficio en resistencia a compresión asociado a este porcentaje de puzolana, al mezclar el hormigón en etapas.

Las relaciones que rigen las curvas de resistencia a los 7 días para la relación agua/material cementíceo 0.5 son:

Mezclado convencional	$R = 0.0005665 \cdot P^2 - 3.25 \cdot P + 271$
Mezclado en etapas	$R = -0.007713 \cdot P^2 - 3.44 \cdot P + 305$

Con estas relaciones se tiene que el aumento de resistencia a los 7 días obtenido por el aumento de puzolana en el material cementíceo se presenta en la tabla 6.16.

Tabla 6.16: Comparación de resistencia a los 7 días para los distintos métodos de mezclado, para contenidos de puzolana que permiten una resistencia objetivo a los 28 días con el mezclado en etapas.

R ₂₈ * [kgf/cm ²]	Puzolana [%] Mezclado en etapas	Resistencia a los 7 días [kgf/cm ²]		Aumento de resistencia [kgf/cm ²]
		Mezclado convencional	Mezclado en etapas	
500	4.3	256.9	290.6	33.7
450	17.0	216.0	245.1	29.1
400	27.3	182.6	205.9	23.3
350	35.4	156.6	174.2	17.6
300	41.2	137.9	150.6	12.8
250	44.8	126.4	136.0	9.6

Los hormigones analizados en esta investigación tienen distinta proporción de pasta, dependiendo de la razón agua/material cementíceo utilizada, de esta forma el ahorro producido por el método está sujeto a la dosificación de los materiales a mezclar.

Con los datos entregados en la tabla 4.12, se tiene que el contenido de pasta de un hormigón de razón agua/material cementíceo 0.5 es un 34 % del volumen.

Si se considera la fabricación de 1 [m³] de hormigón, se necesitará 0.34 [m³] de pasta, entonces las cantidades de material cementíceo, agua y pasta para un metro cúbico se indican en la tabla 6.17.

Tabla 6.17: Cantidades material cementíceo y agua.

Material cementíceo [kg/m ³]	416.9
Agua [kg/m ³]	208.5
Pasta [kg/m ³]	625.4

Con los valores de la tabla 6.17 y los porcentajes de la tabla 6.15, se tiene que la diferencia en peso del cemento Pórtland corresponde a los valores indicados en la tabla 6.18.

Tabla 6.18: Cantidad de cemento Pórtland ahorrado.

R ₂₈ * [kgf/cm ²]	Mezclado en etapas		Mezclado convencional		Ahorro cemento Pórtland [kg]
	Peso puzolana [kg]	Peso cemento Pórtland [kg]	Peso puzolana [kg]	Peso cemento Pórtland [kg]	
500	18.1	398.8	5.3	411.6	12.8
450	70.7	346.2	60.1	356.9	10.7
400	113.9	303.0	104.6	312.3	9.3
350	147.6	269.3	139.1	277.9	8.6
300	172.0	245.0	163.3	253.6	8.6
250	186.9	230.1	177.5	239.5	9.4

6.6.3 Razón agua/material cementíceo 0.6

Considerando que las curvas de la figura 6.76 tienen una línea de tendencia cuadrática, las ecuaciones de las curvas permiten estimar la puzolana necesaria para obtener cierta resistencia a compresión objetivos a los 28 días, para de esta forma calcular el ahorro de cemento Pórtland que se produce por el uso del mezclado en etapas.

En el caso de la razón agua/material cementíceo 0.6, las curvas obedecen a las siguientes ecuaciones:

Mezclado convencional	$R = -0.0006657 \cdot P^2 + 0.12 \cdot P + 47$
Mezclado en etapas	$R = -0.0006951 \cdot P^2 + 0.11 \cdot P + 47$

donde R : Resistencia a compresión objetivo a los 28 días [kgf/cm²]
 P : Porcentaje de puzolana natural admisible [%]

Para una resistencia dada de R₂₈*, utilizando mezclado en etapas es posible emplear mayor contenido de puzolana en el material cementíceo, como se observa en los datos de la tabla 6.19.

Tabla 6.19: Contenido de puzolana admisible según procedimiento de mezclado para distintos niveles de resistencia a compresión a 28 días.

R ₂₈ * [kgf/cm ²]	Puzolana admisible Mezclado en etapas [%]	Puzolana admisible Mezclado convencional [%]	Diferencia [%]
350	5.6	2.6	3.1
300	21.6	19.4	2.2
250	34.2	32.7	1.5

Esta diferencia se traduce en un ahorro de cemento Pórtland debido a que es posible de sustituir por puzolana cuando el hormigón se fabrica mediante mezclado en etapas. Este valor porcentual puede ser llevado a una cantidad de cemento Pórtland ahorrado si se considera la dosis de pasta utilizada en un hormigón y a un aumento sustantivo en las resistencias a 7 días.

Calcularemos la resistencia estimada a los 7 días de un hormigón con los contenidos de puzolanas necesarios de la tabla 6.19 y se entregará el beneficio en la resistencia entregado por este porcentaje de puzolana al mezclar el hormigón en etapas.

Las relaciones que rigen las curvas de resistencia a los 7 días para la relación agua/material cementíceo 0.6 son:

Mezclado convencional	$R = 0.006239 \cdot P^2 - 1.97 \cdot P + 172$
Mezclado en etapas	$R = 0.01033 \cdot P^2 - 2.47 \cdot P + 197$

Con estas relaciones se tiene que el aumento de resistencia a los 7 días obtenido por el mezclado en etapas se presenta en la tabla 6.20.

Tabla 6.20: Comparación de resistencia a los 7 días para los distintos métodos de mezclado, para contenidos de puzolana que permiten una resistencia objetivo a los 28 días con el mezclado en etapas.

R ₂₈ * [kgf/cm ²]	Puzolana [%] Mezclado en etapas	Resistencia a los 7 días [kgf/cm ²]		Aumento de resistencia [kgf/cm ²]
		Mezclado convencional	Mezclado en etapas	
350	5.6	161.1	183.8	22.7
300	21.6	132.3	149.0	16.7
250	34.2	111.8	125.1	13.3

Los hormigones elaborados en esta investigación tienen distinta proporción de pasta, dependiendo de la razón agua/material cementíceo utilizada, de esta forma, el ahorro producido por el método está sujeto a la dosificación de los materiales a mezclar.

Con los datos entregados en la tabla 4.12, se tiene que el contenido de pasta de un hormigón de razón agua/material cementíceo 0.6 es un 30 % del volumen.

Si se considera la fabricación de 1 [m³] de hormigón, se necesitará 0.3 [m³] de pasta, entonces los pesos de material cementíceo, agua y pasta para un metro cúbico se indican en la tabla 6.21.

Tabla 6.21: Cantidades material cementíceo y agua.

Material cementíceo [kg/m ³]	327.7
Agua [kg/m ³]	196.6
Pasta [kg/m ³]	524.3

Con los valores de la tabla 6.21 y los porcentajes de la tabla 6.19, se tiene que la diferencia en peso del cemento Pórtland corresponde a los valores indicados en la tabla 6.22.

Tabla 6.22: Cantidad de cemento Pórtland ahorrado.

R ₂₈ * [kgf/cm ²]	Mezclado en etapas		Mezclado convencional		Ahorro cemento Pórtland [kg]
	Peso puzolana [kg]	Peso cemento Pórtland [kg]	Peso puzolana [kg]	Peso cemento Pórtland [kg]	
350	18.5	309.2	8.4	319.3	10.1
300	70.8	256.9	63.5	264.2	7.3
250	112.2	215.5	107.2	220.5	4.9

El ahorro de cemento Pórtland por metro cúbico, considerando las grandes cantidades producidas por las plantas de hormigón premezclado, puede hacer de este método de mezclado un sistema eficiente, que permite además obtener mayores resistencias a los 7 días.

Existen además otros factores que pueden hacer provechoso el uso del mezclado en etapas, analizando el hecho de las mayores resistencias obtenidas a temprana edad, como son:

- La posibilidad de aumentar la velocidad de construcción in situ.
- Mayor eficiencia en plantas de prefabricados.
- La disminución de la fisuración que se produce en el hormigón a temprana edad.

6.7 Implementación del sistema de mezclado en etapas

Los beneficios que se aprecian, a través de este trabajo, por la introducción del mezclado en etapas en la elaboración del hormigón, se estima no serían directamente extrapolables a la fabricación industrial, para lo cual sería necesario implementar el procedimiento a gran escala.

Para esto, se podría estudiar el uso de este sistema de mezclado en una planta de hormigón tanto mezcladora como dosificadora.

Considerando el uso de una planta de hormigón mezcladora, existen las siguientes opciones de disposición de las etapas.

- ✓ Mezcladores separados para la elaboración de pasta y hormigón

El diagrama de una planta de hormigón mezcladora que consta de homogeneizadores separados para la pasta de cemento y el hormigón, se indica en la figura 6.72.

La elaboración de la pasta puede realizarse tanto en un proceso continuo como por colada de hormigón a fabricar. En el proceso continuo, la pasta, con la menor razón agua/material cementíceo posible, se mantiene en un mezclado constante con aditivo controlador de fraguado, químico que controla la hidratación del cemento, la que se induce mediante el uso de un activador. Para su uso, la pasta se pesa y vacía en el mezclador de hormigón junto con el aditivo activante de la hidratación y el ajuste de agua necesario por la humedad de los áridos y la razón agua/material cementíceo a utilizar. Cuando la pasta es elaborada para la fabricación de una colada de hormigón, se pesan los componentes de manera exacta, considerando la humedad de los áridos, y se agitan a alta velocidad.

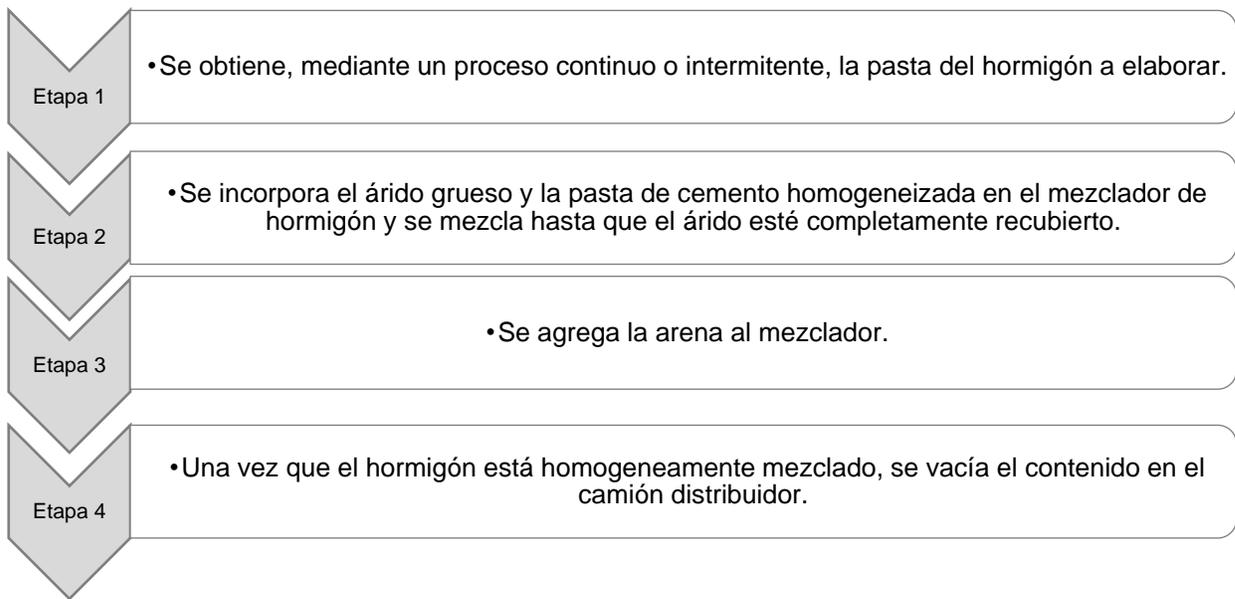


Figura 6.72: Diagrama de flujo de fabricación de hormigón en planta de hormigón mezcladora.

✓ Mezclador de velocidad variable para pasta y hormigón

El diagrama de una planta de hormigón mezcladora que consta de un único mezclador de velocidad variable que sirve para la homogeneización de la pasta de cemento y del el hormigón, se indica en la figura 6.73.

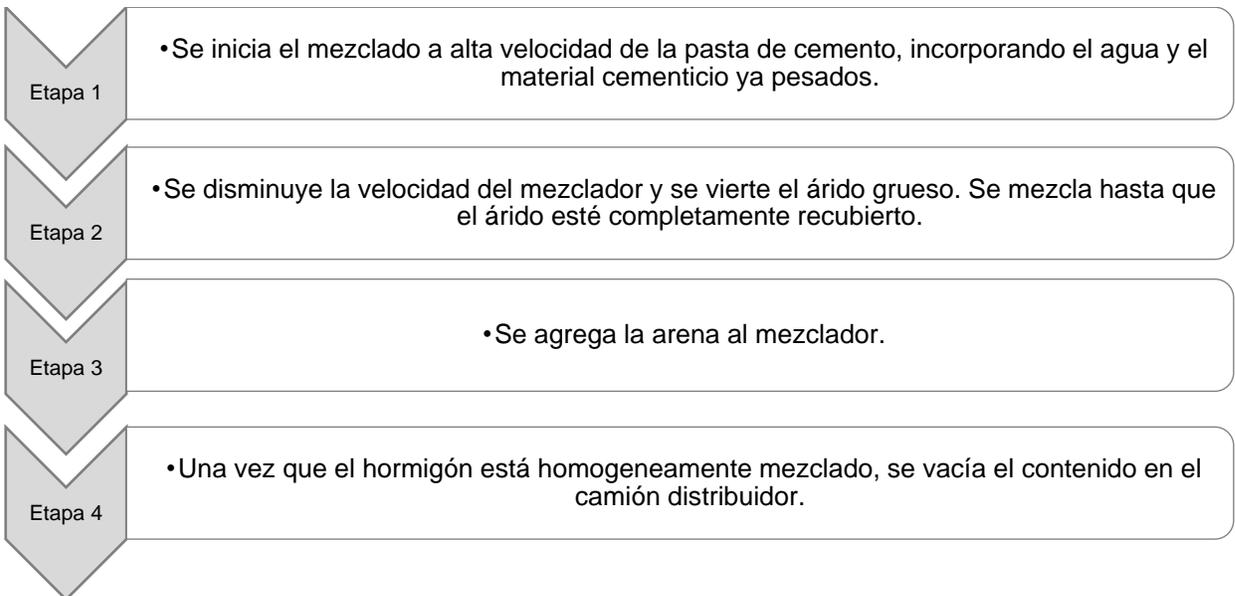


Figura 6.73: Diagrama de flujo de fabricación de hormigón en planta de hormigón mezcladora.

Este tipo de planta de hormigón es de procedimiento discontinuo, ya que se debe terminar de producir cierta cantidad de hormigón para comenzar una nueva colada.

Si consideramos el uso de una planta dosificadora de hormigón, el proceso se realizaría según el procedimiento indicado en la figura 6.74.

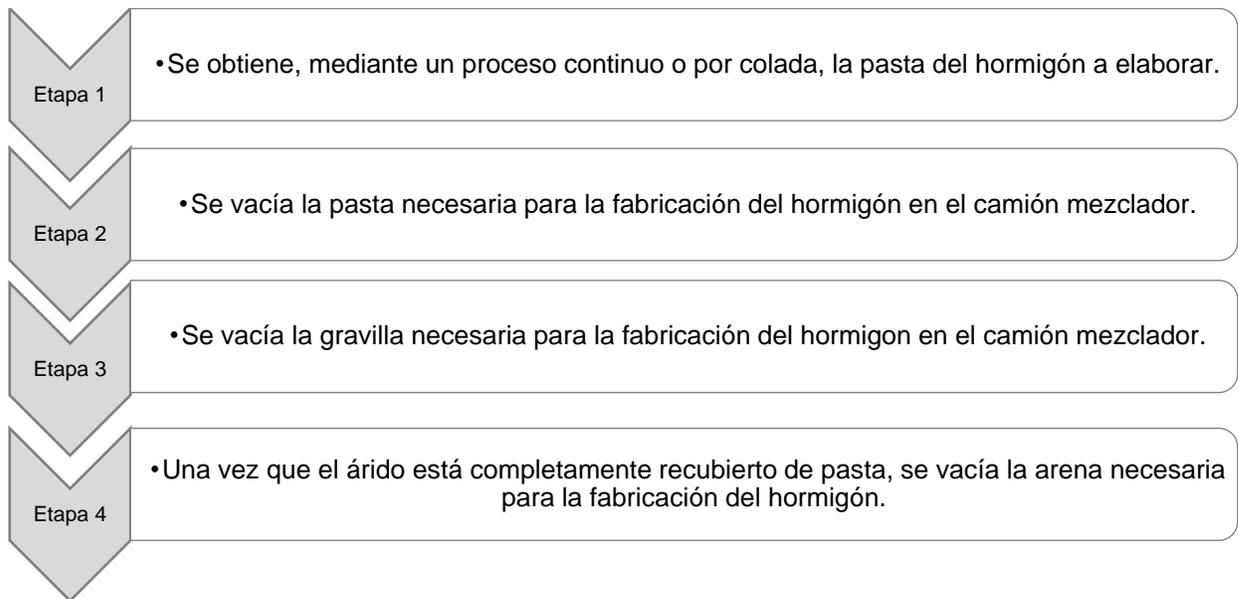


Figura 6.74: Diagrama de flujo de fabricación de hormigón en planta de hormigón dosificadora.

En este caso, el mezclador del hormigón corresponde al camión mezclador y la pasta utilizada, como se indicó anteriormente, puede ser fabricada en un proceso continuo o discontinuo.

En Chile, la fabricación del hormigón premezclado se realiza normalmente en plantas dosificadoras, las que pueden ser modificadas para la fabricación de hormigón en etapas a través de la inclusión de un sistema de mezclado de pasta y un controlador de descarga de áridos y pasta que permita insertar el árido grueso al camión, luego la pasta y posteriormente la arena.

Actualmente, existe en el mercado un equipo que realiza el proceso de verter el árido grueso inicialmente, para luego agregar al camión el mortero ya mezclado. Este equipo pertenece a la empresa ELBA y corresponde a los modelos EBCB 180 y EBCB 280, que difieren en su número de mezcladores. ⁽³⁶⁾

El modelo EBCB 280 pertenece a las plantas de hormigón de alta eficiencia de ELBA y puede operar como planta dosificadora y mezcladora. El diagrama del sistema de la planta se muestra en la figura 6.75. Tiene 2 mezcladores intercambiables por tolvas de descarga, de modo que la liberación de los áridos y la pasta de cemento al camión es posible de realizar en las diferentes etapas, lo que permitiría elaborar el hormigón utilizando el nuevo sistema de mezclado.

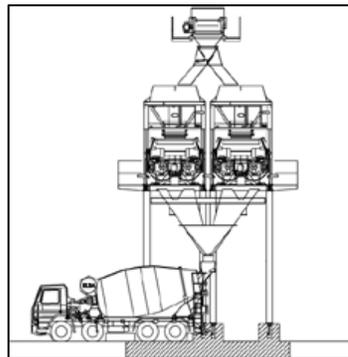


Figura 6.75: Planta de hormigón ELBA modelo EBCB 280. ⁽³⁶⁾

CAPÍTULO 7 Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

Del estudio realizado, cuyo objetivo principal se centró en la determinación del efecto de los procedimientos de elaboración y amasado de la mezcla, a través de la evaluación del comportamiento y propiedades de hormigones de distintas composiciones, se concluye lo siguiente.

1. La homogenización de la mezcla en un procedimiento de dos etapas; elaboración de la pasta cementícea (cemento Pórtland, adición puzolánica y agua) y amasado posterior de ésta con las fracciones gruesa y fina de los áridos, demostró ser un procedimiento alternativo eficiente, que genera mezclas de calidad superior al obtenido mediante el procedimiento convencional, en una etapa.
2. Las principales características del hormigón que se mejoran por efecto del amasado en dos etapas son:
 - i. Una mayor uniformidad en la viscosidad y cohesión de la pasta, lo que origina hormigones no segregables, bajo las condiciones del ensayo de asentamiento en el cono de Abrams.
 - ii. Incremento significativo de la tasa de desarrollo de resistencia en la etapa inicial (7 días), que varía entre 10 y 18 % para hormigones con distintos contenidos de puzolana en el material cementíceo en el rango de razones agua/material cementíceo estudiado.

A edades mayores, las curvas de resistencia a compresión para ambos métodos de amasado se hacen prácticamente coincidentes, lo que podría explicarse por la condición de curado a la que fueron sometidas las probetas (curado bajo agua a temperaturas controlada, 23 °C), que permitió asegurar el desarrollo óptimo de las reacciones de hidratación del material cementíceo, especialmente en el caso de los que incluían mayores contenidos de puzolana.

- iii. Mayor eficiencia en la adquisición de resistencia por uso de puzolana natural en el material cementíceo, atribuible a la más eficiente hidratación de los materiales aglomerantes y al mejor recubrimiento de los áridos.
3. Al analizar el efecto de utilizar áridos a mayor temperatura (80 °C) en la elaboración de la serie de hormigones de razón agua/material cementíceo 0.5, se constató por una parte, el deterioro en los niveles de resistencia a compresión a los 56 días que alcanzó a un 24 % para el caso de hormigón con cemento sin incorporación de puzolana y a 20 y 13 % para los hormigones con 20 y 40 % de adición de puzolana, respectivamente, y en segundo término, que las tasas de crecimiento de la resistencia entre 28 y 56 días cae en un 66 % aproximadamente, independiente de la composición del material cementíceo utilizado.

El origen de este comportamiento, se puede atribuir a un importante debilitamiento de la zona de transición árido-pasta por efecto de reacciones de hidratación distintas que pudieron generar mayor porosidad y microfisuración en esa zona.

7.2 Recomendaciones

- ✓ Analizar cómo afecta a la durabilidad el uso del mezclado en etapas para la fabricación de hormigones y si este mezclado disminuye los problemas que actualmente tiene el uso de grandes contenidos de puzolana en el material cementíceo.

Cuantificar ésta posible ventaja estableciendo a nivel económico si es factible la implementación de un sistema de mezclado en etapas considerando los ahorros producidos por el mayor uso de puzolanas en el material aglomerante, los beneficios que se puedan encontrar en cuanto a durabilidad y las mayores resistencias a los 7 días alcanzadas respecto al mezclado convencional.

- ✓ Determinar si el uso del mezclado en etapas acrecienta las resistencias mecánicas de hormigones fabricados con áridos reciclados, mediante la mejora de la zona interfacial del hormigón.
- ✓ Determinar la influencia del sistema de homogenización y finura de las matrices aglomerantes en la zona interfacial, estudiando sus propiedades del hormigón fresco y endurecido.
- ✓ Analizar si el comportamiento obtenido por los hormigones estudiados se repite al utilizar otros aditivos minerales en el material cementíceo.
- ✓ Estudiar el comportamiento de los hormigones mezclados en etapas cuando el cono de Abrams estimado para los hormigones convencionales con cemento Pórtland es de 6 a 10 [cm].

CAPÍTULO 8 Referencias bibliográficas

- (1) Tyson D. Rupnow, Vernon r. Schaefer, Kejin Wang, Benjamin L Hermanson. *“Improving Portland Cement Concrete mix Consistency and Production Rate through Two-Stage Mixing”*. Centre for Transportation Research and Education, 2007.
- (2) Vernon R. Schaefer. *“Two-Stage mixing”*. Iowa Highway Research Board, 2008.
- (3) K.R. Saeed. *“Technique of multi-step concrete mixing”*. Materials and Structures, 1995, 28, 230-234.
- (4) Scott Schlorholtz, Kejin Wang, Jiong Hu, Shihai Zhang. *“Material and Mix Optimization Procedures for PCC Pavements”*. Centre for Transportation Research and Education, 2006.
- (5) Ferraris, Chiara F. *“Concrete Mixing Methods and Concrete Mixers: State of the Art”*. Journal of Reaseach of the National Institute of Standards and Technology, 2001, 2, 391-399.
- (6) Tam, V., Gao, X., Tam, C. *“Comparing performance of modified two-stage mixing approach for producing recycled aggregate concrete”*. Magazine of Concrete Research, 2006, 58, 7, 477-484.
- (7) Jiong Hu, Shihai Zhang. *“Using Moisture Sensor to Monitor Fresh Concrete Uniformity”*.
- (8) Neville, Adam. M. *“Properties of concrete”*. Londres, Pitman Publishing, 1975. 532p.
- (9) Mehta, Povindar. K y MONTEIRO, Paulo. J.M. *“Concrete: Microestructure, properties and materials”*. 3° ed. New York, McGraw-Hill, 2006. 659p.
- (10) NCh 1789 Of. 86. *“Hormigón – Determinación de la uniformidad obtenida en el mezclado del hormigón fresco”*. Instituto Nacional de Normalización, Chile, 1986.
- (11) NCh 1018 Of. 77. *“Preparación de mezclas de prueba en laboratorio”*. Instituto Nacional de Normalización, Chile, 1977.
- (12) Herrera Arriagada, Cristián. *“Cemento con adiciones puzolánicas: Influencia de la molienda conjunta en la eficiencia de estas adiciones”*. Tesis Ingeniería civil. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2004.
- (13) Sepúlveda Montiglio, Esteban. *“Influencia de la puzolana en la fisuración por retracción en los hormigones chilenos”*, Tesis Ingeniería civil. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2007.
- (14) Naik, T., Kraus, R., Ramme, B., Siddique, R. *“Mechanical properties and durability of concrete pavements containing high-volume fly ash”*. Centre for By-Products Utilization, 2002.
- (15) Bouzoubaâ, N., Fournier, B., Malhotra, M. V., Golden, D.M. *“Mechanical properties and durability of concrete made with HVFA blended cement produced in a cement plant”*.
- (16) Mehta, K. *“High-performance, high-volume fly ash concrete for sustainable development”*.
- (17) Crouch, L.K., Hewitt, R., Byard B. *“High volume fly ash concrete”*. World of Coal ash, 2007.

- (18) Siddique, R., Prince, W., Kalami, S. "*Influence of utilization of High-Volumes of Class F Fly Ash on the Abrasion Resistance of Concrete*". Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 2007, 10, 13-28.
- (19) Kosior-Kazberuk, M., Lelusz, M. "*Strength development of concrete with fly ash addition*". Journal of Civil Engineering and Management, 2007, 2, 115-122.
- (20) Lammertijn, S., De Belie, N. "*Porosity, gas permeability, carbonation and thir interaction in high-volume fly ash concrete*". Magazine of Concrete Research, 2008, 7, 535-545.
- (21) Bargaheiser, K., Butalia, T.S. "*Prevention of Corrosion in concrete using Fly Ash Concrete Mixes*".
- (22) Headwaters Resources. "*Class F Fly Ash Increases Resistance to Sulfate Attack*".
- (23) RILEM TC 14-CPC. "*Technical Committees Preparation of a RILEM recommendation. Reference concrete for research and testing. Progress report on the work of the Permanent Committee on Concrete and enquiry among RILEM members*", RILEM Publications SARL, 1979, 12, 129-142.
- (24) Merrit, Frederick S. "*Manual del ingeniero civil*"; Tomo I. Tercera edición. Editorial Mc. Graw Hill.
- (25) NCh 148 Of. 68. "*Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales*". Instituto Nacional de Normalización, Chile, 1968.
- (26) Diamond, S. "*The microestructure of cement paste in concrete*". VIII Congreso Internacional Química del Cemento – Río de Janeiro, 1986. Vol.I.
- (27) Puertas M., Francisca, Blanco V., María Teresa, Palomo S., Ángel. "*Microestructura del hormigón – Influencia sobre sus propiedades*". Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja. Madrid, 1989. N° 398.
- (28) Videla, C. "*Apunte Tecnología del Hormigón*". Departamento de Ingeniería y gestión de la construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- (29) Garboczi, E. J. "*Microstructure and transport properties of concrete*". En RILEM. Technical Committee TC 116-PCD "Performance criteria for concrete durability". Kropp, J., Hilsdorf, H. London, 1995. 198 – 212.
- (30) Garboczi, E. J., Bentz, D. P. "*The effect of Interfacial Transition Zone on Concrete Properties: the Dilute Limit*". National Institute of Standards and Technology.
- (31) Bentz, D.P., Hwang, J. T. G., Hagwood, C., Garboczi, E. J., Snyder, K. A., Buenfeld N. and Scrivener, K. L. "*Interfacial zone percolation in concrete: Effects of interfacial zone thickness and aggregate shape*". Materials Research Society, 370, 437 – 442, 1995.
- (32) Zheng, J. J., Li C. Q, Zhou, X. Z. "*Characterization of Interfacial Transition Zone in Concrete*". ACI Materials Journal, 102, 165 – 171, 2005.
- (33) Sun, Zhihui, Ye, Guang, Shah, Surendra P. "*Microestructure and Early-Age Properties of Portland Cement Paste – Effects of Connectivity of Solid Phases*". ACI Materials Journal, 102, 122 – 129, 2005.

- (34) Neville, Adam. M. *"Neville on concrete"*. ACI International, 2003.
- (35) Helmuth, Richard A., Detwiler, Rachel J. *"The Nature of Concrete"*. Lamond, Joseph F., Pielert, James H. *"Significance of tests and properties of Concrete and Concrete – Making Materials"*. ASTM International, New York, 2006.
- (36) ELBA-WERK . High-efficiency Plants [en línea] < http://www.elba-werk.com/en/produkte/betonmischanlagen/sonder_anlagen/hochleistung.php?navid=26> [consulta: 8 Septiembre 2009].
- (37) Powers, T.C., *"Structure and Physical Properties of Hardened Portland. Cemento – Paste"*, RCA – Research Bull N° 94, 1959.
- (38) Ruíz-Tagle Larraín, Luis. "Estudio de la susceptibilidad a la carbonatación de hormigones fabricados con cementos chilenos", Tesis Ingeniería civil. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2005.
- (39) Cortés Muñoz , Marcelo. "Penetración de cloruros en el hormigón: Influencia de la composición de cemento y de la pasta aglomerante ", Tesis Ingeniería civil. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 1997.
- (40) Carrasco Catalán , Javier. "Estudio experimental de hormigones de alta resistencia a la penetración de iones cloruro ", Tesis Ingeniería civil. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2006.
- (41) Lasnibat Rehbein, Juan. "Influencia de adiciones puzolánicas en la resistencia al ataque de sulfatos en hormigones de cementos Portland", Tesis Ingeniería civil. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 1990.

ANEXO I

CÁLCULOS REALIZADOS

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Cálculo de la sección de ensayo

La sección de ensayo viene dada, según la norma NCh 1037 Of. 77 “Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas”, es:

$$S = \left(\frac{a_1 + a_2}{2} \right) \cdot \left(\frac{b_1 + b_2}{2} \right)$$

Las dimensiones a_1, a_2, b_1 y b_2 se muestran en la siguiente figura.

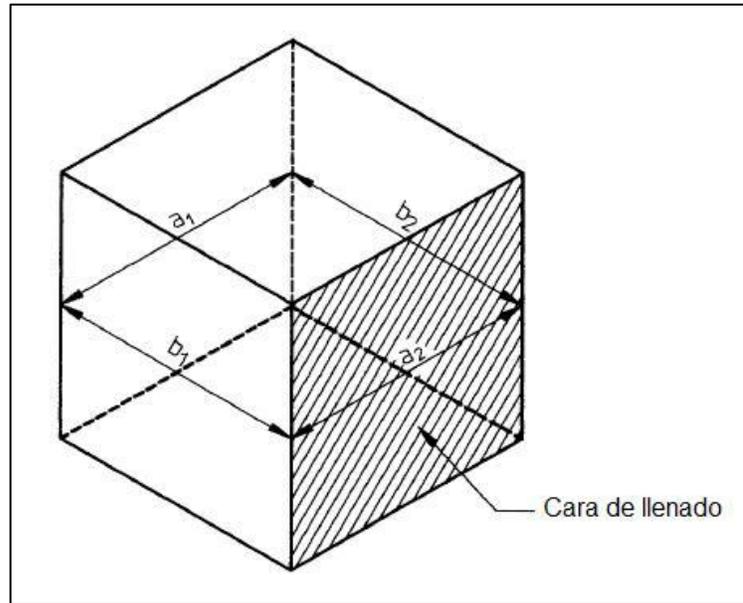


Figura A1: Sección de ensayo de probeta cúbica.

Cálculo de resistencia a la compresión

$$R = \frac{P}{S}$$

donde las variables son:

R = tensión de rotura o resistencia [kgf/cm²]

P = carga máxima aplicada por la máquina de ensayo [kgf]

S = sección de ensayo [cm²]

DETERMINACIÓN DE LA EXUDACIÓN

Cálculo de la masa de agua en la muestra

La masa de agua en la muestra corresponde, según la norma ASTM C232 “Standard Test Methods for Bleeding of Concrete”, a:

$$C = \left(\frac{w}{W}\right) \cdot S$$

donde las variables son:

C = peso de agua en la muestra [kg]

w = peso de agua en la colada [kg]

W = peso de hormigón en la colada [kg]

S = peso de la muestra [kg]

Cálculo de porcentaje de exudación

El porcentaje de agua exudada corresponde, según la norma ASTM C232, a:

$$\text{Exudación [\%]} = \left(\frac{D}{C}\right) \cdot 100$$

donde las variables son:

D = peso de agua exudada por la muestra [kg]

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y FLEXIÓN EN MORTERO

Cálculo de la resistencia a la compresión en mortero

La resistencia a la compresión en mortero, según la norma NCh 158 Of. 67 “Cementos – Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento”, es:

$$R = \frac{C}{A}$$

donde las variables son:

R = resistencia a la compresión [kgf/cm²]

C = carga máxima de ruptura [kgf]

A = sección de ensayo [cm²]

En este caso, la sección corresponde a un área de $4 \times 4 = 16$ [cm²].

Cálculo de la resistencia a la flexión en mortero

La resistencia a la flexión en mortero, según la norma NCh 158 Of. 67 “Cementos – Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento”, es:

$$R = 0.234 \cdot C$$

donde las variables son:

R = resistencia a la flexión [kgf/cm²]

C = carga máxima de ruptura a la flexión [kgf]

En este caso, la separación de los apoyos es 100 [mm].

CÁLCULO DE DOSIFICACIONES

Para el cálculo de dosificaciones, se tiene como dato razón agua/cemento, el porcentaje volumétrico de áridos en el hormigón y un contenido de aire supuesto.

Con el porcentaje volumétrico de áridos en el hormigón, se calcula el volumen de áridos en 1000 [l] de hormigón como:

$$\text{Vol. áridos} = \text{Porcentaje de áridos en el hormigón} \cdot 1000$$

Con este valor se obtiene el volumen de pasta en 1000 litros de hormigón:

$$\text{Vol. pasta} = 1000 - \text{Vol. áridos} - \text{Vol. aire}$$

Además se tiene que:

$$\begin{aligned} \text{Vol. pasta} &= V_a + V_c + V_p \\ \text{Vol. pasta} &= P_{MC} \cdot \frac{A}{C} + P_{MC} \cdot \frac{P_c}{pe_c} + P_{MC} \cdot \frac{P_p}{pe_p} \end{aligned}$$

donde las variables son:

V_c = volumen de cemento Pórtland

V_a = volumen de agua

V_p = volumen de puzolana

P_{MC} = peso material cementíceo

A/C = razón agua / material cementíceo

P_c = porcentaje de cemento Pórtland en el material cementíceo

P_p = porcentaje de puzolana en el material cementíceo

pe_c = peso específico del cemento Pórtland

pe_p = peso específico de la puzolana

El peso por metro cúbico de material cementíceo es entonces:

$$\text{Peso material cementíceo} = \frac{\text{Vol. pasta}}{\frac{A}{C} + \frac{P_c}{pe_c} + \frac{P_p}{pe_p}}$$

De este modo, el contenido de puzolana y cemento Pórtland en peso por metro cúbico es:

$$\text{Peso cemento Pórtland} = P_c \cdot \text{Peso material cementíceo}$$

$$\text{Peso puzolana} = P_p \cdot \text{Peso material cementíceo}$$

El peso de agua por metro cúbico queda entonces dado por:

$$\text{Peso agua} = \frac{A}{C} \cdot \text{Peso material cementíceo}$$

El peso de áridos por metro cúbico está dado por la ecuación:

$$Peso \text{ áridos} = Vol. \text{ áridos} \cdot pe_a$$

donde:

pe_a = peso específico de los áridos

Dadas las granulometrías de la arena y gravilla, se tiene que para el cumplimiento de la banda RILEM requerida, se deben mezclar los áridos en distintos porcentajes, por lo tanto los pesos de gravilla y arena por metro cúbico son siguientes:

$$Peso \text{ arena} = Peso \text{ áridos} \cdot Fracción \text{ de arena}$$

$$Peso \text{ gravilla} = Peso \text{ áridos} \cdot Fracción \text{ de gravilla}$$

Este peso de agua debe ser corregido por la humedad de los áridos. Se calcula la humedad libre en los áridos y con esto se calcula el peso de agua corregido por metro cúbico.

$$Humedad \text{ libre arena} = Peso \text{ arena} \cdot (H_{arena} - Abs_{arena})$$

$$Humedad \text{ libre gravilla} = Peso \text{ gravilla} \cdot (H_{gravilla} - Abs_{gravilla})$$

$$Peso \text{ de agua corregido} = Peso \text{ de agua} - Hum. \text{ libre arena} - Hum. \text{ libre gravilla}$$

donde las variables son:

H_{arena} = humedad de la arena [%]

$H_{gravilla}$ = humedad de la gravilla [%]

Abs_{arena} = coeficiente de absorción de la arena

$Abs_{gravilla}$ = coeficiente de absorción de la gravilla

Para la elaboración de una cantidad particular de litros de hormigón, se debe calcular:

$$Peso \text{ cemento Pórtland final} = Peso \text{ cemento Pórtland} \cdot \frac{\text{litros a elaborar}}{1000}$$

$$Peso \text{ puzolana final} = Peso \text{ puzolana} \cdot \frac{\text{litros a elaborar}}{1000}$$

$$Peso \text{ agua corregido final} = Peso \text{ agua corregido} \cdot \frac{\text{litros a elaborar}}{1000}$$

$$Peso \text{ arena final} = Peso \text{ arena} \cdot \frac{\text{litros a elaborar}}{1000}$$

$$Peso \text{ gravilla final} = Peso \text{ gravilla} \cdot \frac{\text{litros a elaborar}}{1000}$$

ANEXO II

PLANILLAS DE ENSAYO DEL HORMIGÓN FRESCO

Muestra:	0.4 - 0 %P - C
Fecha :	23-07-2009
Peso total:	2358.3
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.4
Tipo de probetas :	5 cúbicas/1 RILEM
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56 / 28
Tipo de curado:	Piscina

Dosificación	
Agua [kg] :	8.38
Material Cementicio [kg] :	26.05
Gravilla [kg] :	47.24
Arena [kg] :	34.21

Temperatura del ambiente [°C] :	17.5
Temperatura del hormigón [°C] :	17.9

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	10:46
Asentamiento de cono [cm] :	16

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.4
Volumen [l] :	8.024

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	1.1
-------------------------	-----

Resultados de exudación

Peso muestra [kg] :	7.1
---------------------	-----

Tiempo	Agua exudada [ml]
Hora inicio	10:53
30 [min]	2.5
60 [min]	6
90 [min]	10
120 [min]	-

Tiempo	Agua exudada [ml]
150 [min]	-
180 [min]	-
210 [min]	-
240 [min]	-
270 [min]	-

Observaciones
Exudación: Peso molde 45: 1.48 kg

Muestra:	0.4 - 20 %P - C
Fecha :	23-07-2009
Peso total:	2341.1
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.4
Tipo de probetas :	5 cúbicas/1 RILEM
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56 / 28
Tipo de curado:	Piscina

Dosificación	
Agua [kg] :	8.13
Material Cementicio [kg] :	25.43
Gravilla [kg] :	47.24
Arena [kg] :	34.21

Temperatura del ambiente [°C] :	17.5
Temperatura del hormigón [°C] :	17.8

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	11:09
Asentamiento de cono [cm] :	13

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.21
Volumen [l] :	8.024

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	1.3
-------------------------	-----

Resultados de exudación

Peso muestra [kg] :	7.36
---------------------	------

Tiempo	Agua exudada [ml]
Hora inicio	11:15
30 [min]	2.5
60 [min]	5
90 [min]	8
120 [min]	-

Tiempo	Agua exudada [ml]
150 [min]	-
180 [min]	-
210 [min]	-
240 [min]	-
270 [min]	-

Observaciones
Exudación: Peso molde 7: 1.43 kg

Muestra:	0.4 - 40 %P - C
Fecha :	23-07-2009
Peso total:	2324.7
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.4
Tipo de probetas :	5 cúbicas/1 RILEM
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56 / 28
Tipo de curado:	Piscina

Dosificación	
Agua [kg] :	7.90
Material Cementicio [kg] :	24.85
Gravilla [kg] :	47.24
Arena [kg] :	34.21

Temperatura del ambiente [°C] :	17.5
Temperatura del hormigón [°C] :	17.1

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	11:35
Asentamiento de cono [cm] :	10

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.04
Volumen [l] :	8.024

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	1.6
-------------------------	-----

Resultados de exudación

Peso muestra [kg] :	7.64
---------------------	------

Tiempo	Agua exudada [ml]
Hora inicio	11:40
30 [min]	2
60 [min]	5
90 [min]	8
120 [min]	-

Tiempo	Agua exudada [ml]
150 [min]	-
180 [min]	-
210 [min]	-
240 [min]	-
270 [min]	-

Observaciones
Exudación: Peso molde 39: 1.46 kg

Muestra:	0.5 - 0 %P - C
Fecha :	21-07-2009
Peso total:	2374.32
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.5
Tipo de probetas :	5 cúbicas/1 RILEM
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56 / 28
Tipo de curado:	Piscina

Dosificación	
Agua [kg] :	8.72
Material Cementicio [kg] :	19.41
Gravilla [kg] :	51.97
Arena [kg] :	37.63

Temperatura del ambiente [°C] :	17.6
Temperatura del hormigón [°C] :	17.9

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	11:49
Asentamiento de cono [cm] :	15

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.5
Volumen [l] :	8.024

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	0.9
-------------------------	-----

Resultados de exudación

Peso muestra [kg] :	7.9
---------------------	-----

Tiempo	Agua exudada [ml]
Hora inicio	11:59
30 [min]	6
60 [min]	12
90 [min]	15
120 [min]	-

Tiempo	Agua exudada [ml]
150 [min]	-
180 [min]	-
210 [min]	-
240 [min]	-
270 [min]	-

Observaciones

Muestra:	0.5 - 20 %P - C
Fecha :	21-07-2009
Peso total:	2362.18
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.5
Tipo de probetas :	5 cúbicas/1 RILEM
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56 / 28
Tipo de curado:	Piscina

Dosificación	
Agua [kg] :	8.52
Material Cementicio [kg] :	19.01
Gravilla [kg] :	51.97
Arena [kg] :	37.63

Temperatura del ambiente [°C] :	17.6
Temperatura del hormigón [°C] :	17.8

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	12:29
Asentamiento de cono [cm] :	13.5

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.34
Volumen [l] :	8.024

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	1
-------------------------	---

Resultados de exudación

Peso muestra [kg] :	7.29
---------------------	------

Tiempo	Agua exudada [ml]
Hora inicio	12:37
30 [min]	3
60 [min]	8
90 [min]	11
120 [min]	-

Tiempo	Agua exudada [ml]
150 [min]	-
180 [min]	-
210 [min]	-
240 [min]	-
270 [min]	-

Observaciones

Muestra:	0.5 - 40 %P - C
Fecha :	21-07-2009
Peso total:	2350.53
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.5
Tipo de probetas :	5 cúbicas/1 RILEM
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56 / 28
Tipo de curado:	Piscina

Dosificación	
Agua [kg] :	8.33
Material Cementicio [kg] :	18.62
Gravilla [kg] :	51.97
Arena [kg] :	37.63

Temperatura del ambiente [°C] :	17.6
Temperatura del hormigón [°C] :	17.6

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	13:01
Asentamiento de cono [cm] :	11

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.15
Volumen [l] :	8.024

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	1.2
-------------------------	-----

Resultados de exudación

Peso muestra [kg] :	7.2
---------------------	-----

Tiempo	Agua exudada [ml]
Hora inicio	13:11
30 [min]	2
60 [min]	6.5
90 [min]	10
120 [min]	-

Tiempo	Agua exudada [ml]
150 [min]	-
180 [min]	-
210 [min]	-
240 [min]	-
270 [min]	-

Observaciones

Muestra:	0.6 - 0 %P - C
Fecha :	24-07-2009
Peso total:	2388.3
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.6
Tipo de probetas :	5 cúbicas/1 RILEM
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56 / 28
Tipo de curado:	Piscina

Dosificación	
Agua [kg] :	6.86
Material Cementicio [kg] :	15.24
Gravilla [kg] :	55.12
Arena [kg] :	39.91

Temperatura del ambiente [°C] :	17.5
Temperatura del hormigón [°C] :	16.9

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	15:31
Asentamiento de cono [cm] :	14.5

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.58
Volumen [l] :	8.024

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	0.8
-------------------------	-----

Resultados de exudación

Peso muestra [kg] :	7.25
---------------------	------

Tiempo	Agua exudada [ml]
Hora inicio	15:39
30 [min]	10
60 [min]	13
90 [min]	14
120 [min]	-

Tiempo	Agua exudada [ml]
150 [min]	-
180 [min]	-
210 [min]	-
240 [min]	-
270 [min]	-

Observaciones
Exudación: Peso molde 45: 1.48 kg

Muestra:	0.6 - 20 %P - C
Fecha :	24-07-2009
Peso total:	2379.2
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.6
Tipo de probetas :	5 cúbicas/1 RILEM
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56 / 28
Tipo de curado:	Piscina

Dosificación	
Agua [kg] :	6.69
Material Cementicio [kg] :	14.96
Gravilla [kg] :	55.12
Arena [kg] :	39.91

Temperatura del ambiente [°C] :	17.3
Temperatura del hormigón [°C] :	15.9

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	16:00
Asentamiento de cono [cm] :	13.5

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.43
Volumen [l] :	8.024

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	0.9
-------------------------	-----

Resultados de exudación

Peso muestra [kg] :	7.11
---------------------	------

Tiempo	Agua exudada [ml]
Hora inicio	16:08
30 [min]	7
60 [min]	9.5
90 [min]	11
120 [min]	-

Tiempo	Agua exudada [ml]
150 [min]	-
180 [min]	-
210 [min]	-
240 [min]	-
270 [min]	-

Observaciones
Exudación: Peso molde 7: 1.43 kg

Muestra:	0.6 - 40 %P - C
Fecha :	24-07-2009
Peso total:	2370.4
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.6
Tipo de probetas :	5 cúbicas/1 RILEM
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56 / 28
Tipo de curado:	Piscina

Dosificación	
Agua [kg] :	6.53
Material Cementicio [kg] :	14.68
Gravilla [kg] :	55.12
Arena [kg] :	39.91

Temperatura del ambiente [°C] :	17.3
Temperatura del hormigón [°C] :	15.9

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	16:31
Asentamiento de cono [cm] :	11.5

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.23
Volumen [l] :	8.024

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	1
-------------------------	---

Resultados de exudación

Peso muestra [kg] :	6.72
---------------------	------

Tiempo	Agua exudada [ml]
Hora inicio	16:43
30 [min]	5
60 [min]	8
90 [min]	9.5
120 [min]	-

Tiempo	Agua exudada [ml]
150 [min]	-
180 [min]	-
210 [min]	-
240 [min]	-
270 [min]	-

Observaciones
Exudación: Peso molde 39: 1.46 kg

Muestra:	0.4 - 0 %P - E
Fecha :	11-08-2009
Peso total:	2358.3
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.4
Tipo de probetas :	5 cúbicas/1 RILEM
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56 / 28
Tipo de curado:	Piscina

Temperatura del ambiente [°C] :	18.8
Temperatura del hormigón [°C] :	19.9

Resultados Densidad de Pasta

Peso muestra [kg] :	1.95
Volumen [l] :	1.005

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	17:18
Asentamiento de cono [cm] :	10

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	1.4
-------------------------	-----

Tiempo	Agua exudada [ml]
Hora inicio	17:30
30 [min]	5
60 [min]	8
90 [min]	10
120 [min]	-

Dosificación por colada de pasta	
Agua [kg] :	5.32
Material Cementicio [kg] :	14.82
Peso total [kg]:	35.40
Peso primera colada [kg]:	18.88
Peso segunda colada [kg]	16.52

Dosificación hormigón	
Agua [kg] :	9.36
Material Cementicio [kg] :	26.05
Gravilla [kg] :	47.24
Arena [kg] :	34.21

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.28
Volumen [l] :	8.024

Resultados de exudación

Peso muestra [kg]	7.5
-------------------	-----

Tiempo	Agua exudada [ml]
150 [min]	
180 [min]	
210 [min]	
240 [min]	
270 [min]	

Observaciones
Exudación: Peso molde 36: 1.44 kg

Muestra:	0.4 - 20 %P - E
Fecha :	11-08-2009
Peso total:	2341.1
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.4
Tipo de probetas :	5 cúbicas/1 RILEM
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56 / 28
Tipo de curado:	Piscina

Temperatura del ambiente [°C] :	18.8
Temperatura del hormigón [°C] :	17.6

Resultados Densidad de Pasta

Peso muestra [kg] :	1.93
Volumen [l] :	1.005

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	18:09
Asentamiento de cono [cm] :	7

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	1.6
-------------------------	-----

Tiempo	Agua exudada [ml]
Hora inicio	18:15
30 [min]	3
60 [min]	5.5
90 [min]	7
120 [min]	

Dosificación por colada de pasta	
Agua [kg] :	5.18
Material Cementicio [kg] :	14.47
Peso total [kg]:	34.54
Peso primera colada [kg]:	18.6
Peso segunda colada [kg]	15.94

Dosificación hormigón	
Agua [kg] :	9.11
Material Cementicio [kg] :	25.43
Gravilla [kg] :	47.24
Arena [kg] :	34.21

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.13
Volumen [l] :	8.024

Resultados de exudación

Peso muestra [kg]	7.41
-------------------	------

Tiempo	Agua exudada [ml]
150 [min]	
180 [min]	
210 [min]	
240 [min]	
270 [min]	

Observaciones
Exudación: Peso molde 44: 1.47 kg

Muestra:	0.4 - 40 %P - E
Fecha :	11-08-2009
Peso total:	2324.7
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.4
Tipo de probetas :	5 cúbicas/1 RILEM
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56 / 28
Tipo de curado:	Piscina

Temperatura del ambiente [°C] :	18.9
Temperatura del hormigón [°C] :	19.1

Resultados Densidad de Pasta

Peso muestra [kg] :	1.85
Volumen [l] :	1.005

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	18:57
Asentamiento de cono [cm] :	4

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	1.7
-------------------------	-----

Tiempo	Agua exudada [ml]
Hora inicio	19:20
30 [min]	2
60 [min]	3.5
90 [min]	5
120 [min]	-

Dosificación por colada de pasta	
Agua [kg] :	5.05
Material Cementicio [kg] :	14.14
Peso total [kg]:	33.72
Peso primera colada [kg]:	18.37
Peso segunda colada [kg]	15.35

Dosificación hormigón	
Agua [kg] :	8.88
Material Cementicio [kg] :	24.85
Gravilla [kg] :	47.24
Arena [kg] :	34.21

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	18.96
Volumen [l] :	8.024

Resultados de exudación

Peso muestra [kg]	7.56
-------------------	------

Tiempo	Agua exudada [ml]
150 [min]	
180 [min]	
210 [min]	
240 [min]	
270 [min]	

Observaciones
Exudación: Peso molde 30: 1.44 kg

Muestra:	0.5 - 0 %P - E
Fecha :	14-08-2009
Peso total:	2374.3
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.5
Tipo de probetas :	5 cúbicas/1 RILEM
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56 / 28
Tipo de curado:	Piscina

Temperatura del ambiente [°C] :	19.8
Temperatura del hormigón [°C] :	19.7

Resultados Densidad de Pasta

Peso muestra [kg] :	1.86
Volumen [l] :	1.005

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	13:02
Asentamiento de cono [cm] :	9.5

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	1.2
-------------------------	-----

Tiempo	Agua exudada [ml]
Hora inicio	13:10
30 [min]	9
60 [min]	12.5
90 [min]	13.5
120 [min]	-

Dosificación por colada de pasta	
Agua [kg] :	5.22
Material Cementicio [kg] :	11.24
Peso total [kg]:	28.44
Peso primera colada [kg]:	15.86
Peso segunda colada [kg]	12.58

Dosificación hormigón	
Agua [kg] :	9.02
Material Cementicio [kg] :	19.41
Gravilla [kg] :	51.97
Arena [kg] :	37.63

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.34
Volumen [l] :	8.024

Resultados de exudación

Peso muestra [kg]	7.57
-------------------	------

Tiempo	Agua exudada [ml]
150 [min]	-
180 [min]	-
210 [min]	-
240 [min]	-
270 [min]	-

Observaciones
Exudación: Peso molde 7: 1.43 kg

Muestra:	0.5 - 20 %P - E
Fecha :	14-08-2009
Peso total:	2362.2
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.5
Tipo de probetas :	5 cúbicas/1 RILEM
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56 / 28
Tipo de curado:	Piscina

Temperatura del ambiente [°C] :	19.4
Temperatura del hormigón [°C] :	18.8

Resultados Densidad de Pasta

Peso muestra [kg] :	1.81
Volumen [l] :	1.005

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	15:03
Asentamiento de cono [cm] :	7

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	1.3
-------------------------	-----

Tiempo	Agua exudada [ml]
Hora inicio	15:15
30 [min]	6.5
60 [min]	9
90 [min]	10
120 [min]	-

Dosificación por colada de pasta	
Agua [kg] :	5.11
Material Cementicio [kg] :	11.01
Peso total [kg]:	27.83
Peso primera colada [kg]:	14.86
Peso segunda colada [kg]	12.97

Dosificación hormigón	
Agua [kg] :	8.82
Material Cementicio [kg] :	19.01
Gravilla [kg] :	51.97
Arena [kg] :	37.63

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.2
Volumen [l] :	8.024

Resultados de exudación

Peso muestra [kg]	7.69
-------------------	------

Tiempo	Agua exudada [ml]
150 [min]	-
180 [min]	-
210 [min]	-
240 [min]	-
270 [min]	-

Observaciones
Exudación: Peso molde 32: 1.43 kg

Muestra:	0.5 - 40 %P - E
Fecha :	14-08-2009
Peso total:	2350.5
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.5
Tipo de probetas :	5 cúbicas/1 RILEM
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56 / 28
Tipo de curado:	Piscina

Temperatura del ambiente [°C] :	19.4
Temperatura del hormigón [°C] :	18.9

Resultados Densidad de Pasta

Peso muestra [kg] :	1.76
Volumen [l] :	1.005

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	15:40
Asentamiento de cono [cm] :	6

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	1.4
-------------------------	-----

Tiempo	Agua exudada [ml]
Hora inicio	15:48
30 [min]	5
60 [min]	6.5
90 [min]	7.5
120 [min]	-

Dosificación por colada de pasta	
Agua [kg] :	5.00
Material Cementicio [kg] :	10.78
Peso total [kg]:	27.25
Peso primera colada [kg]:	14.98
Peso segunda colada [kg]	12.27

Dosificación hormigón	
Agua [kg] :	8.63
Material Cementicio [kg] :	18.62
Gravilla [kg] :	51.97
Arena [kg] :	37.63

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.03
Volumen [l] :	8.024

Resultados de exudación

Peso muestra [kg]	7.29
-------------------	------

Tiempo	Agua exudada [ml]
150 [min]	-
180 [min]	-
210 [min]	-
240 [min]	-
270 [min]	-

Observaciones
Exudación: Peso molde 6: 1.47 kg

Muestra:	0.6 - 0 %P - E
Fecha :	14-08-2009
Peso total:	2388.3
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.6
Tipo de probetas :	5 cúbicas/1 RILEM
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56 / 28
Tipo de curado:	Piscina

Temperatura del ambiente [°C] :	19.4
Temperatura del hormigón [°C] :	18.7

Resultados Densidad de Pasta

Peso muestra [kg] :	1.76
Volumen [l] :	1.005

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	16:58
Asentamiento de cono [cm] :	8.5

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	0.9
-------------------------	-----

Tiempo	Agua exudada [ml]
Hora inicio	17:13
30 [min]	10.5
60 [min]	12.5
90 [min]	13
120 [min]	-

Dosificación por colada de pasta	
Agua [kg] :	4.98
Material Cementicio [kg] :	9.01
Peso total [kg]:	23.66
Peso primera colada [kg]:	13.72
Peso segunda colada [kg]	9.94

Dosificación hormigón	
Agua [kg] :	8.42
Material Cementicio [kg] :	15.24
Gravilla [kg] :	55.12
Arena [kg] :	39.91

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.41
Volumen [l] :	8.024

Resultados de exudación

Peso muestra [kg]	6.88
-------------------	------

Tiempo	Agua exudada [ml]
150 [min]	-
180 [min]	-
210 [min]	-
240 [min]	-
270 [min]	-

Observaciones
Exudación: Peso molde 28: 1.47 kg

Muestra:	0.6 - 20 %P - E
Fecha :	14-08-2009
Peso total:	2379.2
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.6
Tipo de probetas :	5 cúbicas/1 RILEM
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56 / 28
Tipo de curado:	Piscina

Temperatura del ambiente [°C] :	19.4
Temperatura del hormigón [°C] :	17.8

Resultados Densidad de Pasta

Peso muestra [kg] :	1.7
Volumen [l] :	1.005

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	17:48
Asentamiento de cono [cm] :	7.5

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	1
-------------------------	---

Tiempo	Agua exudada [ml]
Hora inicio	18:06
30 [min]	8
60 [min]	10.5
90 [min]	11
120 [min]	-

Dosificación por colada de pasta	
Agua [kg] :	4.88
Material Cementicio [kg] :	8.84
Peso total [kg]:	23.21
Peso primera colada [kg]:	13.44
Peso segunda colada [kg]	9.77

Dosificación hormigón	
Agua [kg] :	8.25
Material Cementicio [kg] :	14.96
Gravilla [kg] :	55.12
Arena [kg] :	39.91

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.24
Volumen [l] :	8.024

Resultados de exudación

Peso muestra [kg]	7.42
-------------------	------

Tiempo	Agua exudada [ml]
150 [min]	-
180 [min]	-
210 [min]	-
240 [min]	-
270 [min]	-

Observaciones
Exudación: Peso molde 25: 1.41 kg

Muestra:	0.6 - 40 %P - E
Fecha :	14-08-2009
Peso total:	2370.37
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.6
Tipo de probetas :	5 cúbicas/1 RILEM
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56 / 28
Tipo de curado:	Piscina

Temperatura del ambiente [°C] :	19.4
Temperatura del hormigón [°C] :	18.6

Resultados Densidad de Pasta

Peso muestra [kg] :	1.67
Volumen [l] :	1.005

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	18:45
Asentamiento de cono [cm] :	6.5

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	1.1
-------------------------	-----

Tiempo	Agua exudada [ml]
Hora inicio	18:56
30 [min]	6.5
60 [min]	8.5
90 [min]	9
120 [min]	-

Dosificación por colada de pasta	
Agua [kg] :	4.78
Material Cementicio [kg] :	8.68
Peso total [kg]:	22.77
Peso primera colada [kg]:	12.97
Peso segunda colada [kg]	9.80

Dosificación hormigón	
Agua [kg] :	8.09
Material Cementicio [kg] :	14.68
Gravilla [kg] :	55.12
Arena [kg] :	39.91

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.11
Volumen [l] :	8.024

Resultados de exudación

Peso muestra [kg]	7.31
-------------------	------

Tiempo	Agua exudada [ml]
150 [min]	-
180 [min]	-
210 [min]	-
240 [min]	-
270 [min]	-

Observaciones
Exudación: Peso molde : 1.4 kg

Muestra:	0.5 - 0 %P - E - T
Fecha :	24-08-2009
Peso total:	2374.32
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.5
Tipo de probetas :	5 cúbicas
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56
Tipo de curado:	Piscina

Dosificación por colada de pasta	
Agua [kg] :	7.01
Material Cementicio [kg] :	14.02
Peso total [kg]:	17.47

Dosificación hormigón	
Agua [kg] :	5.82
Material Cementicio [kg] :	11.65
Gravilla [kg] :	31.18
Arena [kg] :	22.58

Temperatura del ambiente [°C] :	18.2
Temperatura del hormigón [°C] :	33.1
Temperatura arena [°C] :	80
Temperatura gravilla [°C] :	66

Resultados Densidad de Pasta

Peso muestra [kg] :	1.83
Volumen [l] :	1.005

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	15:55
Asentamiento de cono [cm] :	9.5

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.5
Volumen [l] :	8.024

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	1
-------------------------	---

Observaciones

Muestra:	0.5 - 20 %P - E - T
Fecha :	24-08-2009
Peso total:	2362.18
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.5
Tipo de probetas :	5 cúbicas
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56
Tipo de curado:	Piscina

Dosificación por colada de pasta	
Agua [kg] :	6.86
Material Cementicio [kg] :	13.76
Peso total [kg]:	17.11

Dosificación hormigón	
Agua [kg] :	5.70
Material Cementicio [kg] :	11.40
Gravilla [kg] :	31.18
Arena [kg] :	22.58

Temperatura del ambiente [°C] :	18.1
Temperatura del hormigón [°C] :	38.2
Temperatura arena [°C] :	87.9
Temperatura gravilla [°C] :	67.5

Resultados Densidad de Pasta

Peso muestra [kg] :	1.79
Volumen [l] :	1.005

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	17:52
Asentamiento de cono [cm] :	7

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.3
Volumen [l] :	8.024

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	1.2
-------------------------	-----

Observaciones

Muestra:	0.5 - 40 %P - E - T
Fecha :	24-08-2009
Peso total:	2350.53
Cono de diseño [cm]:	12 - 16
Razón agua/material cementicio	0.5
Tipo de probetas :	5 cúbicas
Edades de ensayo [días] :	7,28 y 56
Tipo de curado:	Piscina

Dosificación por colada de pasta	
Agua [kg] :	6.72
Material Cementicio [kg] :	13.48
Peso total [kg]:	16.76

Dosificación hormigón	
Agua [kg] :	5.59
Material Cementicio [kg] :	11.17
Gravilla [kg] :	31.18
Arena [kg] :	22.58

Temperatura del ambiente [°C] :	18.3
Temperatura del hormigón [°C] :	32.6
Temperatura arena [°C] :	76.1
Temperatura gravilla [°C] :	66.4

Resultados Densidad de Pasta

Peso muestra [kg] :	1.74
Volumen [l] :	1.005

Resultados Cono de Abrams

Hora asentamiento :	17:53
Asentamiento de cono [cm] :	3.5

Resultados Densidad

Peso muestra [kg] :	19.15
Volumen [l] :	8.024

Resultados Contenido de Aire

Contenido de aire [%] :	1.3
-------------------------	-----

Observaciones

ANEXO III

PLANILLAS DE ENSAYO DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

Muestra : 0.4 - 0 %P - C

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	30-07-2009	8.24	150	150	149	150	150	150	150	150	864
2	28	20-08-2009	8.23	150	150	149	149	150	150	150	150	1535
3	28	20-08-2009	8.21	150	150	149	149	150	150	150	150	1515
4	56	17-09-2009	8.30	150	150	151	149	150	150	150	150	1787
5	56	17-09-2009	8.23	150	150	150	150	150	150	150	150	1764

Resultado ensayo a flexión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	20-08-2009	4.928
2	28	20-08-2009	4.766
3	28	20-08-2009	5.098

Resultado ensayo a compresión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	20-08-2009	126.8
			117.4
2	28	20-08-2009	120.2
			125.0
3	28	20-08-2009	114.1
			119.4

Muestra : 0.4 - 20 %P - C

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	30-07-2009	8.17	150	150	150	150	150	150	150	150	728
2	28	20-08-2009	8.22	150	150	149	149	150	150	150	150	1284
3	28	20-08-2009	8.23	150	150	150	150	150	150	150	150	1322
4	56	17-09-2009	8.22	150	150	151	151	150	150	150	150	1574
5	56	17-09-2009	8.18	150	150	150	149	150	150	150	150	1578

Resultado ensayo a flexión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	20-08-2009	4.162
2	28	20-08-2009	4.404
3	28	20-08-2009	4.239

Resultado ensayo a compresión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	20-08-2009	97.5
			97.4
2	28	20-08-2009	97.8
			91.4
3	28	20-08-2009	102.3
			97.4

Muestra : 0.4 - 40 %P - C

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	30-07-2009	8.06	150	150	151	151	150	150	150	150	526
2	28	20-08-2009	8.04	150	150	149	149	150	150	150	150	965
3	28	20-08-2009	8.04	150	150	149	150	150	150	150	150	950
4	56	17-09-2009	8.04	150	150	151	151	150	150	150	150	1174
5	56	17-09-2009	8.09	150	150	151	149	150	150	150	150	1187

Resultado ensayo a flexión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	20-08-2009	3.644
2	28	20-08-2009	3.436
3	28	20-08-2009	3.483

Resultado ensayo a compresión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	20-08-2009	78.1
			76.3
2	28	20-08-2009	73.4
			73.1
3	28	20-08-2009	76.6
			75.6

Muestra : 0.5 - 0 %P - C

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	28-07-2009	8.30	150	150	150	150	150	150	150	150	598
2	28	18-08-2009	8.20	150	150	148	148	150	150	150	150	1111
3	28	18-08-2009	8.30	150	150	151	149	150	150	150	150	1100
4	56	15-09-2009	8.29	150	150	148	148	150	150	150	150	1400
5	56	15-09-2009	8.23	150	150	150	149	150	150	150	150	1282

Resultado ensayo a flexión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	18-08-2009	4.432
2	28	18-08-2009	4.203
3	28	18-08-2009	4.449

Resultado ensayo a compresión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	18-08-2009	99.7
			98.2
2	28	18-08-2009	99.8
			94.1
3	28	18-08-2009	99.1
			98.2

Muestra : 0.5 - 20 %P - C

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	28-07-2009	8.20	150	150	150	150	150	150	150	150	455
2	28	18-08-2009	8.23	150	150	148	148	150	150	150	150	929
3	28	18-08-2009	8.23	150	150	149	150	150	150	150	150	932
4	56	15-09-2009	8.26	150	150	150	151	150	150	150	150	1160
5	56	15-09-2009	8.18	150	150	149	150	150	150	150	150	1122

Resultado ensayo a flexión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	18-08-2009	3.418
2	28	18-08-2009	3.589
3	28	18-08-2009	3.749

Resultado ensayo a compresión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	18-08-2009	76.0
			77.6
2	28	18-08-2009	73.6
			73.3
3	28	18-08-2009	78.6
			79.2

Muestra : 0.5 - 40 %P - C

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	28-07-2009	8.12	150	150	150	150	150	150	150	150	313
2	28	18-08-2009	8.14	150	150	149	149	150	150	150	150	657
3	28	18-08-2009	8.20	150	150	150	150	150	150	150	150	621
4	56	15-09-2009	8.25	150	150	151	151	150	150	150	150	856
5	56	15-09-2009	8.20	150	150	151	151	150	150	150	150	845

Resultado ensayo a flexión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	18-08-2009	2.926
2	28	18-08-2009	2.654
3	28	18-08-2009	2.658

Resultado ensayo a compresión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	18-08-2009	50.5
			50.9
2	28	18-08-2009	51.4
			50.2
3	28	18-08-2009	51.2
			51.6

Muestra : 0.6 - 0 %P - C

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	31-07-2009	8.18	150	150	149	149	150	150	150	150	377
2	28	21-08-2009	8.24	150	150	151	151	150	150	150	150	817
3	28	21-08-2009	8.32	150	150	151	151	150	150	150	150	768
4	56	18-09-2009	8.28	150	150	150	150	150	150	150	150	948
5	56	18-09-2009	8.30	150	150	150	150	150	150	150	150	973

Resultado ensayo a flexión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	21-08-2009	3.542
2	28	21-08-2009	3.504
3	28	21-08-2009	3.304

Resultado ensayo a compresión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	21-08-2009	72.1
			68.1
2	28	21-08-2009	67.4
			71.5
3	28	21-08-2009	71.7
			72.1

Muestra : 0.6 - 20 %P - C

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	31-07-2009	8.24	150	150	149	151	150	150	150	150	298
2	28	21-08-2009	8.32	150	150	150	152	150	150	150	150	649
3	28	21-08-2009	8.27	150	150	150	150	150	150	150	150	670
4	56	18-09-2009	8.23	150	150	150	150	150	150	150	150	808
5	56	18-09-2009	8.29	150	150	150	150	150	150	150	150	834

Resultado ensayo a flexión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	21-08-2009	3.052
2	28	21-08-2009	3.234
3	28	21-08-2009	2.830

Resultado ensayo a compresión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	21-08-2009	53.2
			53.9
2	28	21-08-2009	53.8
			54.7
3	28	21-08-2009	53.6
			53.2

Muestra : 0.6 - 40 %P - C

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	31-07-2009	8.24	150	150	151	151	150	150	150	150	229
2	28	21-08-2009	8.25	150	150	151	150	150	150	150	150	479
3	28	21-08-2009	8.30	150	150	152	151	150	150	150	150	476
4	56	18-09-2009	8.24	150	150	150	150	150	150	150	150	617
5	56	18-09-2009	8.27	150	150	150	150	150	150	150	150	597

Resultado ensayo a flexión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	21-08-2009	2.278
2	28	21-08-2009	2.286
3	28	21-08-2009	2.238

Resultado ensayo a compresión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	21-08-2009	34.6
			35.1
2	28	21-08-2009	33.7
			35.0
3	28	21-08-2009	34.2
			33.9

Muestra : 0.4 - 0 %P - E

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	18-08-2009	8.27	150	150	149	150	150	150	150	150	1016
2	28	08-09-2009	8.40	150	150	150	151	150	150	150	150	1576
3	28	08-09-2009	8.35	150	150	149	150	150	150	150	150	1559
4	56	06-10-2009	8.41	150	150	150	150	150	150	150	150	1841
5	56	06-10-2009	8.34	150	150	149	149	150	150	150	150	1761

Resultado ensayo a flexión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	08-09-2009	5.276
2	28	08-09-2009	4.995
3	28	08-09-2009	4.928

Resultado ensayo a compresión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	08-09-2009	121.8
			123.8
2	28	08-09-2009	119.7
			124.2
3	28	08-09-2009	123.6
			118.7

Muestra : 0.4 - 20 %P - E

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	18-08-2009	8.22	150	150	149	149	150	150	150	150	856
2	28	08-09-2009	8.19	150	150	150	150	150	150	150	150	1310
3	28	08-09-2009	8.22	150	150	150	150	150	150	150	150	1395
4	56	06-10-2009	8.25	150	150	149	150	150	150	150	150	1590
5	56	06-10-2009	8.18	150	150	150	150	150	150	150	150	1598

Resultado ensayo a flexión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	08-09-2009	4.438
2	28	08-09-2009	4.438
3	28	08-09-2009	4.385

Resultado ensayo a compresión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	08-09-2009	102.1
			99.2
2	28	08-09-2009	105.1
			100.2
3	28	08-09-2009	103.8
			98.5

Muestra : 0.4 - 40 %P - E

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	18-08-2009	8.05	150	151	148	149	150	150	150	150	609
2	28	08-09-2009	8.16	150	150	150	150	150	150	150	150	1050
3	28	08-09-2009	8.13	150	150	150	151	150	150	150	150	1046
4	56	06-10-2009	8.09	150	150	149	149	150	150	150	150	1228
5	56	06-10-2009	8.10	150	150	150	150	150	150	150	150	1234

Resultado ensayo a flexión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	08-09-2009	3.696
2	28	08-09-2009	3.796
3	28	08-09-2009	3.742

Resultado ensayo a compresión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	08-09-2009	80.3
			81.2
2	28	08-09-2009	76.0
			77.7
3	28	08-09-2009	78.6
			78.1

Muestra : 0.5 - 0 %P - E

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	21-08-2009	8.36	150	150	151	151	150	150	150	150	679
2	28	11-09-2009	8.40	150	150	151	152	150	150	150	150	1152
3	28	11-09-2009	8.32	150	150	150	150	150	150	150	150	1134
4	56	10-10-2009	8.37	150	150	151	151	150	150	150	150	1367
5	56	10-10-2009	8.35	150	150	150	150	150	150	150	150	1338

Resultado ensayo a flexión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	11-09-2009	4.576
2	28	11-09-2009	4.320
3	28	11-09-2009	4.363

Resultado ensayo a compresión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	11-09-2009	98.2
			97.5
2	28	11-09-2009	98.1
			99.1
3	28	11-09-2009	97.5
			99.3

Muestra : 0.5 - 20 %P - E

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	21-08-2009	8.32	150	150	151	152	150	150	150	150	521
2	28	11-09-2009	8.34	150	150	150	151	150	150	150	150	982
3	28	11-09-2009	8.28	150	150	149	150	150	150	150	150	944
4	56	10-10-2009	8.36	150	150	150	150	150	150	150	150	1199
5	56	10-10-2009	8.40	150	150	150	150	150	150	150	150	1120

Resultado ensayo a flexión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	11-09-2009	3.831
2	28	11-09-2009	3.685
3	28	11-09-2009	3.529

Resultado ensayo a compresión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	11-09-2009	76.3
			76.9
2	28	11-09-2009	79.7
			77.4
3	28	11-09-2009	76.0
			77.5

Muestra : 0.5 - 40 %P - E

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	21-08-2009	8.24	150	150	151	152	150	150	150	150	347
2	28	11-09-2009	8.17	150	150	150	151	150	150	150	150	645
3	28	11-09-2009	8.31	150	150	151	151	150	150	150	150	741
4	56	10-10-2009	8.21	150	150	150	150	150	150	150	150	821
5	56	10-10-2009	8.29	150	150	149	150	150	150	150	150	857

Resultado ensayo a flexión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	11-09-2009	2.964
2	28	11-09-2009	2.687
3	28	11-09-2009	2.777

Resultado ensayo a compresión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	11-09-2009	53.2
			53.5
2	28	11-09-2009	54.4
			52.5
3	28	11-09-2009	52.8
			51.5

Muestra : 0.6 - 0 %P - E

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	21-08-2009	8.24	150	150	151	150	150	150	150	150	437
2	28	11-09-2009	8.31	150	150	150	149	150	150	150	150	805
3	28	11-09-2009	8.26	150	150	149	149	150	150	150	150	800
4	56	10-10-2009	8.33	150	150	150	150	150	150	150	150	953
5	56	10-10-2009	8.38	150	150	151	150	150	150	150	150	968

Resultado ensayo a flexión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	11-09-2009	3.552
2	28	11-09-2009	3.594
3	28	11-09-2009	3.571

Resultado ensayo a compresión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	11-09-2009	70.2
			72.8
2	28	11-09-2009	71.8
			70.6
3	28	11-09-2009	67.5
			69.6

Muestra : 0.6 - 20 %P - E

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	21-08-2009	8.21	150	150	151	150	150	150	150	150	337
2	28	11-09-2009	8.27	150	150	149	150	150	150	150	150	667
3	28	11-09-2009	8.24	150	150	149	151	150	150	150	150	679
4	56	10-10-2009	8.19	150	150	150	150	150	150	150	150	846
5	56	10-10-2009	8.23	150	150	150	150	150	150	150	150	782

Resultado ensayo a flexión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	11-09-2009	3.003
2	28	11-09-2009	3.010
3	28	11-09-2009	3.045

Resultado ensayo a compresión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	11-09-2009	55.7
			56.7
2	28	11-09-2009	53.3
			55.8
3	28	11-09-2009	52.3
			53.9

Muestra : 0.6 - 40 %P - E

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	21-08-2009	8.15	150	150	152	151	150	150	150	150	257
2	28	11-09-2009	8.25	150	150	150	151	150	150	150	150	485
3	28	11-09-2009	8.23	150	150	151	151	150	150	150	150	496
4	56	10-10-2009	8.19	150	150	150	151	150	150	150	150	584
5	56	10-10-2009	8.26	150	150	150	150	150	150	150	150	636

Resultado ensayo a flexión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	11-09-2009	2.427
2	28	11-09-2009	2.404
3	28	11-09-2009	2.064

Resultado ensayo a compresión probetas RILEM

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Carga máxima [kN]
1	28	11-09-2009	34.8
			34.5
2	28	11-09-2009	35.1
			35.4
3	28	11-09-2009	34.5
			35.9

Muestra : 0.5 - 0 %P - E - T

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	31-08-2009	8.28	150	150	149	150	150	150	150	150	564
2	28	21-09-2009	8.36	150	150	149	150	150	150	150	150	946
3	28	21-09-2009	8.33	150	150	150	150	150	150	150	150	961
4	56	19-10-2009	8.34	150	150	150	151	150	150	150	150	1009
5	56	19-10-2009	8.30	150	150	150	150	150	150	150	150	1045

Muestra : 0.5 - 20 %P - E - T

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	31-08-2009	8.27	150	150	149	150	150	150	150	150	464
2	28	21-09-2009	8.34	150	150	150	151	150	150	150	150	857
3	28	21-09-2009	8.26	150	150	150	151	150	150	150	150	867
4	56	19-10-2009	8.33	150	150	150	151	150	150	150	150	916
5	56	19-10-2009	8.34	150	150	151	151	150	150	150	150	942

Muestra : 0.5 - 40 %P - E - T

Resultados ensayo de probetas cúbicas a compresión

N°	Edad de ensayo [días]	Fecha	Peso [kg]	Dimensiones [mm]								Carga máxima [kN]
				a1	a2	b1	b2	h1	h2	h3	h4	
1	7	31-08-2009	8.30	150	150	151	151	150	150	150	150	341
2	28	21-09-2009	8.32	150	150	152	152	150	150	150	150	705
3	28	21-09-2009	8.34	150	150	151	152	150	150	150	150	677
4	56	19-10-2009	8.31	150	150	152	151	150	150	150	150	716
5	56	19-10-2009	8.30	150	150	152	151	150	150	150	150	774