



Facultad de Ingeniería
Escuela de Construcción Civil

Factibilidad de emplear mezclas cal-puzolana como reemplazo parcial del cemento en hormigones

Por:

Bruno Andrés Peruzzi Mejías

Tesis para optar al grado de Licenciado en Ciencias de la Construcción y al Título de Ingeniero
Constructor

Profesor Guía: Juan Egaña Ramos

ABRIL, 2018

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profunda y sinceramente:

A mi profesor guía Juan Egaña Ramos, por su constante ayuda, buena disposición y dedicación.

A Andrea Fazzini de Melon S.A., por donar la puzolana necesaria.

A todos los laboratoristas, que siempre tuvieron buena disposición.

A todos los compañeros de laboratorio que prestaron su ayuda.

A mi familia y a Dios por su apoyo incondicional.

RESUMEN

Muchos estudios se han estado enfocando en encontrar alternativas las cuales pueden ser utilizadas como materiales reemplazantes de cemento, ya sea para disminuir costos o para reducir el impacto ambiental. Este trabajo tiene por objetivo estudiar la influencia de mezclas cal - puzolana como conglomerante en reemplazo parcial del cemento en el hormigón. Se proponen 3 mezclas de cal-puzolana en distintas proporciones en peso (80P+20C; 60P+40C; 50P+50C) y 3 porcentajes de reemplazo parcial de cemento (10, 30 y 50%), teniendo un total de 9 amasadas más un patrón para comparar resultados. Se evaluó el desarrollo de resistencias llevando a cabo ensayos a los 3, 7, 28 y 56 días, y se obtuvo que a medida que aumenta el reemplazo parcial de cemento por mezclas cal puzolana disminuye la resistencia a compresión del hormigón, donde en el caso más desfavorable se obtuvo una reducción del orden de un 73%. Los hormigones resultaron con una significativa reducción en su porosidad, del orden de un 44% como máximo, por lo que serían más durables. Se estima que la mezcla 80P+20C en un reemplazo de 10% es factible.

ABSTRACT

Too many studies have been focus on finding alternatives which can be used as supplementary cementitious materials, to reduce cost or ambient contaminations. This work has the purpose of studying the influence of clay – puzzolan mixtures as a binder in partial replacement of cement on concrete. There are 3 clay - puzzolan mixtures, in different weight proportions (80P+20C; 60P+40C; 50P+50C) and 3 percentages of partial replacement of cement (10, 30 y 50%), getting a total of 9 mixtures and the pattern. It was evaluated compression resistance development performing trials at 3,7, 28, 56 days, and it was obtained that as more increment of partial replacement less compression resistance, on the worse case it was obtained a reduction of 73%. All concretes obtained a considerable reduction of porosity, in the order of 44% as maximum, so they would be more durable. It was estimated that the mixture of 80P+20C in a replacement of 10% is feasible.

INDICE

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS	5
Lista de Tablas.....	6
Lista de Figuras	7
CAPITULO I: ANTECEDENTES GENERALES	8
1.1 Introducción.....	9
1.2 Estado del Arte	9
1.3 Objetivos.....	12
1.3.1 Objetivo general	12
1.3.2 Objetivos específicos	12
1.4 Hipótesis	12
1.5 Alcances.....	12
1.6 Plan Metodológico.....	13
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	14
2.1 Definiciones.....	15
2.3 Cal.....	17
2.4 Puzolana	18
2.5 Docilidad	19
2.6 Resistencia a la compresión.....	19
CAPITULO III: METODOLOGÍA DE TRABAJO	20
3.1 Programa experimental.....	21
3.1.1 Materiales necesarios para la experiencia.	21
3.1.2 Diseño de la experiencia.....	21
3.1.3 Detalles experimentales	23
3.2 Metodología de ensayos	24
3.2.1 Determinación de la docilidad por el Método de asentamiento del cono de Abrams.	24
3.2.2 Ensayo de resistencia a la compresión en probetas cúbicas	25
3.2.3 Porosidad (Absorción de agua).....	26
CAPITULO IV: DESARROLLO EXPERIMENTAL	27
4.1 Tamizado y determinación de la granulometría.	28
4.1.1 Arena	28
4.1.2 Grava	30
4.1.3 Granulometría de Árido combinado	31
4.1.4 Granulometría de la Puzolana.....	32
4.2 Características físicas de los áridos y puzolana.....	33
4.3 Dosificación de hormigones	34
4.3.1 Dosificaciones teóricas.....	34
4.3.2 Dosificaciones reales	35
CAPITULO V: PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS	37
5.1 Ensayos de asentamiento	38

5.3 Resultados densidad aparente y porosidad (absorción de agua) del hormigón.	47
.....	
Figura 5.3.6 Gráfico relación Densidad aparente (50P+50C)	50
Figura 5.3.9 Gráfico porosidad 28 días, % (60P+40C)	52
Figura 5.3.11 Gráfico porosidad 28 días, % (50P+50C)	53
5.4 Resultados ensayos de compresión	54
CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y PROPUESTAS A FUTURAS INVESTIGACIONES.	
.....	62
6.1 Conclusiones.....	63
6.2 Propuestas a futuras investigaciones.	64
VII REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

cm: Centímetros

cm²: Centímetros cuadrados

°C: Grados Celsius

g: Gramos

IDIEM: Instituto de Investigación y Ensayos de Materiales

Kg: Kilogramos

Kgf_ Kilogramos fuerza

mm: Milímetros

mm²: Milímetros cuadrados

m³: Metros cúbicos

N: Newton

NCh: Norma Chilena

": Pulgadas

Seg: Segundo

MPa: Mega Pascal

Lista de Tablas

Tabla 4.1.1 Análisis granulométrico de la arena	28
Tabla 4.1.2 Análisis granulométrico de la grava	30
Tabla 4.1.3 Análisis granulométrico del árido combinado	31
Tabla 4.1.4 análisis granulométrico de la puzolana	32
Tabla 4.2.1 Características físicas de la Arena	33
Tabla 4.2.2 Características físicas de la Grava	33
Tabla 4.2.3 Características físicas de la Puzolana	33
Tabla 4.3.1.1 Dosificación teórica mezcla C-P 20%-80%	34
Tabla 4.3.1.2 Dosificación teórica mezcla C-P 40%-60%	34
Tabla 4.3.1.3 Dosificación teórica mezcla C-P 50%-50%	35
Tabla 4.3.2.1 Dosificación real mezcla C-P 20%-80% colada 55 litros	35
Tabla 4.3.2.2 Dosificación real mezcla C-P 40%-60% colada 55 litros	36
Tabla 4.3.2.3 Dosificación real mezcla C-P 50%-50% colada 55 litros	36
Tabla 5.1.1: Asentamiento y demanda de agua de cada amasada para mezcla C-P 20%-80%...	38
Tabla 5.1.2: Asentamiento y demanda de agua de cada amasada C-P 40%-60%	39
Tabla 5.1.3: Asentamiento y demanda de agua de cada amasada C-P 50%-50%	40
Tabla 5.2.1 Demanda de agua, por colada en relación a m3, relación agua – cemento para mezcla C-P 20%-80%	41
Tabla 5.2.2 Demanda de agua, por colada en relación a m3, relación agua – cemento para mezcla C-P 40%-60%	42
Tabla 5.2.3 Demanda de agua, por colada en relación a m3, relación agua – cemento para mezcla C-P 50%-50%	43
Tabla 5.3.1 Resultados densidad aparente y porosidad	47
Tabla 5.4.1 Resumen Resistencias a compresión	54
Tabla 5.4.2 Desarrollo de resistencias en el tiempo, %	58
Tabla 5.4.3 Correlación entre razón agua-cemento y resistencia a compresión	60

Lista de Figuras

Figura 4.1.1 Curva granulométrica promedio de la arena.....	29
Figura 4.1.2 Curva granulométrica promedio de la grava.....	30
Figura 4.1.3 Curva granulométrica del árido combinado.....	32
Figura 5.1.1: Gráfico de Asentamiento mezcla C-P 20%-80%	38
Figura 5.1.2: Gráfico de Asentamiento mezcla C-P 40%-60%	39
Figura 5.1.3: Gráfico de Asentamiento mezcla C-P 50%-50%	40
Figura 5.2.1: Gráfico relación agua cemento según % de reemplazo mezcla C-P 20%-80%	41
Figura 5.2.2: Gráfico relación agua cemento según % de reemplazo mezcla C-P 40%-60%	42
Figura 5.2.3: Gráfico relación agua cemento según % de reemplazo mezcla C-P 50%-50%	43
Figura 5.2.4: Gráfico Aumento de agua porcentual según % de reemplazo mezcla C-P 20%-80%.....	44
Figura 5.2.5: Gráfico aumento de agua porcentual según % de reemplazo mezcla C-P 40%-60%	45
Figura 5.2.6: Gráfico aumento de agua porcentual según % de reemplazo mezcla C-P 50%-50%.....	46
Figura 5.3.1 Gráfico Densidad Aparente (80P+20C).....	48
Figura 5.3.2 Gráfico relación Densidad aparente (80P+20C).....	48
Figura 5.3.3 Gráfico Densidad aparente (60P+40C).....	49
Figura 5.3.4 Gráfico relación Densidad aparente (60P+40C).....	49
Figura 5.3.5 Gráfico Densidad aparente (50P+50C)	50
Figura 5.3.6 Gráfico relación Densidad aparente (50P+50C)	50
Figura 5.3.7 Gráfico porosidad 28 días, % (80P+20C)	51
Figura 5.3.8 Gráfico relación Porosidad, % (80P+20C)	51
Figura 5.3.9 Gráfico porosidad 28 días, % (60P+40C).....	52
Figura 5.3.10 Gráfico relación Porosidad, % (60P+40C)	52
Figura 5.3.11 Gráfico porosidad 28 días, % (50P+50C).....	53
Figura 5.3.12 Gráfico relación Porosidad, % (50P+50C).....	53
Figura 5.4.1: Resistencia a compresión Mezcla 80P+20C.....	55
Figura 5.4.2: Resistencia a compresión Mezcla 60P+40C.....	55
Figura 5.4.3: Resistencia a compresión Mezcla 50P+50C.....	56
Figura 5.4.4: Resistencias relativas a compresión Mezcla 80P+20C.....	56
Figura 5.4.5: Resistencias relativas a compresión Mezcla 60P+40C.....	57
Figura 5.4.6: Resistencias relativas a compresión Mezcla 50P+50C.....	57
Figura 5.4.7: Desarrollo de resistencias en el tiempo, Mezcla 80P+20C.....	59
Figura 5.4.8: Desarrollo de resistencias en el tiempo, Mezcla 60P+40C.....	59
Figura 5.4.9: Desarrollo de resistencias en el tiempo, Mezcla 50P+50C.....	60
Figura 5.4.10 Regresión lineal.....	61

CAPITULO I: ANTECEDENTES GENERALES

1.1 Introducción

La demanda siempre creciente por la construcción de obras de infraestructura y de viviendas trae aparejada una demanda, también creciente, de hormigón y, por tanto, de cemento. La producción de cemento que, a nivel global, está incrementándose permanentemente, requiere de un significativo consumo de energía y genera la producción de grandes cantidades de gases de efecto invernadero, en particular, la emisión de CO₂. Si fuese posible reducir las cantidades de cemento como conglomerante para la fabricación de hormigones, se podrían reducir tanto el consumo energético como las emisiones perjudiciales para el medio ambiente. Puede ser interesante entonces, abordar el estudio del empleo de otros materiales que pudiesen actuar como conglomerantes, sustituyendo parcialmente al cemento en la confección de hormigones.

El tema que se propone consiste en estudiar el comportamiento de mezclas cal – puzolana al ser empleadas como reemplazo parcial del cemento en hormigones. Es conocido el hecho de que las puzolanas, al encontrarse finamente molidas, en presencia de agua y a la temperatura ambiente, pueden reaccionar, o ser activadas, con el hidróxido de calcio para formar compuestos cementantes; es por ello que se estima que al emplear mezclas cal – puzolana éstas podrían contribuir como conglomerantes, colaborando no sólo en la obtención de resistencias, sino también, en la durabilidad del hormigón, probablemente disminuyendo el costo al emplear menor cantidad de cemento en las mezclas.

1.2 Estado del Arte

En los últimos años se han intensificado las investigaciones relacionadas con el mejoramiento de los materiales utilizados en obras de ingeniería, con el objetivo de mejorar sus propiedades y economizar su costo de fabricación y los que su utilización implique. (Aguilar, 2007).

La demanda siempre creciente por la construcción de obras de infraestructura y de viviendas trae aparejada una demanda, también creciente, de hormigón y, por tanto, de cemento. Muchos estudios se han estado enfocando en encontrar alternativas para ser usadas como materiales reemplazantes de cemento, ya sea para abaratar costos o para disminuir el impacto ambiental. Los materiales que pueden reemplazar el cemento, pueden provenir de diferentes fuentes, tales como: agrícolas, industriales, etc. (Aprianti S, 2017)

Los materiales cementantes suplementarios son a menudo agregados al hormigón para hacerlos más económicos, reducir permeabilidad, aumentar resistencia o influenciar otras propiedades. (Hamblen, 2017)

Se define material cementante suplementario como aquellos materiales de carácter reactivo (puzolánicos o hidráulicos)(Payá, 2005). Las combinaciones de CP:CSM (cemento portland : material cementante suplementario) conducen a sistemas más complejos que solo cemento portland. Las propiedades de estos sistemas se centran en los aspectos mecánicos o durabilidad (Lothenbach et ál., 2011).

Cuando se sustituye parte del cemento portland por materiales cementantes suplementarios, cada una de estas adiciones opera de una manera diferente pero cooperativa, de acuerdo con su tamaño de partícula y actividad física, puzolánica, hidráulica o combinaciones de las tres en relación con sus interacciones con la pasta de cemento (Isaia et ál., 2003).

Melhorta & Mehta, (1996), definen la puzolana como material siliceoaluminoso, el cual posee por si baja o nula capacidad cementante, pero que, finamente dividido y en presencia de humedad reacciona químicamente con hidróxido cálcico, Ca(OH)_2 , a temperatura ambiente, generando compuestos de propiedades cementantes.

En hormigones de resistencias normales, las puzolanas son añadidas para reducir los costos y mejorar los valores de resistencia y durabilidad de la masa endurecida. (Singh, 2000).

Según Donatello et ál.,(2013), la sustitución parcial de cemento portland por materiales puzolánicos, generalmente de 5% a 30% en masa, se ha demostrado que mejoran las propiedades de durabilidad de los cementos mezclados.

La mejora de durabilidad de materiales cementantes suplementarios puzolánicos se atribuye en gran parte a la reacción puzolánica, donde las fases reactivas silíceas y aluminosas reaccionan con la portlandita para formar nuevas fases de tipo C-S-H o A-S-C-H, provocando un refinamiento en la estructura de poros.(Donatello et ál., 2013).

Muchos autores señalan que la reacción puzolánica es beneficiosa para el hormigón, aumenta la cantidad de C-S-H, y en menor medida, hidratos de aluminato de calcio, reduciendo la permeabilidad del sistema. También se conoce que mejoran la resistencia a mediano y largo plazo. (Calabuig, 2015).

Según Payá (2005), los productos de la reacción puzolánica que más contribuyen al desarrollo de resistencias mecánicas son los silicatos cálcicos hidratados (C-S-H) y los silicoaluminatos cálcicos hidratados (A-S-C-H).

Según Lorca et ál., (2014) el reemplazo parcial de cemento Portland por puzolanas, tiene sus limitaciones debido a la cantidad de hidróxido de calcio generado en la mezcla. Estos autores consiguen mejorar los sistemas CP:CV (cemento portland: cenizas volantes), añadiendo cal hidratada, abriendo la posibilidad de aumentar adiciones y mejorar la durabilidad de estos hormigones.

La cal ha sido un material de construcción primario desde aproximadamente 10000 años a.c. y podría ser uno de los primeros nanomateriales utilizados por la humanidad. (Rodríguez et ál., 2005). En la actualidad las "cales de construcción" según (UNE-EN-459-1, 2011), son utilizadas como conglomerantes para preparar morteros. Las propiedades que aporta son: en mortero fresco plasticidad, viscosidad y retención de agua; y en mortero endurecido, resistencia mecánica por reacción puzolánica y carbonatación.

Según Mehta (1993), el CaO o cal libre rara vez está presente en cantidades significativas en los cementos portland modernos.

La presencia de cal adicional, reduce el riesgo de auto neutralización, aun para grandes volúmenes de sustitución. La presencia de cal incrementa la concentración de iones Ca^{2+} , lo anterior se fundamenta en su contribución temprana en la formación de productos de reacción. La presencia de cal conduce al incremento de iones OH^- , cuya tarea es romper los enlaces silicios en la puzolana, y con ello acelerar el comienzo de la reacción puzolánica.

(Arezoumandi et ál., 2013). Utilizó cal hidratada como componente de sistemas CP: CV con bajo contenido de cemento portland. En estos sistemas la cal mejora la hidratación de la ceniza volante aumentando la resistencia mecánica y la durabilidad.

Al sustituir porcentajes de cemento por cal hidráulica al hormigón, siendo un material que posee una finura considerablemente mayor que las de los otros componentes del hormigón, produce un aumento significativo de la impermeabilidad. (Riquelme, 2011).

Con respecto al impacto medio ambiental, la cal hidratada tiene un impacto de 0,78 respecto del cemento portland. (Argüelo & Cuchi, 2008).

Durante el mezclado, las finas partículas de cal ocupan los espacios vacíos entre los granos de cemento y limitan el flujo de agua, de este modo incrementan la retención de agua en el hormigón fresco, actuando como un agente dispersante que previene la floculación e incrementa la plasticidad de la mezcla. (Swamy, 1986).

El problema de la permeabilidad en el hormigón como en cualquier material poroso es un problema bastante complejo, donde influyen, entre otros, los principios de absorción, capilaridad, presiones y difusión de vapor. La permeabilidad y consecuentemente la durabilidad del hormigón dependen de la presencia de poros en la matriz cementicia. Cuando los poros están conectados entre sí generan una porosidad continua, originando así un material permeable y, por lo tanto deteriorable en ambientes agresivos. La solución al problema se logra generando un material con una porosidad discontinua, que no permita la penetración de agentes agresivos (Afadi, 1999).

Es conocido el hecho de que las puzolanas, al encontrarse finamente molidas, en presencia de agua y a la temperatura ambiente, pueden reaccionar, o ser activadas, con el hidróxido de calcio para formar compuestos cementantes; es por ello que se estima que al emplear mezclas cal – puzolana éstas podrían contribuir como conglomerantes, colaborando no sólo en la obtención de resistencias, sino también, en la durabilidad del hormigón, disminuyendo el costo al emplear menor cantidad de cemento en las mezclas.

Mediante la presente investigación se pretende estudiar la influencia de diversas dosis de mezclas cal-puzolana sobre el comportamiento resistente, a la compresión, del hormigón.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Estudiar la factibilidad de emplear mezclas cal-puzolana como reemplazo parcial del cemento en hormigones.

1.3.2 Objetivos específicos

- Evaluar los cambios que puede producir la sustitución parcial de cemento por mezclas cal – puzolana sobre el desarrollo de resistencias en el tiempo y sobre la resistencia final, a compresión, del hormigón.
- Evaluar los cambios que puede producir la sustitución parcial de cemento por mezclas cal-puzolana sobre la porosidad y densidad aparente del hormigón.

1.4 Hipótesis

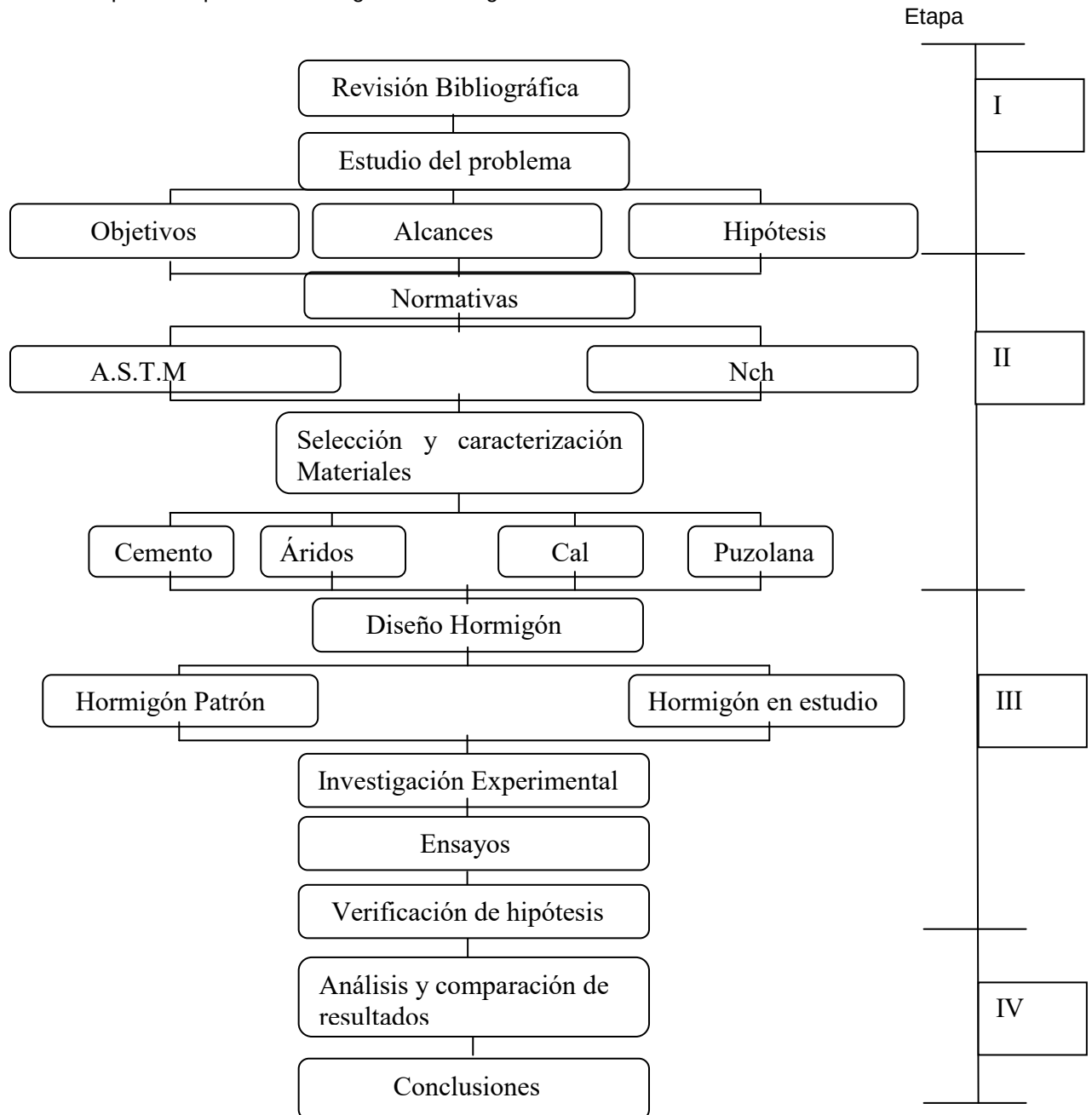
- Se estima factible reemplazar parcialmente cemento por mezclas cal – puzolana sin afectar la resistencia a la compresión del hormigón.

1.5 Alcances

- Se utilizará cemento portland puzolánico, de grado corriente Melón Especial.
- Se utilizará cal hidráulica Soprocál
- Se utilizará puzolana de la Región Metropolitana.
- A lo largo de este estudio se mantendrán el tipo de cemento, agua y áridos. Con un tamaño máximo de árido de 20 mm.
- El hormigón a utilizar será H30 siendo el más representativo en las construcciones de losas y pavimentos industriales.
- Todo el estudio será regulado bajo las normas chilenas vigentes.
- Se utilizará aditivo superplastificante Normet TAMCEM 67C.
- Se utilizará áridos de la planta de Conovía.

1.6 Plan Metodológico

Figura 1.6. Mapa conceptual metodología de investigación.



CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.

2.1 Definiciones

Hormigón:

Material de construcción conformado por la mezcla de cemento, árido, agua y eventualmente aditivos especiales. El hormigón tiene cierta plasticidad para ser trabajado y colocado, y luego la capacidad de fraguar o endurecer para responder a solicitaciones de esfuerzos mecánicos de compresión principalmente.

Dosificación:

Determinación de las cantidades de cada material, expresadas en peso o volumen que forman un metro cúbico de hormigón.

Razón agua/ cemento:

Cuociente entre las masas de agua libre y de cemento empleada en un hormigón.

Resistencia mecánica a la compresión:

Tensión máxima de rotura que soporta el hormigón en los ensayos de compresión, expresada en MPa o Kgf / cm².

Docilidad:

Facilidad del hormigón fresco para su transporte, colocación y compactación sin producirse por ello segregación de los materiales constituyentes.

Asentamiento:

Ensayo mediante el cono de Abrams para obtener una estimación de la docilidad del hormigón.

Retentividad:

Capacidad del hormigón para retener el agua de amasado cuando aún se encuentra en estado fresco.

Aditivo:

Producto que se agrega eventualmente al hormigón, en pequeñas cantidades, con respecto al peso del cemento, con el objetivo de modificar alguna o varias de sus propiedades por acción química.

Árido:

Material granular de origen pétreo que por su dureza o forma, se utiliza en la fabricación de hormigón.

Arena:

Árido que pasa por el tamiz de abertura nominal 5 mm. y es retenido en el de abertura 0,08mm, con las tolerancias que establece la NCh 163.

Grava:

Componente pétreo granular árido y de tamaño mayor a 5 mm que conforma una masa resistente a compresiones, abrasión, paso de la humedad y cambio de volumen.

Granulometría:

Distribución porcentual expresada en masa de los diferentes tamaños de las partículas que constituyen un árido según NCh 165.

2.2 Cemento

Material conglomerante compuesto de una sustancia en polvo que, mezclada con agua forma una pasta blanda que endurece en contacto con el aire o bajo agua.

Composición química:

Principalmente está compuesto por cal (CaO), Sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃) y óxido férrico (Fe₂O₃) además de magnesio y álcalis que le acompañan como impurezas.

Los cuatro principales componentes del cemento son los siguientes:

- Silicato tricálcico: C3S
- Silicato dicálcico: C2S
- Aluminato tricálcico: C3A
- Ferroaluminato tetracálcico: C4AF

Fabricación:

Para la fabricación de cemento en Chile predomina la vía seca, la cual consiste en introducir los materiales ya reducidos a polvo directamente en el extremo más alto del horno rotatorio, donde van avanzando lentamente hacia la fuente de calor que está en el otro extremo, los crudos se van así desparramando y avanzando en forma de espiral que da dos vueltas por minuto. Primero se produce una deshidratación seguido de la descomposición de la arcilla y la caliza y, finalmente, estas reaccionan produciéndose un principio de fusión, cuando la temperatura se aproxima a los 1500°C. El producto que sale del horno, llamado Clinker cae en un enfriador a 1200°C y es transportado a silos, donde es enfriado por algunas semanas.

El Clinker se muele a polvo fino junto a adiciones y finalmente es almacenado y envasado.

2.3 Cal

La cal en la construcción es utilizada de diferentes maneras: en hormigones, en morteros, para pintar paredes, en albañilería y estucos. Se puede obtener una especie de mortero al mezclar cal, agua y arena. La cal puede adquirir una dureza considerable al secarse y puede ser un material muy resistente.

La cal es un óxido de calcio que se obtiene de la calcinación de rocas calizas, su proceso de elaboración se basa en hacer maleable un material que en su forma natural no lo es. Se comienza con la extracción de rocas calizas en canteras para posteriormente quemarlas, resultando cal viva. La cal viva se mezcla con agua para obtener cal hidratada o cal apagada.

En resumen la cal es un conglomerante cuya fabricación consta de varios procesos, en general la secuencia para su obtención es: extracción de rocas calizas, trituración, calcinación, apagado, molienda, almacenamiento y finalmente envasado.

Cal hidráulica:

La cal hidráulica es aquella que puede fraguar o endurecer con o sin presencia de aire, incluso bajo el agua. Se produce por la calcinación de piedras calizas en cuya composición entra alrededor de un 20% de arcilla, y que, pulverizada y mezclada con agua, fragua como el cemento. Químicamente la cal hidráulica puede ser clasificada como el intermedio entre la cal aérea y el cemento portland.

La diferencia entre los diferentes tipos de cales hidráulicas se basan preferentemente por las propiedades de los elementos arcillosos que reaccionan con el calcio en la calcinación.

Con respecto al proceso de apagado de la cal hidráulica, el óxido de calcio libre reacciona como en las cales aéreas, resultando hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH}_2)$. Los silicatos y aluminatos permanecen insensibles hasta que el hidróxido de calcio este saturado de agua, cuando esto ocurre los silicatos y aluminatos son atacados, esto debe evitarse para obtener un producto cementante apropiado. Lo anteriormente mencionado impone limitaciones y precauciones que no cuentan para las cales aéreas, por lo que es imprescindible evitar la formación de hidro – aluminatos de calcio. Una vez apagadas las cales hidráulicas aparecen como polvo y tienen ya la propiedad de amasarse con agua para posteriormente fraguar y conglomerar el árido.

Retentividad:

Corresponde a la capacidad de retener el agua de amasado de la mezcla. Una baja retentividad implica retención de la humedad de la mezcla por menos tiempo, disminuyendo la trabajabilidad que posteriormente perjudica la hidratación del conglomerante, el proceso de fraguado y finalmente la adherencia y resistencia de la mezcla.

La cal aporta una mayor retentividad, debido a que sus partículas son de menor tamaño que las del cemento. Las partículas al ser más pequeñas, poseen una mayor área superficial capaz de absorber una mayor cantidad de agua a su alrededor, aumentando de esta forma la retentividad de la mezcla (Ficha técnica Soprocál).

Cal en Chile:

En Chile los productores privados de cal, producida industrialmente, son la Industria Nacional de Cemento S.A (INACESA) y SOPROCAL e industrias S. A., quienes abastecen el mercado nacional.

En Chile no existen normas que regularicen los distintos tipos de cal, salvo la Norma Chilena Oficial NCh 1928, sobre albañilería armada, donde se menciona el uso de cal hidráulica y cal aérea con algunos requisitos a cumplir.

2.4 Puzolana

La puzolana es definida como un material silíceo - aluminoso, el cual posee por si baja o nula capacidad cementante, pero que, finamente dividido y en presencia de humedad reacciona químicamente con hidróxido cálcico, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a temperatura ambiente, generando compuestos de propiedades cementantes.

Las puzolanas son materiales a partir de los cuales se producía históricamente el cemento, desde la antigüedad romana hasta la invención del cemento Portland en el siglo XIX

Principales tipos de puzolanas

Puzolanas naturales

Rocas volcánicas, en las que el constituyente amorfo es vidrio producido por enfriamiento brusco de la lava. Por ejemplo las cenizas volcánicas, las tobas, la escoria y obsidiana.

Rocas o suelos en las que el constituyente silíceo contiene ópalo, ya sea por la precipitación de la sílice de una solución o de los residuos de organismos de lo cual son ejemplos las tierras de diatomeas, o las arcillas calcinadas por vía natural a partir de calor o de un flujo de lava.

Puzolanas artificiales

Cenizas volantes: las cenizas que se producen en la combustión de carbón mineral (lignito), fundamentalmente en las plantas térmicas de generación de electricidad.

Arcillas activadas o calcinadas artificialmente: por ejemplo residuos de la quema de ladrillos de arcilla y otros tipos de arcilla que hayan estado sometidas a temperaturas superiores a los 800 °C.

Escorias de fundición: principalmente de la fundición de aleaciones ferrosas en altos hornos

Cenizas de residuos agrícolas: la ceniza de cascarilla de arroz, ceniza del bagazo y la paja de la caña de azúcar.

Puzolana en Chile

En Chile, específicamente en la Región Metropolitana, lo que es actualmente las comunas de Lampa y Pudahuel están situadas sobre un gran manto puzolánico que se extiende hasta la costa misma con interrupciones breves. Algunas empresas explotan este manto para obtener materia prima para diversos usos, en especial para la industria del cemento y abrasivos. El origen de este material en un comienzo se atribuyó a la presencia de los volcanes Tupungato y San José, pero dada la extensión y distribución del material se ha atribuido actualmente al extinto volcán Diamante ubicado en la frontera con Argentina a la misma latitud que Santiago.

2.5 Docilidad

Método del Asentamiento de cono de Abrams NCh 1019

La docilidad es un importante parámetro de diseño de hormigón y corresponde a la propiedad que tiene el hormigón fresco para ser manipulado sin que se produzca segregación. La docilidad del hormigón depende de la granulometría, calidad y proporciones de los áridos.

Para entregar una mayor docilidad al hormigón se puede simplemente aumentar la dosis de agua en su fabricación, pero esto implica una disminución de su resistencia, otra forma es la utilización de aditivos especiales, que en forma eficaz aumentan la docilidad del hormigón sin afectar negativamente su resistencia.

El asentamiento de cono de Abrams que se ejecuta según Nch 1019 permite estimar la docilidad del hormigón fresco, midiendo el descenso en la altura que experimenta el hormigón al ser ensayado de acuerdo a lo especificado en la norma antes citada.

2.6 Resistencia a la compresión

NCh 1037

La resistencia a la compresión es una de las propiedades más importante, ya que el hormigón tiene una funcionalidad estructural y está permanentemente sometido a esfuerzos.

El hormigón es diseñado en función de resistencia a la compresión, por lo cual el cuidado y los componentes que se emplean en su fabricación deben cumplir con lo especificado en las normas, así como también cualquier adición extra que procure influir en alguna otra propiedad.

CAPITULO III: METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1 Programa experimental

Para poder determinar el comportamiento del hormigón al sustituir parcialmente el cemento por mezclas cal – puzolana, se realizó un programa experimental, el cual permite estudiar los cambios en las características físicas y mecánicas del hormigón (densidad aparente, porosidad y resistencia a la compresión), al comparar y analizar resultados obtenidos con un hormigón patrón .

Se confeccionará un hormigón patrón para verificar si la dosificación es correcta, una vez verificada se procederá a dosificar y confeccionar los hormigones con reemplazo parcial de cemento por mezclas cal – puzolana, manteniendo constante la razón agua – cemento y la proporción de los áridos.

3.1.1 Materiales necesarios para la experiencia.

- Cemento portland puzolánico grado corriente.
- Grava tamaño máx. nominal 20 mm.
- Arena.
- Cal hidráulica.
- Puzolana de la Región Metropolitana.
- Aditivo súper plastificante.

3.1.2 Diseño de la experiencia

Mezclas cal – puzolana.

Previamente a realizar las mezclas, la puzolana se pasará por un tamiz de abertura 0,160 mm (ASTM N°100).

Se realizarán las siguientes mezclas, en peso:

Mezcla	Puzolana	Cal
M1	80%	20%
M2	60%	40%
M3	50%	50%

Con cada una de las mezclas se harán los siguientes reemplazos de cemento, porcentajes en peso: 10 – 30 y 50%. Teniéndose un total de 9 amasadas más el patrón.

Cuantificación de probetas a utilizar

%RC	Mezcla	Resistencia a compresión				Porosidad
		3	7	28	56	28
10%	80-20	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
	60-40	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
	50-50	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
30%	80-20	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
	60-40	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
	50-50	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
50%	80-20	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
	60-40	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
	50-50	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
	Patrón	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX

Total de probetas resistencia a la compresión: 120.

Total probetas porosidad: 30.

3.1.3 Detalles experimentales

3.1.3.1 Granulometría a los áridos: Se realizará la granulometría de los áridos según la norma chilena NCh 165.

3.1.3.2 Caracterización de los materiales: Se determinarán a los áridos y puzolana las siguientes propiedades: Densidades aparentes y reales y absorción.

3.1.3.3 Cálculo teórico de la dosificación de los hormigones: Para el cálculo de las dosificaciones de los hormigones se utilizará el método IDIEM, con el cual se determinará, mediante mezclas granulométricas teóricas, la proporción en que se deberán mezclar los áridos disponibles; En una segunda etapa se determinará la dosificación completa, a partir de tablas empíricas. En un tercer lugar se procederá a hacer el cálculo de las dosificaciones con reemplazo variable de cemento por mezclas cal-puzolana, manteniendo la cantidad de agua constante.

Diseño de los hormigones:

- Hormigón será de grado G30.
- Fracción defectuosa 10%
- Asentamiento 8 ± 2 cm NCh 1019.

3.1.3.4 Tratamientos de curado.

El curado de los hormigones a fabricar será bajo agua 7 días y el resto al aire, bajo techo.

3.1.3.5 Ensayos

Con cada una de las mezclas a fabricar, se prepararán 9 probetas cúbicas de 15 cm de arista y 3 probetas cilíndricas de 7 cm de diámetro y 10 cm de altura.

Para lograr los objetivos planteados, a cada uno de los hormigones se le someterá a los siguientes ensayos:

- Asentamiento, según Nch 1019.
- Resistencia a compresión en probetas cúbicas de 15 cm de arista, según NCh 1037, a 3, 7, 28 y 56 días. (3 probetas por edad)
- Porosidad, como absorción de agua, a los 28 días. (3 probetas).
- Densidad aparente del hormigón endurecido, donde se emplearán las mismas probetas a utilizar para la determinación de la resistencia a la compresión a 28 días.

3.2 Metodología de ensayos

A continuación se muestra una descripción de cada ensayo a realizar.

3.2.1 Determinación de la docilidad por el Método de asentamiento del cono de Abrams.

3.2.1.1 Generalidades.

Este método permite determinar la docilidad del hormigón en estado fresco, mediante la reducción de la altura del cono.

3.2.1.2 Aparatos

Se utiliza un molde metálico con forma de cono, de altura 300 mm, abierto por ambos extremos, con una superficie interna lisa.

La base superior tiene un diámetro de 100 mm y la inferior de 200 mm.

El molde cuenta con dos pisaderas en su parte inferior para que el operador lo mantenga inamovible durante su llenado, el molde cuenta con dos manillas en el tercio superior de su altura para levantarlo una vez llenado.

Se utiliza un pisón metálico de forma de barra cilíndrica de 16 mm de diámetro y 600 mm de longitud, con extremos semiesféricos.

Se utiliza una plancha metálica de apoyo, rígida de 400 x 600 mm.

Se utilizan una poruña metálica y una huincha.

3.2.1.3 Muestras de hormigón

La cantidad de hormigón necesaria para llevar a cabo el ensayo será no menor que 6 litros.

3.2.1.4 Procedimiento

Primero que todo, los aparatos deben estar completamente limpios y humedecidos con agua. Se coloca la plancha metálica en superficie horizontal y se llena el molde sobre esta, mediante 3 capas de igual volumen las cuales serán apisonadas con 25 golpes; la capa inferior será apisonada en toda su profundidad, la mitad de los golpes se darán alrededor del perímetro con el pisón levemente inclinado y el resto en posición vertical.

La capa media y superior se apisona penetrando hasta la capa subyacente y durante el apisonado de la última capa se debe mantener siempre un exceso de hormigón sobre el borde superior del molde.

Una vez finalizada la compactación de la última capa se enrasa la superficie, se limpia el hormigón derramado y se procede a levantar el molde.

Una vez retirado el molde, se debe medir inmediatamente la disminución de la altura del hormigón con respecto al molde con aproximación de 0,5 cm. La medición se realiza en el eje central del molde.

3.2.2 Ensayo de resistencia a la compresión en probetas cúbicas

3.2.2.1 Generalidades

A continuación se describe en un resumen el procedimiento de ensayo establecido por la NCh 1037.

3.2.2.2 Aparatos

Se debe contar con prensa de ensayo, balanza y regla graduada.

3.2.2.3 Procedimiento

Medición de probetas cúbicas:

Se coloca el cubo con la cara de llenado en un plano vertical. Se mide aproximando a 1 mm los anchos y alturas de cada una de las 4 caras laterales en sus ejes horizontales y verticales respectivamente. Finalmente se determina la masa de la probeta con una aproximación igual o inferior a 50 g.

Ensayo:

Se debe limpiar la superficie de las placas y de las caras de ensaye de la probeta

Limpiar la superficie de las placas de carga y de las caras de ensaye de la probeta, colocando ésta alineada y centrada en la máquina de ensaye. Las probetas cúbicas se colocan con la cara de llenado verticalmente. Al acercar la placa superior de la máquina de ensayo se le debe asentar sobre la probeta de manera de obtener apoyo lo más uniforme posible. La carga debe aplicarse en forma continua y sin choques a velocidad uniforme, de manera que la rotura de la probeta se alcance en un tiempo igual o superior a 100 segundos y que la velocidad de aplicación de carga no sea superior a 3,5 (N/m²/seg). Por último se registra la carga máxima expresada en (N).

3.2.2.4 Expresión de resultados

Resistencia a la compresión:

La resistencia a la compresión del hormigón como la resistencia a la rotura se calcula con la siguiente fórmula.

$$R_c = P/S$$

Dónde:

R_c: Resistencia a la compresión, (MPa)

P: Carga máxima aplicada por la máquina, (N).

S: Sección de ensaye de la probeta, (mm²).

Densidad aparente:

Calcular el volumen (V) de la probeta según la siguiente fórmula (NCh 1037):

$$V = S \cdot h \text{ (cm}^3\text{)}$$

Dónde:

S: Sección transversal de la probeta (cm²)

H: Altura promedio de la probeta (cm)

Calcular densidad aparente como: (NCh 1037)

$$D_b = M/V$$

Dónde:

D_b: Densidad aparente (kg/m³)

M: Masa de la probeta (Kg)

V: volumen de la probeta (m³)

3.2.3 Porosidad (Absorción de agua).

La absorción de agua es un proceso físico en el cual el hormigón succiona agua reteniéndola en sus poros.

3.2.3.1 Ensayo para determinación de absorción de agua.

Para determinar la absorción de agua o porosidad del hormigón, el método de ensayo se basa en mantener la probeta de hormigón sumergida en agua por 24 horas, una vez hecho lo anterior se seca superficialmente con un paño y se pesa con aproximación de 1 gramo. Posteriormente la probeta se coloca en horno a 110°C por 24 horas para secar a peso constante y se pesa nuevamente. La diferencia entre los pesos saturado y seco al horno se expresa como porcentaje referido al peso al horno.

$$\text{Absorción} = (\text{peso saturado} - \text{peso seco}) / \text{peso seco} \times 100 (\%)$$

CAPITULO IV: DESARROLLO EXPERIMENTAL.

4.1 Tamizado y determinación de la granulometría.

4.1.1 Arena

Material árido de menor tamaño en sus partículas que se agrega en la fabricación de hormigón y juega un papel importante en las propiedades plásticas del hormigón fresco.

Granulometría de la arena

Corresponde a la distribución porcentual de la masa de los distintos tamaños de las partículas que conforman el árido fino.

Se efectúa el análisis de las características granulométricas de acuerdo a las normas chilenas.

La extracción de las muestras se efectúa conforme a lo especificado en la NCh 164.

Para determinar la granulometría de la arena se utiliza el procedimiento de ensayo especificado en la NCh 165.

Se efectúan 3 análisis granulométricos y se obtiene un promedio.

En la tabla 4.1.1 se expresa la granulometría promedio de las tres muestras de arena, con su respectiva corrección teórica. Se obtiene un módulo de finura promedio de 3,12 y corregido de 2,53.

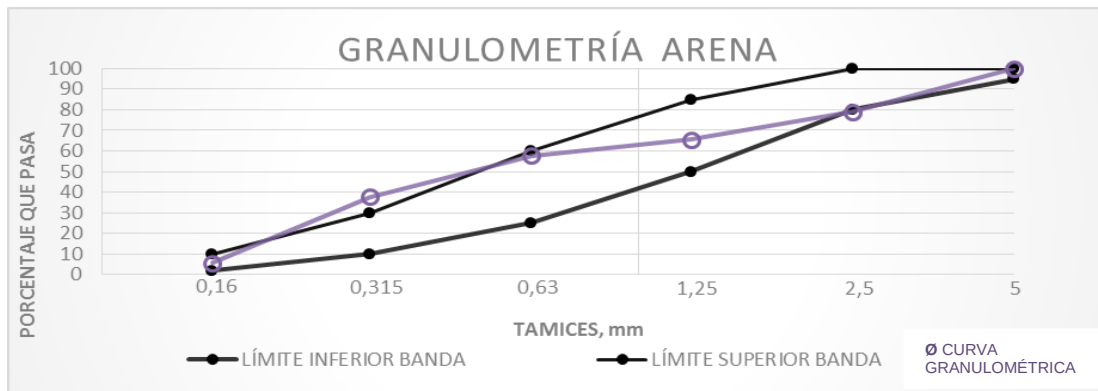
Tabla 4.1.1 Análisis granulométrico de la arena.

Tamices		Porcentaje que pasa, en peso					
ASTM	Nch163	M1	M2	M3	Promedio	Corregido	Requisito Nch 163
3/8	9,5	100	99	99	99		100
4	4,75	83	83	84	83	100	95 - 100
8	2,36	65	66	68	66	79	80 - 100
16	1,18	54	55	56	55	66	50 - 85
30	0,6	47	48	49	48	58	25 - 60
50	0,3	32	32	31	32	38	5 - 30.
100	0,15	6	5	3	5	6	0 - 10

Fuente: Elaboración propia, 2017.

En la figura 4.1.1 se muestra gráficamente la curva granulométrica promedio de la arena corregida, saliéndose de las bandas granulométricas recomendadas por la norma chilena, dejando claro que se trata de una arena fina.

Figura 4.1.1 Curva granulométrica promedio de la arena.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

4.1.2 Grava

Es un material pétreo granular de suma importancia que conforma una masa resistente a compresiones, abrasión, paso de humedad, cambio de volumen y también ayuda a abaratar costos del hormigón.

Granulometría de la grava

Es la distribución porcentual de la masa de los distintos tamaños de las partículas que conforman este árido.

Se efectúa el análisis de las características granulométricas de la grava de acuerdo a las normas chilenas

La extracción de las muestras se efectúa de acuerdo a la NCh 164.

Para determinar la granulometría de la grava se utiliza el procedimiento de ensayo especificado en la NCh 165.

Se efectúan 3 análisis granulométricos y se obtiene un promedio

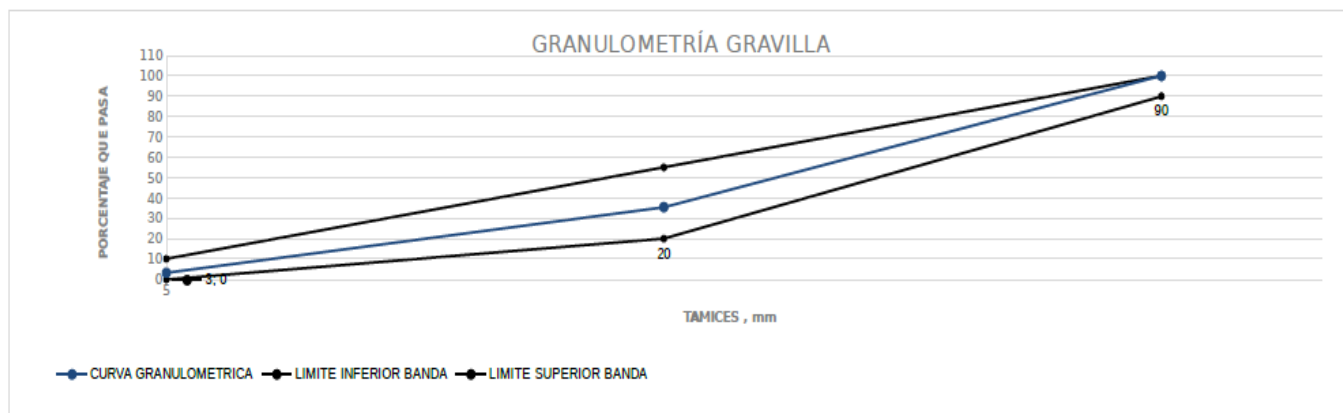
En la tabla 4.2.1 se presentan los resultados obtenidos promedio de las granulometrías de la grava. Se obtiene un módulo de finura de 6,61.

Tabla 4.1.2 Análisis granulométrico de la grava.

Tamices		Porcentaje que pasa, en peso				
ASTM	Nch163	M1	M2	M3	Promedio	Requisito Nch 163
1"	25	100	100	100	100	100
3/4"	19	100	100	100	100	90 - 100
3/8"	9,5	34	36	37	36	20 - 55
4"	4,75	3	3	4	3	0 - 10

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Figura 4.1.2 Curva granulométrica promedio de la grava



Fuente: Elaboración propia, 2017

4.1.3 Granulometría de Árido combinado

En la tabla 4.1.3 se presentan los resultados obtenidos la granulometría del árido combinado. La mezcla se hizo de tal manera que la resultante se adecúe a las recomendaciones granulométricas establecidas en la Nch 163.

Ya obtenidas las granulometrías del árido fino y grueso, se procedió a combinarlos. Para la combinación se toma como tamiz central el de abertura 5 mm para un tipo de hormigón (armado) y a este se impone que pase un 42% del árido. Se elige este porcentaje para que la mayoría de los puntos dispuestos en el gráfico granulométrico entren en la banda granulométrica recomendada por la norma. La fórmula es la siguiente:

$$83A + 3G = 42 (A+G)$$

A= 48%

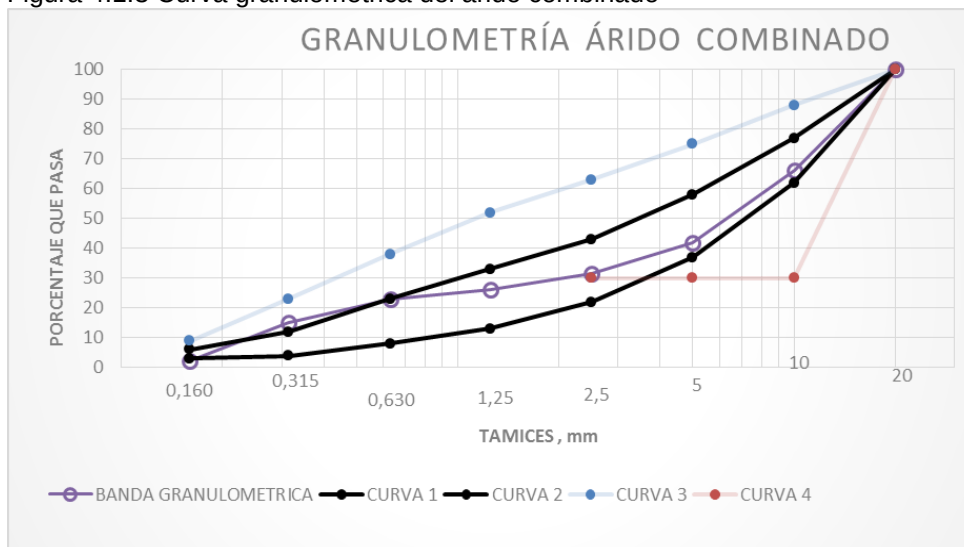
G= 52%

Tabla 4.1.3 Análisis granulométrico del árido combinado

TAMIZ		% QUE PASA		52%	48%	% QUE PASA	% QUE PASA ACUM. Dmax 20 mm (NCH163 Of 79)	
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 79	GRAVILLA	ARENA	ÁRIDO GRUESO (AG)	ÁRIDO FINO (AF)	(AG + AF)	CURVA 1	CURVA 2
3/4	20	100	100	52	48	100	100	100
3/8	10	36	99	18	48	66	62	77
4	5	3	83	2	40	42	37	58
8	2,5		66	0	32	32	22	43
16	1,25		55		26	26	13	33
30	0,630		48		23	23	8	23
50	0,315		32		17	17	4	12
100	0,160		5		2	2	3	6
				MÓDULO DE FINURA		4,92		

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Figura 4.1.3 Curva granulométrica del árido combinado



Fuente: Elaboración propia, 2017.

4.1.4 Granulometría de la Puzolana

Corresponde a la distribución porcentual de la masa de los distintos tamaños de las partículas que conforman la puzolana.

Se efectúa el análisis de las características granulométricas como una arena, de acuerdo a las normas chilenas.

La extracción de las muestras se efectúa conforme a lo especificado en la NCh 164.

Para determinar la granulometría de la puzolana se utiliza el procedimiento de ensayo especificado en la NCh 165.

Se efectúan 3 análisis granulométricos y se obtiene un promedio.

En la tabla 4.1.4 se expresa la granulometría promedio de las tres muestras de puzolana. Se obtiene un módulo de finura promedio de 1,07.

Tabla 4.1.4 análisis granulométrico de la puzolana

Tamices		Porcentaje que pasa, en peso			
ASTM	Nch163	M1	M2	M3	Promedio
3/8	9,5	100	100	100	100
4	4,75	99	99	100	99
8	2,36	97	97	98	98
16	1,18	94	95	95	95
30	0,6	90	91	90	90
50	0,3	72	74	73	73
100	0,15	36	36	38	37

Fuente: Elaboración propia, 2017.

4.2 Características físicas de los áridos y puzolana

Para la determinación de las características físicas los áridos y puzolana, fueron sometidos a ensayos según lo especificado en las normas chilenas NCh 1116, NCh 1239, NCh 1117 y los resultados se muestran en las tablas 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3.

Tabla 4.2.1 Características físicas de la Arena.

CARACTERISTICA	ARENA	NORMA
ρ NETA (Kg/m ³)	2723	NCH 1239 Of 77
ρ REAL SECA (Kg/m ³)	2643	NCH 1239 Of 77
ρ REAL SSS (Kg/m ³)	2672	NCH 1239 Of 77
ρ Ap. SUELTA (Kg/m ³)	1690	NCH 1116 Of 2008
ρ Ap. COMPACTADA (Kg/m ³)	1839	NCH 1116 Of 2008
% ABSORCIÓN	1,1	NCH 1239 Of 77

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Tabla 4.2.2 Características físicas de la Grava.

CARACTERISTICA	GRAVILLA	NORMA
ρ NETA (Kg/m ³)	2709	NCH 1117 Of 2010
ρ REAL SECA (Kg/m ³)	2615	NCH 1117 Of 2010
ρ REAL SSS (Kg/m ³)	2650	NCH 1117 Of 2010
ρ Ap. SUELTA (Kg/m ³)	1531	NCH 1116 Of 2008
ρ Ap. COMPACTADA (Kg/m ³)	1668	NCH 1116 Of 2008
% ABSORCIÓN	1,3	NCH 1117 Of 2010

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Tabla 4.2.3 Características físicas de la Puzolana.

CARACTERISTICA	PUZOLANA	NORMA
ρ NETA (Kg/m ³)	2260	NCH 1239 Of 77
ρ REAL SECA (Kg/m ³)	2175	NCH 1239 Of 77
ρ REAL SSS (Kg/m ³)	2212	NCH 1239 Of 77
ρ Ap. SUELTA (Kg/m ³)	1016	NCH 1116 Of 2008
ρ Ap. COMPACTADA (Kg/m ³)	1169	NCH 1116 Of 2008
% ABSORCIÓN	1,7	NCH 1239 Of 77

Fuente: Elaboración propia, 2017.

4.3 Dosificación de hormigones

4.3.1 Dosificaciones teóricas

Las dosificaciones se calcularon para 1 m³ de hormigón fresco compactado, tipo hormigón armado y tamaño máximo del árido de 20 mm, se estimó una densidad de 2430 kg/m³. Utilizando un 52% de grava y un 48% de arena, se realizó una muestra patrón y luego se fue reemplazando la cal por cemento.

RC: reemplazo de cemento

Tabla 4.3.1.1 Dosificación teórica mezcla C-P 20%-80%

DOSIFICACIÓN TEÓRICA MEZCLA C-P 20% - 80%				
MATERIALES	Patrón	10%RC	30%RC	50%RC
CEMENTO (Kg)	410	369	287	205
AGUA (Kg)	170	170	170	170
GRAVILLA (Kg)	962	962	962	962
ARENA (Kg)	888	888	888	888
CAL 20% (Kg)	0	8,2	24,6	41,0
PUZOLANA 80% (Kg)	0	32,8	98,4	164
ADITIVO (Kg)	1,7	1,7	1,7	1,7

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Tabla 4.3.1.2 Dosificación teórica mezcla C-P 40%-60%

DOSIFICACIÓN TEÓRICA MEZCLA C-P 40% - 60%				
MATERIALES	Patron	10%RC	30%RC	50%RC
CEMENTO (Kg)	410	369	287	205
AGUA (Kg)	170	170	170	170
GRAVILLA (Kg)	962	962	962	962
ARENA (Kg)	888	888	888	888
CAL 40% (Kg)	0	16,4	49,2	82,0
PUZOLANA 60% (Kg)	0	24,6	73,8	123
ADITIVO (Kg)	1,7	1,7	1,7	1,7

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Tabla 4.3.1.3 Dosificación teórica mezcla C-P 50%-50%

DOSIFICACIÓN TEÓRICA MEZCLA C-P 50% - 50%				
MATERIALES	Patron	10%RC	30%RC	50%RC
CEMENTO (Kg)	410	369	287	205
AGUA (Kg)	170	170	170	170
GRAVILLA (Kg)	962	962	962	962
ARENA (Kg)	888	888	888	888
CAL 50% (Kg)	0	20,5	61,5	102,5
PUZOLANA 50% (Kg)	0	20,5	61,5	102,5
ADITIVO (Kg)	1,7	1,7	1,7	1,7

Fuente: Elaboración propia, 2017.

4.3.2 Dosificaciones reales

Las dosificaciones reales fueron elaboradas para coladas de 55 litros.

Tabla 4.3.2.1 Dosificación real mezcla C-P 20%-80% colada 55 litros.

DOSIFICACIÓN TEÓRICA MEZCLA C-P 20% - 80%			L = 0,055	
MATERIALES	Patrón	10%RC	30%RC	50%RC
CEMENTO	22,6	20,3	15,8	11,3
AGUA	9,4	9,4	9,4	9,4
GRAVILLA	52,9	52,9	52,9	52,9
ARENA	48,8	48,8	48,8	48,8
CAL 20%	0,0	0,5	1,4	2,3
PUZOLANA 80%	0,0	1,8	5,4	9,0
ADITIVO	0,1	0,1	0,1	0,1

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Tabla 4.3.2.2 Dosificación real mezcla C-P 40%-60% colada 55 litros.

DOSIFICACIÓN TEÓRICA MEZCLA C-P 40% - 60%			L = 0,055	
MATERIALES	Patrón	10%RC	30%RC	50%RC
CEMENTO	22,6	20,3	15,8	11,3
AGUA	9,4	9,4	9,4	9,4
GRAVILLA	52,9	52,9	52,9	52,9
ARENA	48,8	48,8	48,8	48,8
CAL 40%	0,0	0,9	2,7	4,5
PUZOLANA 60%	0,0	1,4	4,1	6,8
ADITIVO	0,1	0,1	0,1	0,1

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Tabla 4.3.2.3 Dosificación real mezcla C-P 50%-50% colada 55 litros.

DOSIFICACIÓN TEÓRICA MEZCLA C-P 50% - 50%			L = 0,055	
MATERIALES	Patrón	10%RC	30%RC	50%RC
CEMENTO	22,6	20,3	15,8	11,3
AGUA	9,4	9,4	9,4	9,4
GRAVILLA	52,9	52,9	52,9	52,9
ARENA	48,8	48,8	48,8	48,8
CAL 50%	0,0	1,1	3,4	5,6
PUZOLANA 50%	0,0	1,1	3,4	5,6
ADITIVO	0,1	0,1	0,1	0,1

Fuente: Elaboración propia, 2017.

CAPITULO V: PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 Ensayos de asentamiento

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de asentamiento del cono de Abrams para cada uno de los hormigones fabricados. Para mantener el asentamiento constante fue necesario aumentar la cantidad de agua de amasado.

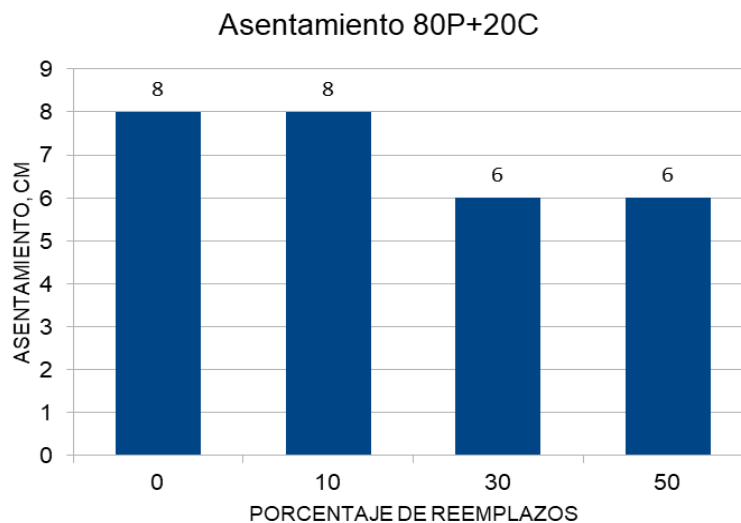
- C-P: Cal-Puzolana

Tabla 5.1.1: Asentamiento y demanda de agua de cada amasada para mezcla C-P 20%-80%.

Reemplazo de mezclas C-P 20-80%	0%	10%	30%	50%
Asentamiento (cm)	8	8	6	6
Agua (kg/colada)	0	0	+0,3	+1

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Figura 5.1.1: Gráfico de Asentamiento mezcla C-P 20%-80%



Fuente: Elaboración propia, 2017.

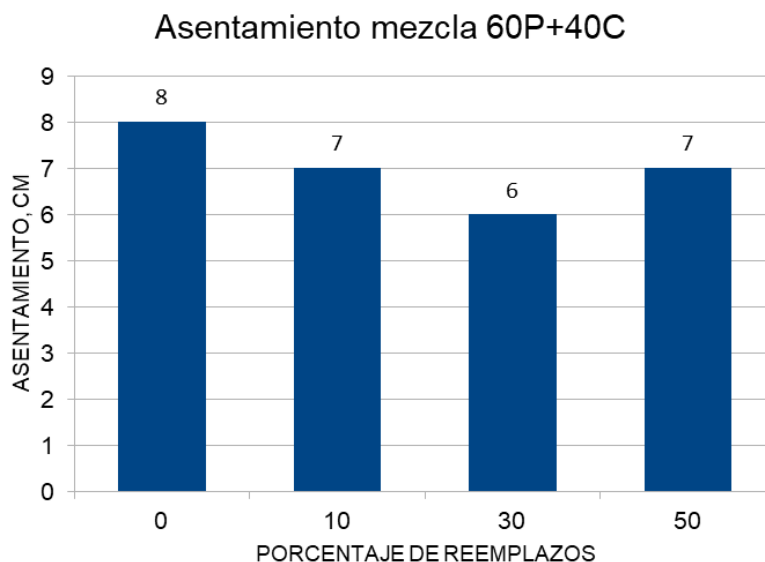
La Figura 5.5.1 muestra una gráfica representativa de los asentamientos obtenidos para la mezcla C-P 20%-80%, los cuales se mantuvieron dentro del rango establecido 8+-2, sin embargo, hubo que variar la dosis de agua de amasado para lograr esto, ya que se aumentó la cantidad de finos en la mezcla y la cal por si sola demanda más agua.

Tabla 5.1.2: Asentamiento y demanda de agua de cada amasada C-P 40%-60%..

Reemplazo de mezclas C-P 40-60%	0%	10%	30%	50%
Asentamiento (cm)	8	7	6	7
Agua (kg/colada)	0	0	+0,5	+1,4

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Figura 5.1.2: Gráfico de Asentamiento mezcla C-P 40%-60%



Fuente: Elaboración propia, 2017.

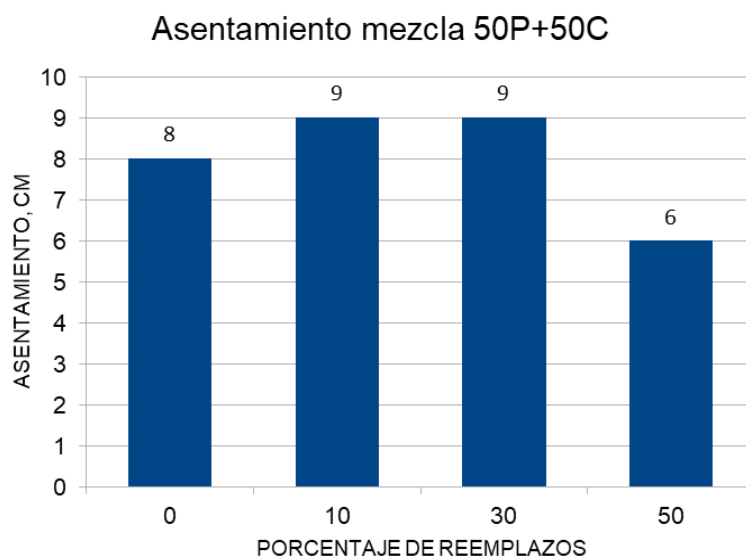
La Figura 5.5.2 muestra una gráfica representativa de los asentamientos obtenidos para la mezcla C-P 40%-60%, los cuales se mantuvieron dentro del rango establecido 8+-2, sin embargo, hubo que variar la dosis de agua de amasado para lograr esto, ya que se aumentó la cantidad de finos en la mezcla y la cal por si sola demanda más agua.

Tabla 5.1.3: Asentamiento y demanda de agua de cada amasada C-P 50%-50%.

Reemplazo de mezclas C-P 50-50%	0%	10%	30%	50%
Asentamiento (cm)	8	9	9	6
Agua (kg/colada)	0	+0,8	+1,4	+1,4

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Figura 5.1.3: Gráfico de Asentamiento mezcla C-P 50%-50%



Fuente: Elaboración propia, 2017.

La Figura 5.5.3 muestra una gráfica representativa de los asentamientos obtenidos para la mezcla C-P 50%-50%, los cuales se mantuvieron dentro del rango establecido 8+-2, sin embargo, hubo que variar la dosis de agua de amasado para lograr esto, ya que se aumentó la cantidad de finos en la mezcla y la cal por si sola demanda más agua.

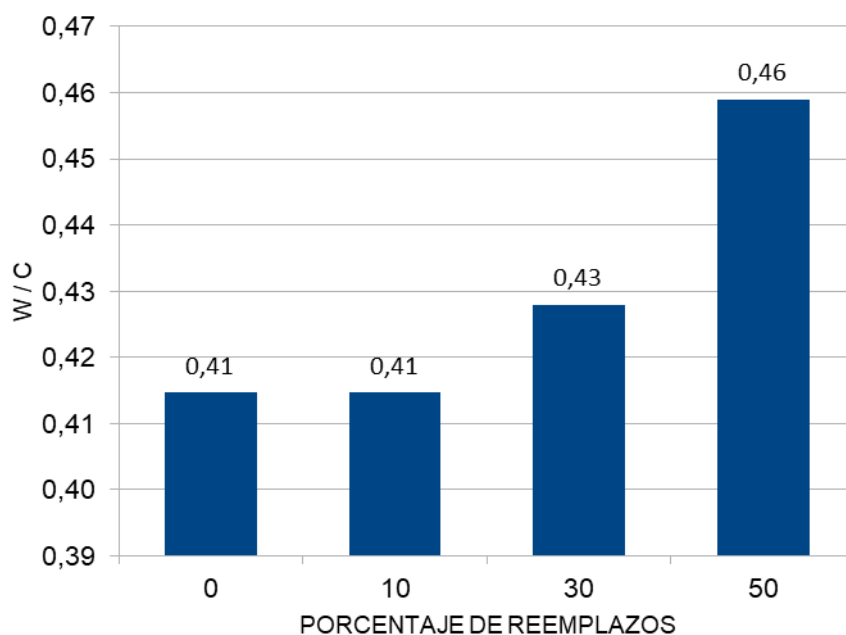
5.2 Variación de la demanda de agua y de la relación agua cemento para asentamiento constante

Tabla 5.2.1 Demanda de agua, por colada en relación a m3, relación agua – cemento para mezcla C-P 20%-80%.

Reemplazo de mezclas C-P 20-80%	Variación de demanda de agua		Agua empleada kg/m3	W/C
	kg/colada	kg/m3		
0	0,00	0,00	170,00	0,41
10	0,00	0,00	170,00	0,41
30	0,30	5,45	175,45	0,43
50	1,00	18,18	188,18	0,46

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Figura 5.2.1: Gráfico relación agua cemento según % de reemplazo mezcla C-P 20%-80%



Fuente: Elaboración propia, 2017.

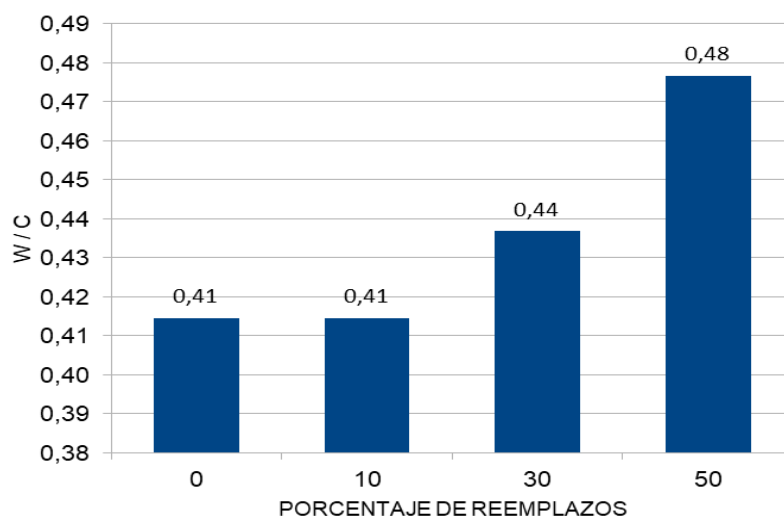
En la figura 5.2.1 se muestra el aumento de la relación w/c a medida que se sustituye un mayor porcentaje de cemento por la mezcla C-P 20%-80%.

Tabla 5.2.2 Demanda de agua, por colada en relación a m³, relación agua – cemento para mezcla C-P 40%-60%.

Reemplazo de mezclas C-P 40-60%	Variación de demanda de agua		Agua empleada	W/C
	kg/colada	kg/m ³		
0	0,00	0,00	170,00	0,41
10	0,00	0,00	170,00	0,41
30	0,50	9,09	179,09	0,44
50	1,40	25,45	195,45	0,48

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Figura 5.2.2: Gráfico relación agua cemento según % de reemplazo mezcla C-P 40%-60%



Fuente: Elaboración propia, 2017.

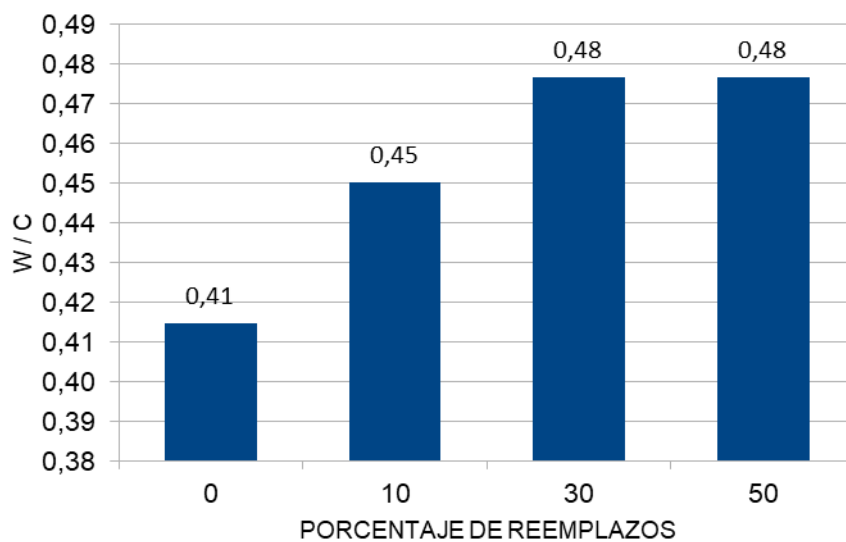
En la figura 5.2.2 se muestra el aumento de la relación w/c a medida que se sustituye un mayor porcentaje de cemento por la mezcla C-P 40%-60%.

Tabla 5.2.3 Demanda de agua, por colada en relación a m3, relación agua – cemento para mezcla C-P 50%-50%.

Reemplazo de mezclas C-P 50-50%	Variación de demanda de agua		Agua empleada	W/C
	kg/colada	kg/m3		
0	0,00	0,00	170,00	0,41
10	0,80	14,55	184,55	0,45
30	1,40	25,45	195,45	0,48
50	1,40	25,45	195,45	0,48

Fuente: Elaboración propia, 2017.

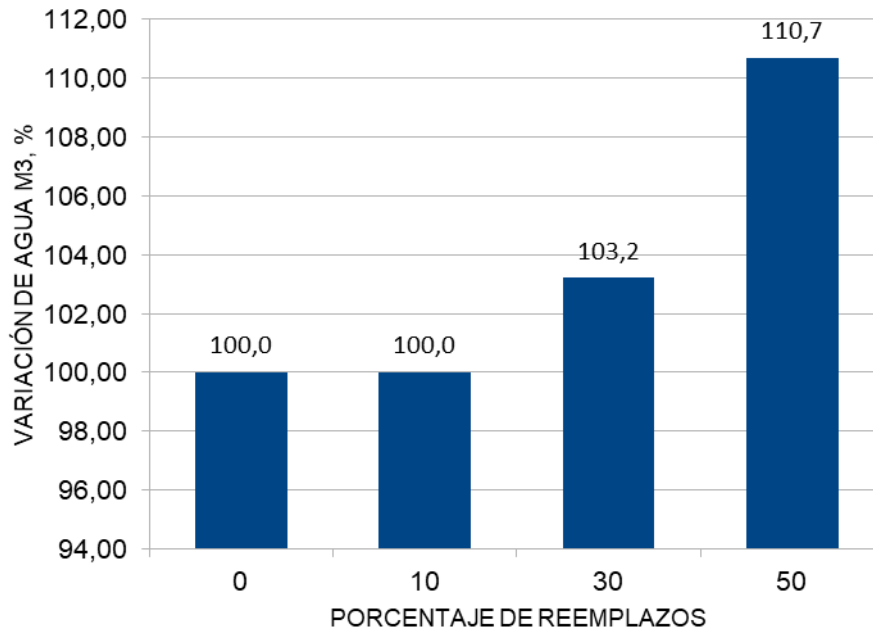
Figura 5.2.3: Gráfico relación agua cemento según % de reemplazo mezcla C-P 50%-50%



Fuente: Elaboración propia, 2017.

En la figura 5.2.3 se muestra el aumento de la relación w/c a medida que se sustituye un mayor porcentaje de cemento por la mezcla C-P 50%-50%.

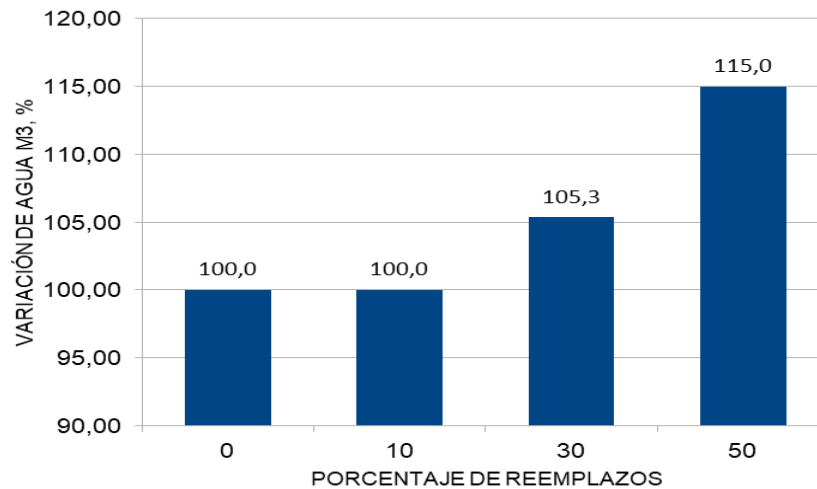
Figura 5.2.4: Gráfico Aumento de agua porcentual según % de reemplazo mezcla C-P 20%-80%



Fuente: Elaboración propia, 2017

La figura 5.2.4 muestra que a medida que aumenta el reemplazo parcial de cemento por la mezcla C-P 20%-80%, aumenta la cantidad de fino en la mezcla y por ende aumenta la demanda de agua para poder alcanzar los parámetros de docilidad establecidos.

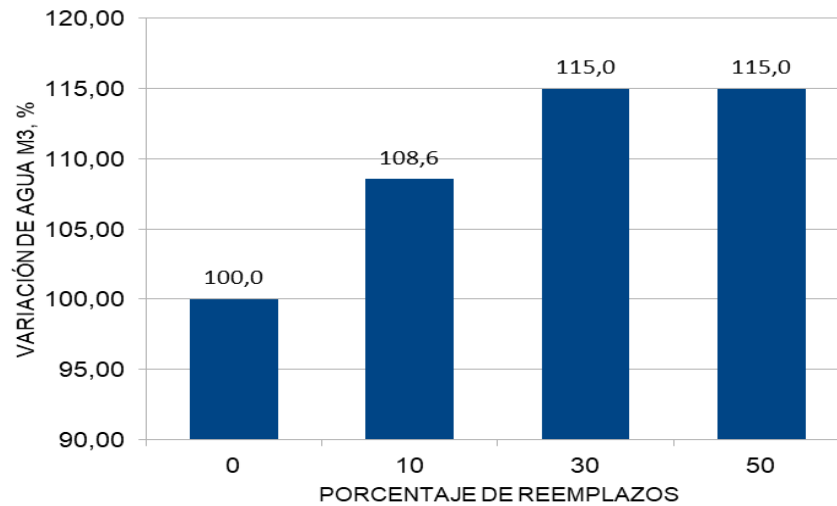
Figura 5.2.5: Gráfico aumento de agua porcentual según % de reemplazo mezcla C-P 40%-60%



Fuente: Elaboración propia, 2017

La figura 5.2.5 muestra que a medida que aumenta el reemplazo parcial de cemento por la mezcla C-P 40%-60%, aumenta la cantidad de fino en la mezcla y por ende aumenta la demanda de agua para poder alcanzar los parámetros de docilidad establecidos.

Figura 5.2.6: Gráfico aumento de agua porcentual según % de reemplazo mezcla C-P 50%-50%



Fuente: Elaboración propia, 2017

La figura 5.2.6 muestra que a medida que aumenta el reemplazo parcial de cemento por la mezcla C-P 50%-50%, aumenta la cantidad de fino en la mezcla y por ende aumenta la demanda de agua para poder alcanzar los parámetros de docilidad establecidos.

5.3 Resultados densidad aparente y porosidad (absorción de agua) del hormigón.

Tabla 5.3.1 Resultados densidad aparente y porosidad.

Tipo de hormigón	Densidad aparente		Porosidad, %	
	kg/m ³	%	Efectiva	Relativa
Patrón	2405	100	5,98	100
Mezcla 80P+20C				
Reemplazo 10%	2382	99	3,4	57
" 30%	2342	97	4,15	69
" 50%	2326	96	4,92	82
Mezcla 60P+40C				
Reemplazo 10%	2390	99	3,77	56
" 30%	2343	97	3,91	65
" 50%	2307	96	4,69	78
Mezcla 50P+50C				
Reemplazo 10%	2311	96	3,56	60
" 30%	2395	99	3,85	64
" 50%	2314	96	3,32	56

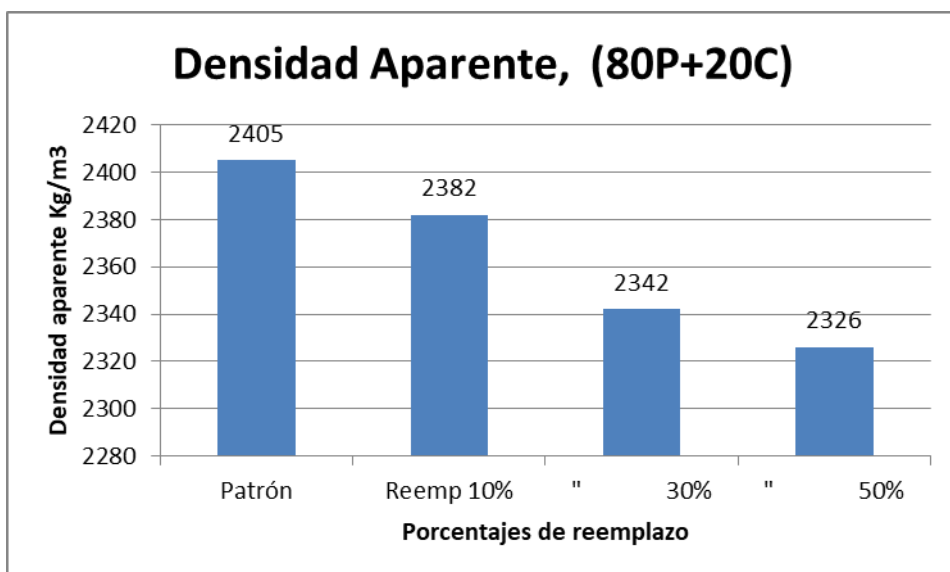
Fuente: Elaboración propia, 2017.

De la tabla 5.3.1:

Puede observarse que todos los hormigones con reemplazo de la mezcla P+C por cemento resultaron con densidades aparentes menores que la del hormigón patrón, lo que explica por las menores densidades de la puzolana y de la cal. Sin embargo, las diferencias en densidades son de escasa magnitud, ya que las más bajas llegan al 96 % de la del hormigón patrón, esto es del orden de 100 kg/m³ como diferencia máxima.

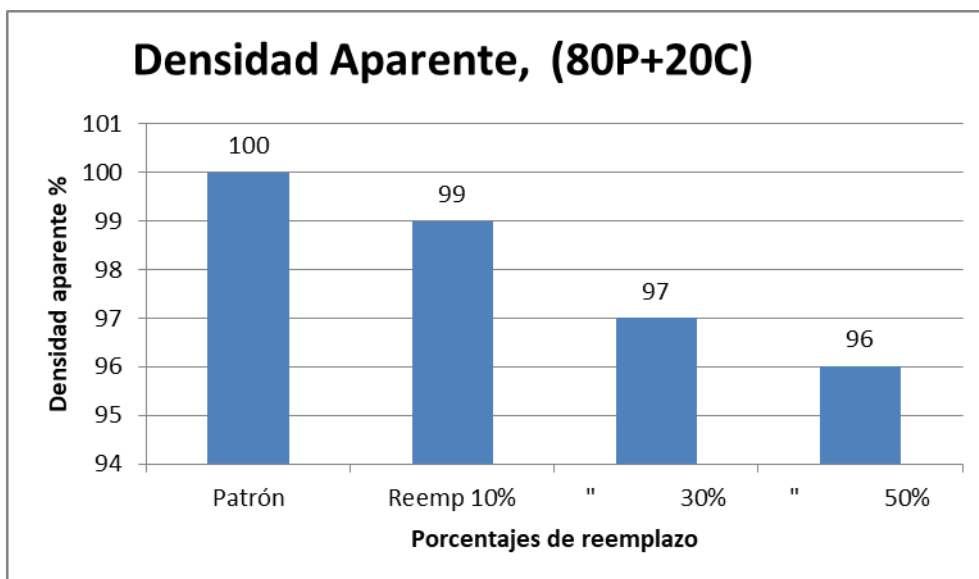
Todos los hormigones en los que se reemplazó mezclas P+C por cemento, resultaron con una significativa reducción de su porosidad, lo que se debería a que dichas mezclas aportan una proporción elevada de partículas finas para colmatar poros. Las porosidades encontradas, en general, varían entre el 69% y el 56% de la porosidad del hormigón patrón.

Figura 5.3.1 Gráfico Densidad Aparente (80P+20C)



Fuente: Elaboración propia, 2017.

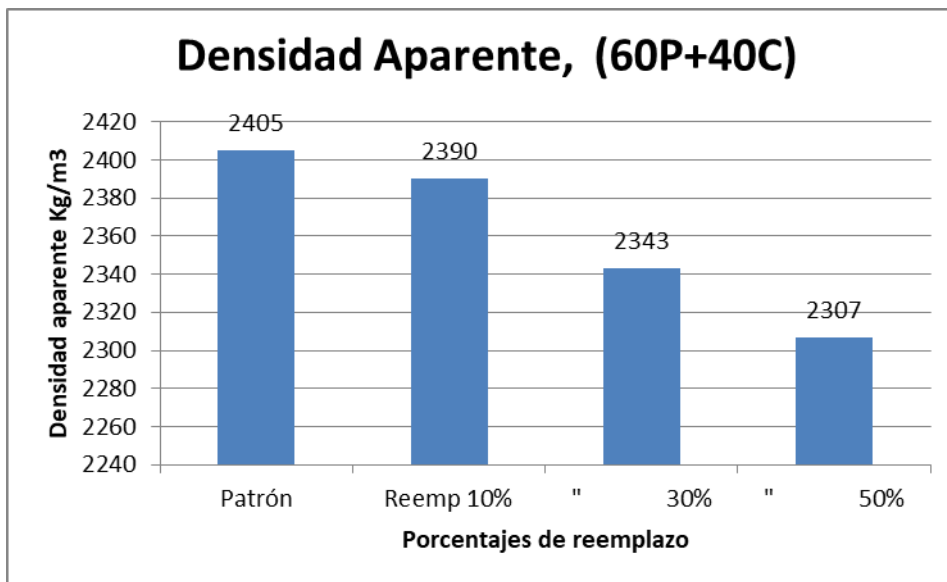
Figura 5.3.2 Gráfico relación Densidad aparente (80P+20C)



Fuente: Elaboración propia, 2017.

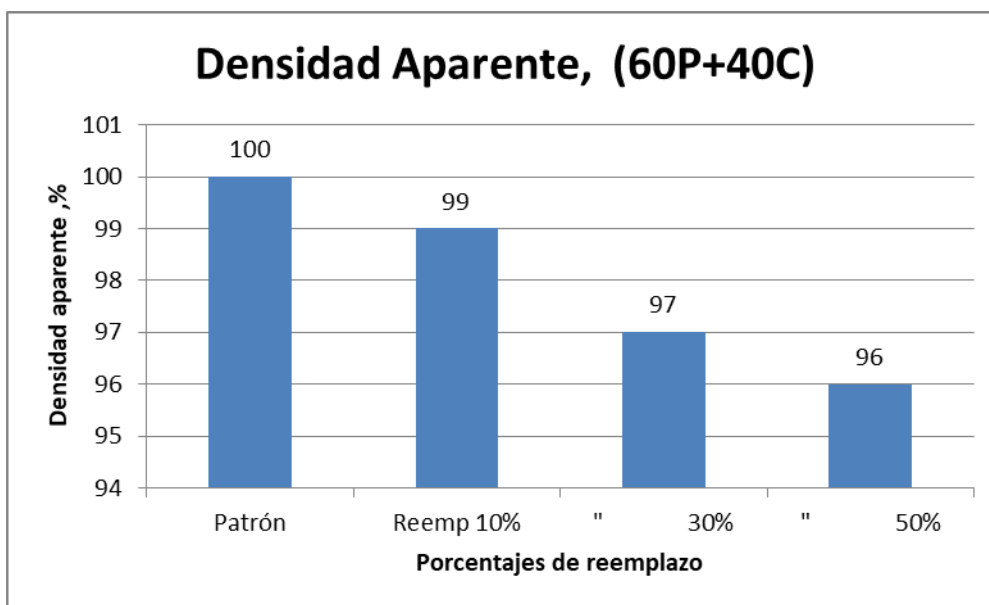
Las figuras 5.3.1 y 5.3.2 muestran que a medida que se aumenta el reemplazo parcial de cemento por la mezcla cal puzolana 20%-80%, la densidad aparente del hormigón disminuye lo que explica por las menores densidades de la puzolana y de la cal, por lo tanto muestra que es un hormigón más liviano, sin embargo, las diferencias en densidades son de escasa magnitud, ya que las más bajas llegan al 96 % de la del hormigón patrón, esto es del orden de 100 kg/m³ como diferencia máxima.

Figura 5.3.3 Gráfico Densidad aparente (60P+40C)



Fuente: Elaboración propia, 2017.

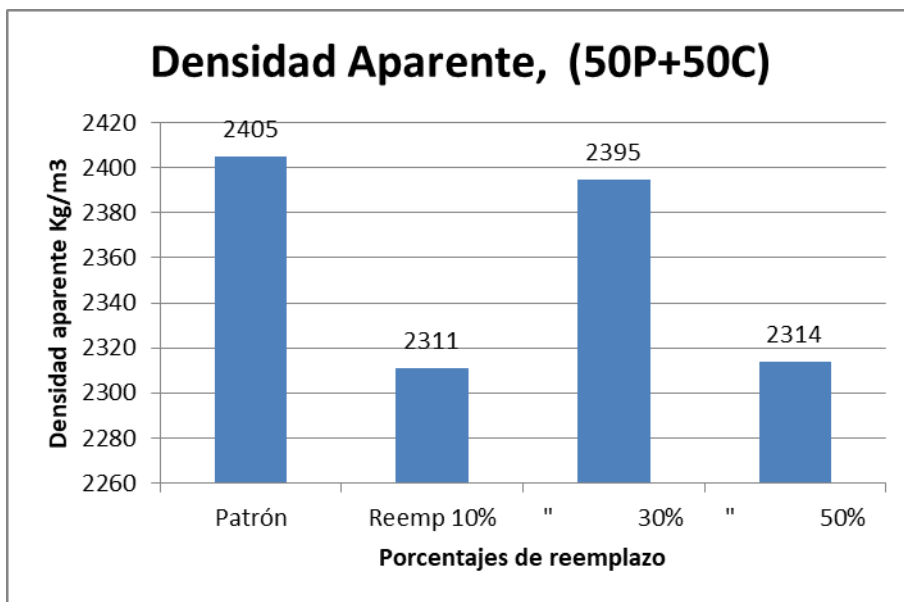
Figura 5.3.4 Gráfico relación Densidad aparente (60P+40C)



Fuente: Elaboración propia, 2017.

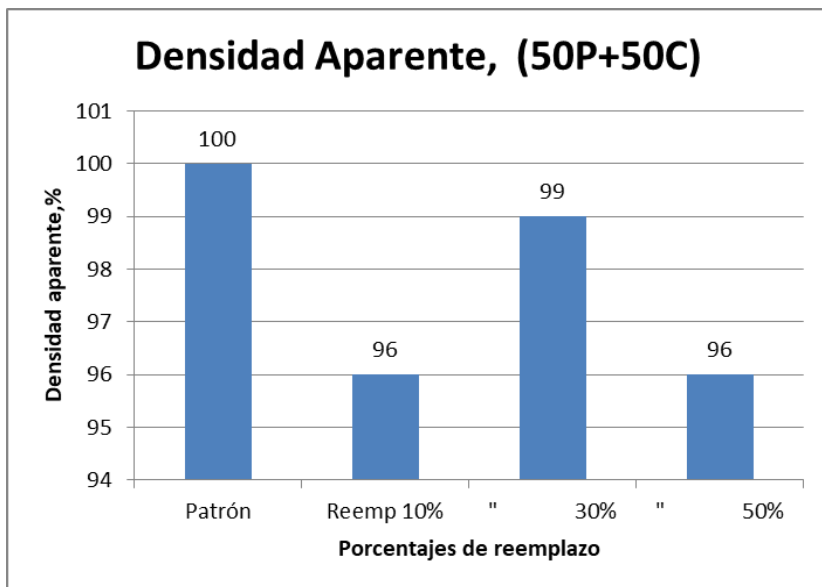
Las figuras 5.3.3 y 5.3.4 muestran que a medida que se aumenta el reemplazo parcial de cemento por la mezcla cal puzolana 40%-60%, la densidad aparente del hormigón disminuye lo que explica por las menores densidades de la puzolana y de la cal, por lo tanto muestra que es un hormigón más liviano, sin embargo, las diferencias en densidades son de escasa magnitud, ya que las más bajas llegan al 96 % de la del hormigón patrón, esto es del orden de 100 kg/m³ como diferencia máxima.

Figura 5.3.5 Gráfico Densidad aparente (50P+50C)



Fuente: Elaboración propia, 2017.

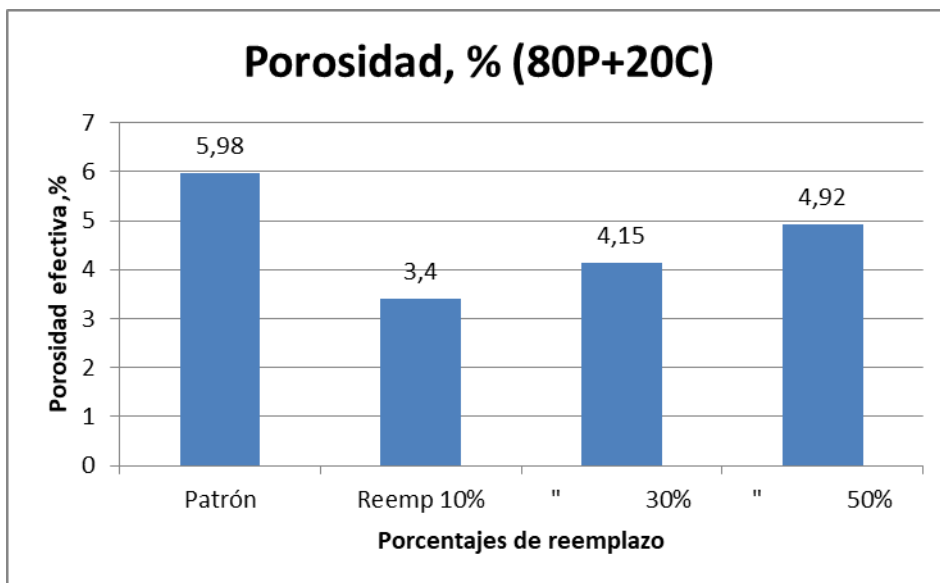
Figura 5.3.6 Gráfico relación Densidad aparente (50P+50C)



Fuente: Elaboración propia, 2017.

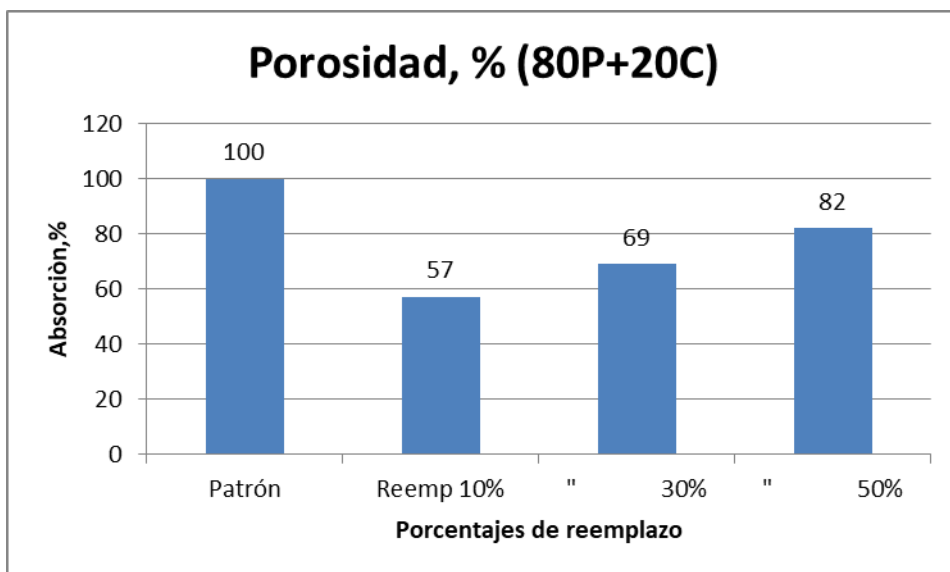
Las figuras 5.3.5 y 5.3.6 puede observarse que todos los hormigones con reemplazo de la mezcla cal puzolana 50%-50% por cemento resultaron con densidades aparentes menores que la del hormigón patrón, lo que explica por las menores densidades de la puzolana y de la cal. Sin embargo, las diferencias en densidades son de escasa magnitud, ya que las más bajas llegan al 96 % de la del hormigón patrón, esto es del orden de 100 kg/m³ como diferencia máxima.

Figura 5.3.7 Gráfico porosidad 28 días, % (80P+20C)



Fuente: Elaboración propia, 2017.

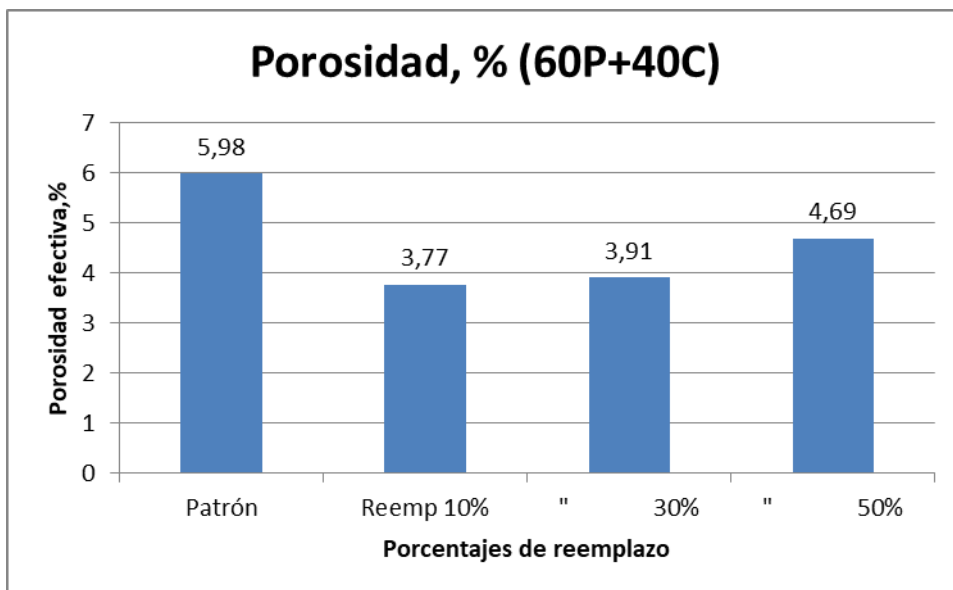
Figura 5.3.8 Gráfico relación Porosidad, % (80P+20C)



Fuente: Elaboración propia, 2017.

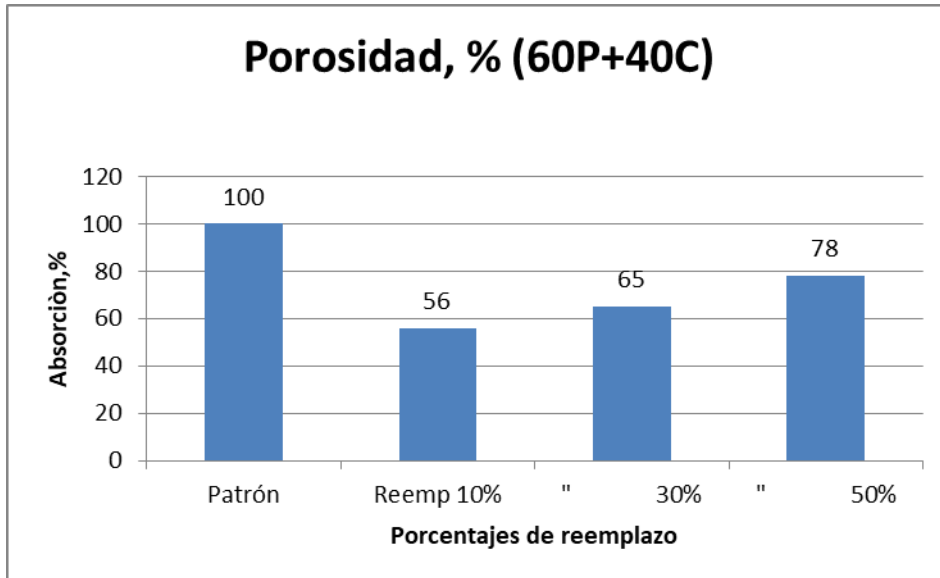
En las figuras 5.3.7 y 5.3.8 puede observarse que todos los hormigones con reemplazo de la mezcla cal puzolana 20%-80% por cemento, resultaron con una significativa reducción de su porosidad, lo que se debería a que dichas mezclas aportan una proporción elevada de partículas finas para colmatar poros.

Figura 5.3.9 Gráfico porosidad 28 días, % (60P+40C)



Fuente: Elaboración propia, 2017.

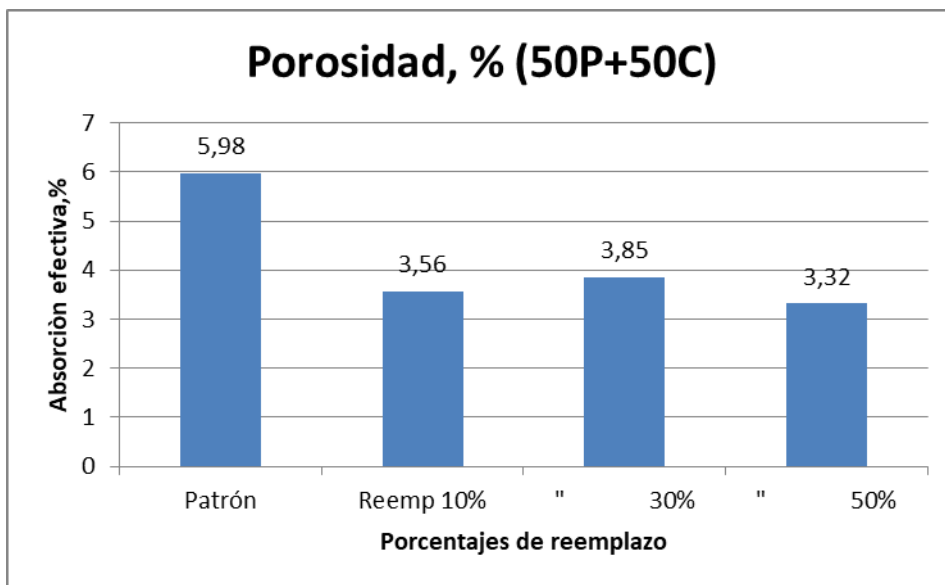
Figura 5.3.10 Gráfico relación Porosidad, % (60P+40C)



Fuente: Elaboración propia, 2017.

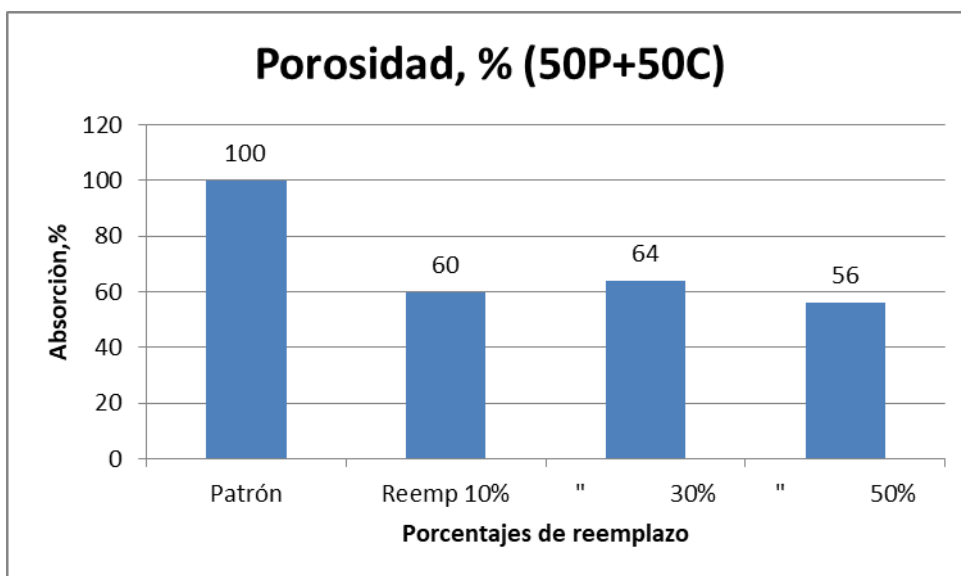
En las figuras 5.3.9 y 5.3.10 puede observarse que todos los hormigones con reemplazo de la mezcla cal puzolana 40%-60% por cemento, resultaron con una significativa reducción de su porosidad, lo que se debería a que dichas mezclas aportan una proporción elevada de partículas finas para colmatar poros.

Figura 5.3.11 Gráfico porosidad 28 días, % (50P+50C)



Fuente: Elaboración propia, 2017.

Figura 5.3.12 Gráfico relación Porosidad, % (50P+50C)



Fuente: Elaboración propia, 2017.

En las figuras 5.3.11 y 5.3.12 puede observarse que todos los hormigones con reemplazo de la mezcla cal puzolana 50%-50% por cemento, resultaron con una significativa reducción de su porosidad, lo que se debería a que dichas mezclas aportan una proporción elevada de partículas finas para colmatar poros.

5.4 Resultados ensayos de compresión

Tabla 5.4.1 Resumen Resistencias a compresión.

Mezcla 80P+20C								
Reemplazo	3 días, Mpa	R. Relativa %	7 días, MPa	R. Relativa %	28 días, MPa	R. Relativa %	56 días, MPa	R. Relativa %
0 %	14,7	100	21,9	100	34,2	100	39,3	100
10 %	**15,3	104	18,2	83	30,2	88	39,5	100,5
30 %	*13,5	92	16,4	75	26,5	77	36,5	92,9
50 %	3,9	27	5,1	23	10,5	31	14,4	36,6
Mezcla 60P+40C								
Reemplazo	3 días, Mpa	R. Relativa %	7 días, MPa	R. Relativa %	28 días, MPa	R. Relativa %	56 días, MPa	R. Relativa %
0 %	14,7	100	21,9	100	34,2	100	39,3	100
10 %	13,5	92	19,1	87	28,9	85	39,1	99,5
30 %	11,8	80	16,1	74	26,2	77	34,5	87,8
50 %	4,3	29	5,4	25	9,2	27	16	40,7
Mezcla 50P+50C								
Reemplazo	3 días, Mpa	R. Relativa %	7 días, MPa	R. Relativa %	28 días, MPa	R. Relativa %	56 días, MPa	R. Relativa %
0 %	14,7	100	21,9	100	34,2	100	39,3	100
10 %	**12,2	83	14,7	67	22,6	66	33	84,0
30 %	*10	68	10,3	59	18,1	53	27,7	70,5
50 %	4,7	32	6,9	32	12,7	37	22,2	56,5

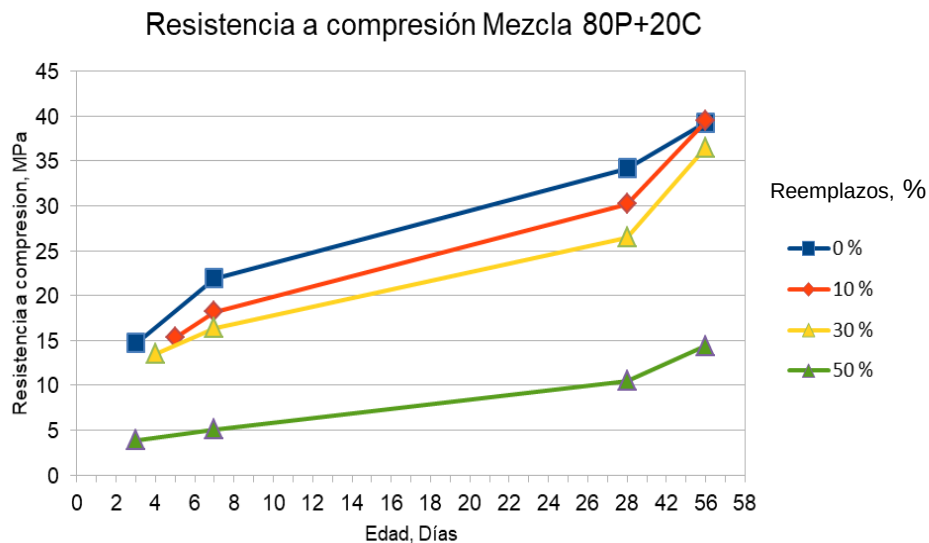
Fuente: Elaboración propia, 2017.

** Ensayo a 5 días.

* Ensayo a 4 días.

De la tabla 5.4.1 se puede observar que la mezcla con mejor comportamiento resistente corresponde a la mezcla 80P+20C, lo que podría deberse a que la puzolana al estar finamente dividida reacciona más rápido que la cal.

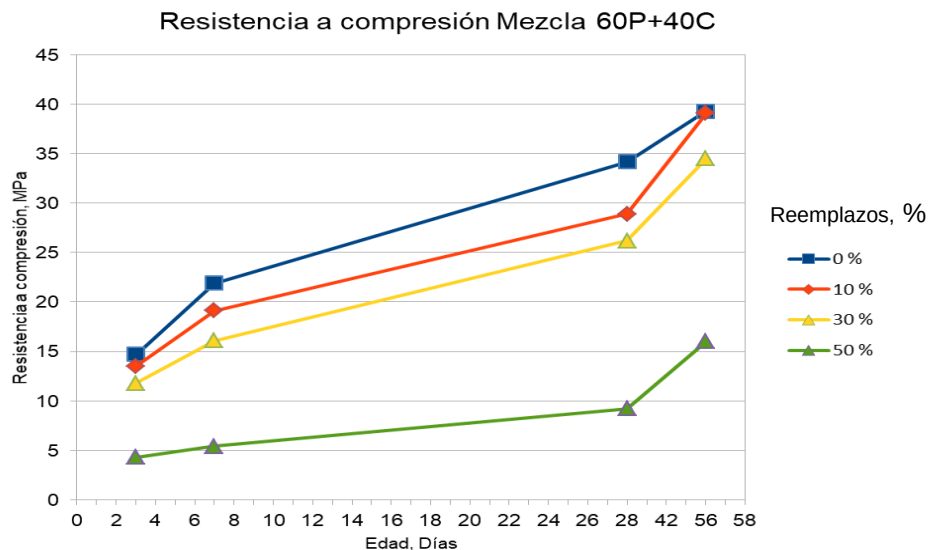
Figura 5.4.1: Resistencia a compresión Mezcla 80P+20C, según dosis de reemplazo.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

La figura 5.4.1 muestra que a medida que aumenta el reemplazo parcial de cemento por la mezcla cal puzolana 20%- 80%, disminuye la resistencia a la compresión del hormigón.

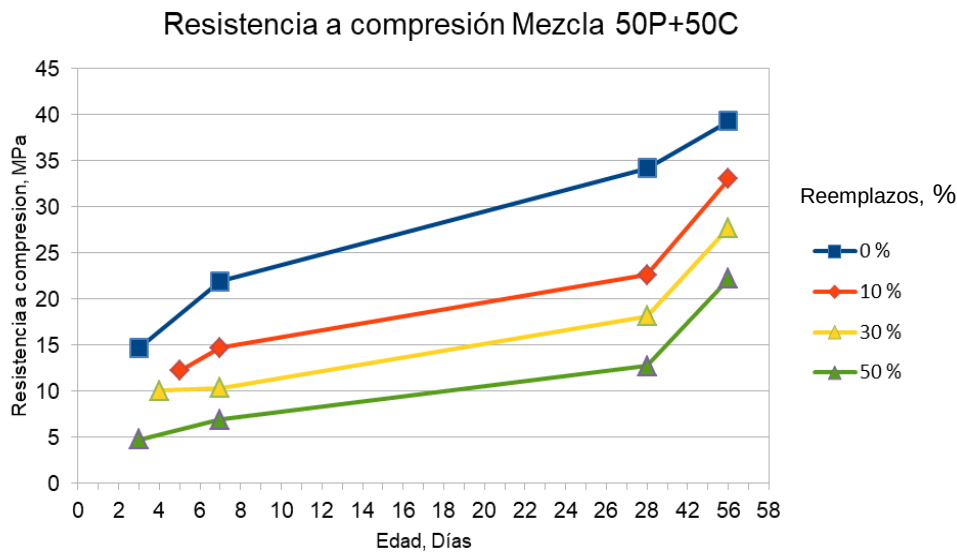
Figura 5.4.2: Resistencia a compresión Mezcla 60P+40C, según dosis de reemplazo.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

La figura 5.4.2 muestra que a medida que aumenta el reemplazo parcial de cemento por la mezcla cal puzolana 60%-40%, disminuye la resistencia a la compresión del hormigón.

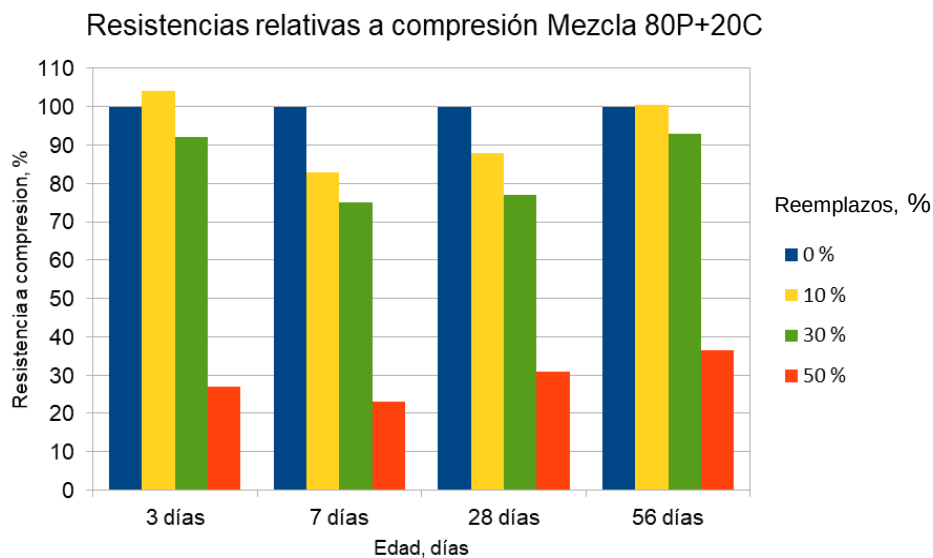
Figura 5.4.3: Resistencia a compresión Mezcla 50P+50C, según dosis de reemplazo.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

La figura 5.4.3 muestra que a medida que aumenta el reemplazo parcial de cemento por la mezcla cal puzolana 50%-50%, disminuye la resistencia a la compresión del hormigón.

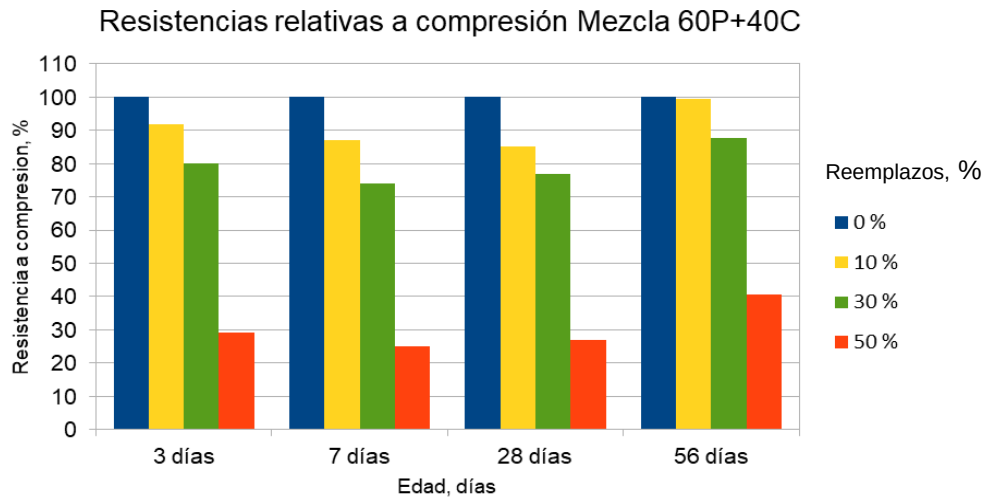
Figura 5.4.4: Resistencias relativas a compresión Mezcla 80P+20C



Fuente: Elaboración propia, 2017.

La figura 5.4.4 muestra que a medida que aumenta el reemplazo parcial de cemento por la mezcla cal puzolana 20%-80%, disminuye la resistencia a la compresión del hormigón.

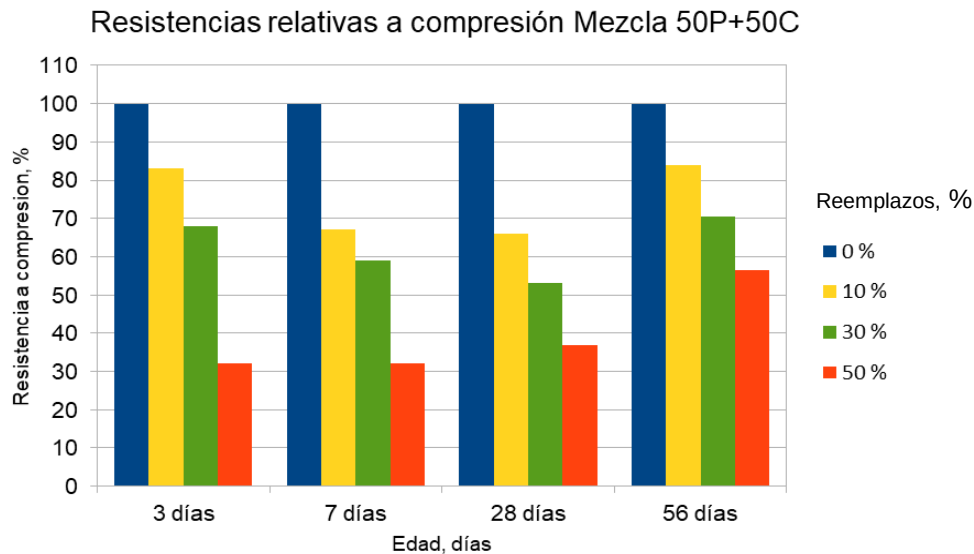
Figura 5.4.5: Resistencias relativas a compresión Mezcla 60P+40C



Fuente: Elaboración propia, 2017.

La figura 5.4.5 muestra que a medida que aumenta el reemplazo parcial de cemento por la mezcla cal puzolana 40%-60%, disminuye la resistencia a la compresión del hormigón.

Figura 5.4.6: Resistencias relativas a compresión Mezcla 50P+50C



Fuente: Elaboración propia, 2017.

La figura 5.4.6 muestra que a medida que aumenta el reemplazo parcial de cemento por la mezcla cal puzolana 50%-50%, disminuye la resistencia a la compresión del hormigón.

Tabla 5.4.2 Desarrollo de resistencias en el tiempo, %.

Mezcla	3 días	7 días	28 días	56 días
Patrón	37,4	55,7	87	100
Mezcla 80P+20C				
Reemp. 10%	**38,7	19,1	76,5	100,0
Reemp. 30%	*37,0	16,1	72,6	100,0
Reemp. 50%	27,1	5,4	72,9	100,0
Mezcla 60P+40C				
Reemp. 10%	34,5	46,1	73,9	100,0
Reemp. 30%	34,2	44,9	75,9	100,0
Reemp. 50%	26,9	35,4	57,5	100,0
Mezcla 50P+50C				
Reemp. 10%	**37,0	44,5	68,5	100,0
Reemp. 30%	*36,1	37,2	65,3	100,0
Reemp. 50%	21,2	31,1	57,2	100,0

Fuente: Elaboración propia, 2017.

** Ensayo a 5 días.

. * Ensayo a 4 días.

Figura 5.4.7: Desarrollo de resistencias en el tiempo, Mezcla 80P+20C

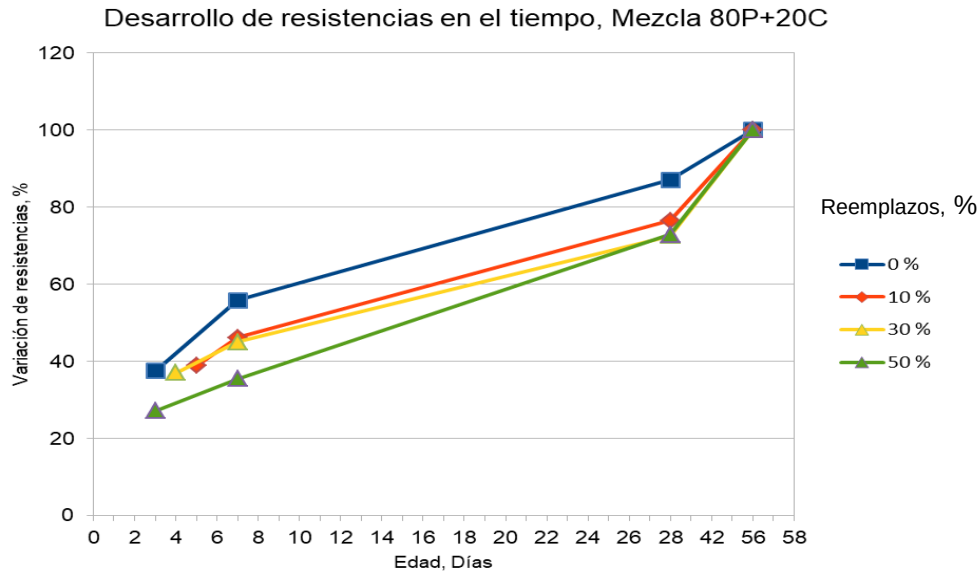


Figura 5.4.8: Desarrollo de resistencias en el tiempo, Mezcla 60P+40C.

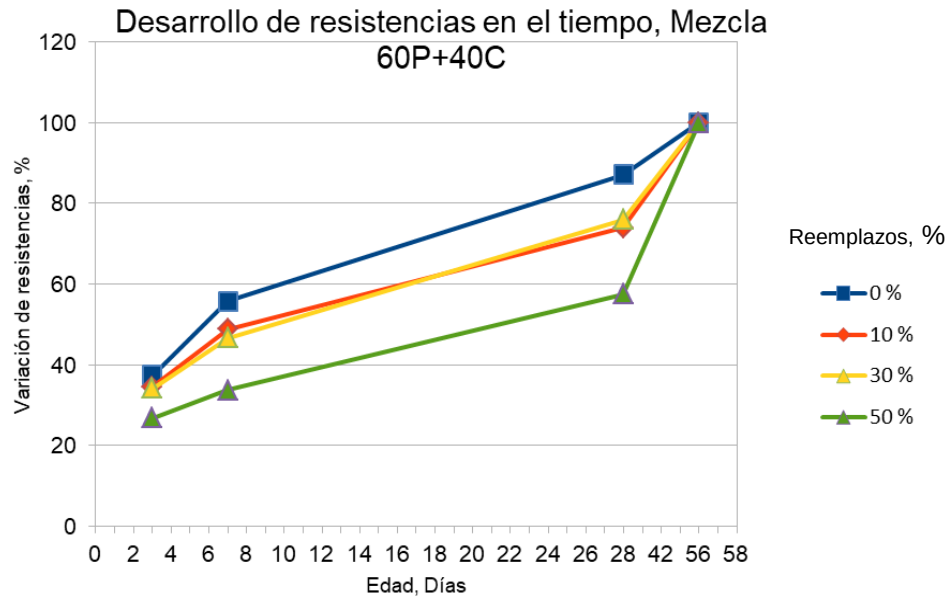
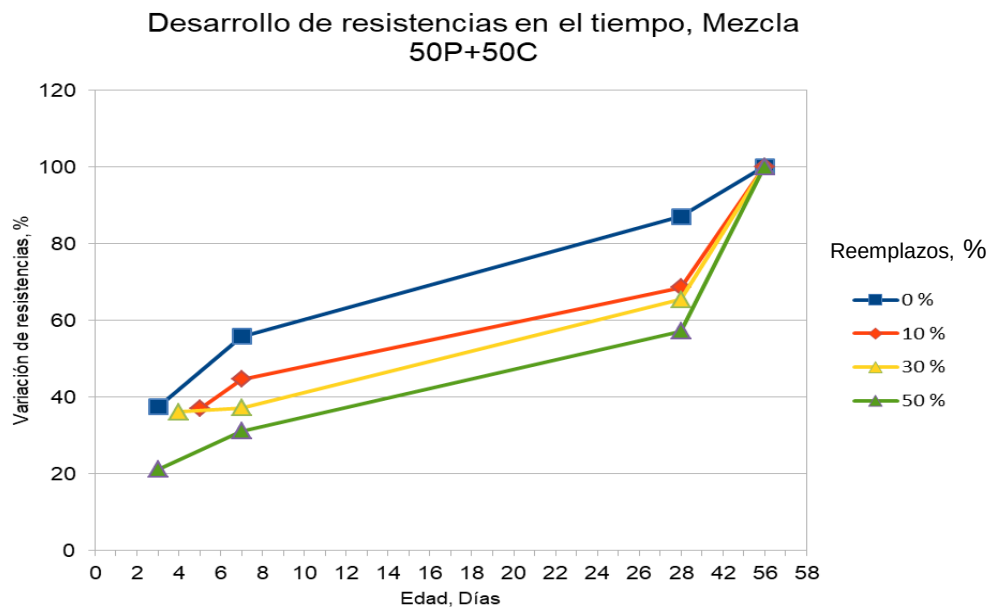


Figura 5.4.9: Desarrollo de resistencias en el tiempo, Mezcla 50P+50C.

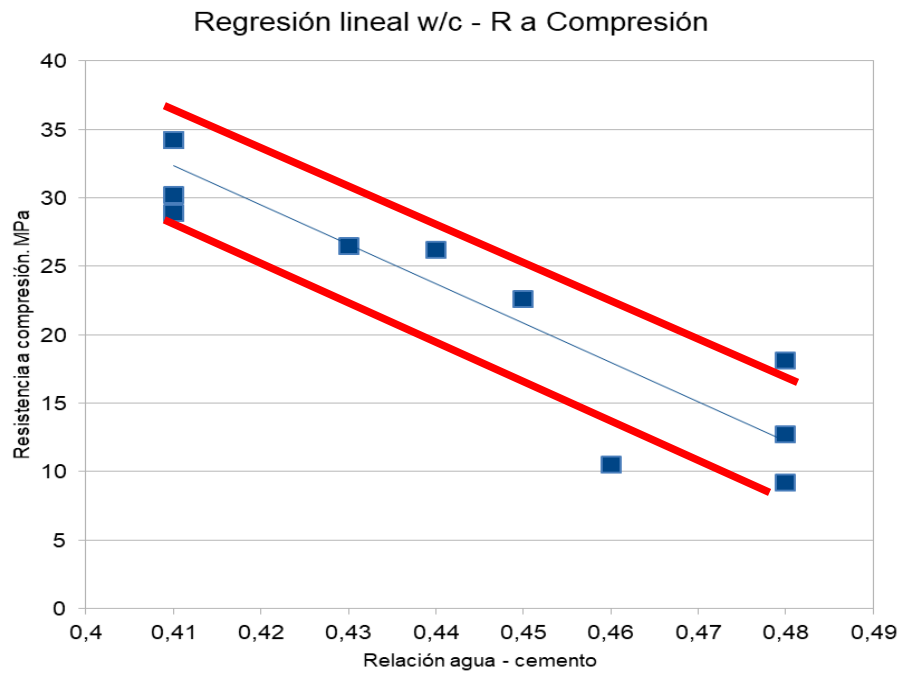


De las figuras 5.4.7, 5.4.8 y 5.4.9 se puede observar en general que los reemplazos de 10 y 30 % tienen un comportamiento similar en cuanto al desarrollo de resistencias, sin embargo, el reemplazo de 50% influye negativamente en el desarrollo de resistencias a primera edad.

Tabla 5.4.3 Correlación entre razón agua-cemento y resistencia a compresión.

Mezcla	% reemplazo	Razón A/C	R 28 días, Mpa
Patrón	0	0,41	34,2
20C+80P	10	0,41	30,2
	30	0,43	26,5
	50	0,46	10,5
40C+60P	10	0,41	28,9
	30	0,44	26,2
	50	0,48	9,2
50C+50P	10	0,45	22,6
	30	0,48	18,1
	50	0,48	12,7

Figura 5.4.10 Regresión lineal



$$r = -0,95$$

$$y = 148 - 283x$$

$$s = 3$$

En la figura 5.4.10 se puede observar una gráfica de regresión lineal, donde se tiene un coeficiente de correlación fuerte, de 0,95, por lo que se estima que la relación agua cemento influye directamente en la resistencia a compresión, de acuerdo a la ley de Abrams.

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y PROPUESTAS A FUTURAS INVESTIGACIONES.

6.1 Conclusiones

De los resultados previstos de la investigación se logra establecer las siguientes conclusiones:

- 1.- La demanda de agua aumenta a medida que aumenta el reemplazo parcial de cemento por mezclas cal puzolana, debido a que las mezclas tienen más fino y cal que por sí sola demanda más agua. La relación agua cemento aumenta de la misma forma para cada reemplazo, debido a que para mantener la trabajabilidad de la mezcla se procedió a aumentar la dosis de agua.
- 2.- Con respecto a la densidad aparente, se aprecia que todos los hormigones con reemplazo de las mezclas cal - puzolana por cemento resultaron ser algo más livianos que el hormigón patrón, lo que se explica por las menores densidades de la puzolana y de la cal.
- 3.- Con respecto a la porosidad se aprecia que todos los hormigones en los que se reemplazó mezclas cal-puzolana por cemento, resultaron con una significativa reducción de su porosidad, lo que se debe a que dichas mezclas aportan una proporción elevada de partículas finas para colmatar poros.
- 4.- Con respecto a la resistencia a compresión se aprecia que a medida que aumenta el reemplazo parcial de cemento por mezclas cal – puzolana, disminuye la resistencia a la compresión del hormigón a los 3,7 y 28 días. También se puede concluir que la mezcla más resistente corresponde a 80% puzolana- 20% cal. Sin embargo, en la caída de resistencias a compresión sin duda está influyendo la mayor razón de agua cemento que fue necesaria emplear para obtener la docilidad constante. En efecto al estudiar la correlación entre la razón agua cemento y resistencia a la compresión, se observa que es muy fuerte y en consecuencia están muy relacionadas.

Como conclusión general se tiene que los resultados obtenidos son muy provisorios en cuanto a la factibilidad de reemplazar cemento por mezclas cal - puzolana. En primer término dichos reemplazos constituyen un valioso aporte en el mejoramiento de la durabilidad al permitir una significativa reducción de la porosidad de los hormigones resultantes. Respecto a la resistencia a compresión, si bien la de los hormigones con reemplazo han resultado menores que las del hormigón patrón, se ha logrado una considerable reducción de la cantidad de cemento empleado; en términos absolutos, las disminuciones de cemento para reemplazos de 10, 30 y 50% son de 41,123 y 205 kg/m³ respectivamente. Por otra parte el empleo de razones de agua cemento mayores ha influido negativamente en las resistencias de los hormigones con reemplazo, condición que podría revertirse mediante el empleo de mayores cantidades de aditivo reductor de agua para mantener el asentamiento.

6.2 Propuestas a futuras investigaciones.

De acuerdo a las conclusiones expuestas en la presente investigación y a los datos obtenidos, el reemplazo parcial de cemento por mezclas cal-puzolana, puede estudiarse posteriormente como las siguientes propuestas:

Reemplazar parcialmente el cemento por mezclas cal-puzolana más ricas en puzolana y con menor proporción de cal, manteniendo la razón agua cemento constante. Dichas mezclas del orden de:

95% Puzolana - 5% Cal.

90% Puzolana - 10% Cal.

También se sugiere llevar a cabo ensayos a mayores edades.

VII REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, R. (2007). Determinación de la influencia de las moléculas de sílice en el hormigón frente a su durabilidad. In. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.
- Aprianti S, E. (2017). A huge number of artificial waste material can be supplementary cementitious material (SCM) for concrete production – a review part II. *Journal of Cleaner Production*, 142, Part 4, 4178-4194. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.115>
- Arezoumandi, M., Volz, J., & Ortega, C. (2013). Effect of total cementitious content on shear strength of high-volume fly ash concrete beams. In.
- Argüelo, T., & Cuchi, A. (2008). Análisis ambiental asociado a los materiales de construcción. In.
- Calabuig, R. (2015). Efecto de la adición de cal en las propiedades mecánicas y durabilidad de hormigones con altos contenidos en cenizas volantes silíceas. In.
- Donatello, S., Fernandez, A., & Palomo, A. (2013). Very High Volume Fly Ash Cements. Early Age Hydration Study Using Na₂SO₄ as an Activator. In.
- Donatello, S., Palomo, A., & Fernandez, A. (2013). Durability of very high volume fly ash cement pastes and mortars in aggressive solutions. In.
- Hamblen, A. (2017). Portland Cement Association. Retrieved from <http://www.cement.org/cement-concrete-basics/concrete-materials/supplementary-cementing-materials>
- Isaia, G., Gastaldini, A., & Moares, R. (2003). Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high performance concrete. In.

- Lorca, P., Calabuig, R., & Soriano, L. (2014). Microconcrete with partial replacement of Portland cement by fly ash and hydrated lime addition. *Materials and Design*. In.
- Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. (2011). Supplementary cementitious materials. In.
- Malhorta, V. M., & Mehta, P. K. (1996). Pozzolanic and Cementitious Materials. *Advances in Concrete Technology*. In.
- Mehta, P. (1993). Concrete: Structure, properties and materials. In.
- Payá, J. (2005). Adiciones activas en el hormigón según EHE. Exigencias y posibilidades. Curso sobre tecnología del hormigón. In (Vol. I).
- Riquelme, S. (2011). Influencia de adiciones de cal sobre la permeabilidad y la resistencia de hormigones a edades mayores a 28 días. In.
- Rodriguez, C., Ruiz, E., Ortega, M., & Hansen, M. (2005). Nanostructure and irreversible colloidal behavior of $\text{Ca}(\text{OH})_2$: Implications in cultural heritage conservation. In.
- Singh, N. B. (2000). Hydration of bagasse-ash blended Portland cement ", *Cement & Concrete Research*. In (9 ed., Vol. 30, pp. 1485-1488).
- Swamy, R. (1986). Cement replacement materials. Series "Concrete technology and Design". In (Vol. 3).
- UNE-EN-459-1. (2011). Cales para la construcción. Parte 1 deficiones, especificaciones y criterios de conformidad. In.