



Facultad de ingeniería
Escuela de Construcción Civil

**Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de
mortero con reemplazo parcial de cemento por material
fino proveniente de conchas de almejas**

Por

Juan Pablo Palacios Martínez

**Tesis para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la
Ingeniería en Construcción y al Título de Ingeniero Constructor**

Profesor Guía: Dra. Patricia Martínez Ramírez

Septiembre, 2019

A mi familia, quienes apoyaron este largo proceso y especialmente a mi abuela Teresa Machuca quien siempre estuvo incondicionalmente alentándome.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mis padres, abuelas, hermanos, primos, tíos (as) y amigos, lo cuales siempre confiaron en mi para finalizar esta etapa en mi vida.

A Monserrat Carrasco, gracias por acompañarme en los momentos difíciles y darme día a día la motivación y ánimo para completar este proceso.

Gracias a mi profesora guía Patricia Martínez, por su confianza, paciencia y nivel de exigencia que fue primordial para dar término a esta etapa.

A sthefanie, Dana y Aldo quienes apoyaron y guiaron en los laboratorios de la Pontificia Universidad Católica, Universidad Técnica Federico Santa María y Universidad de Valparaíso

ÍNDICE

Dedicatoria.....	2
Agradecimientos	3
Lista de Figuras.....	7
Lista de Tablas	9
Resumen	10
Abstract.....	11
1. Antecedentes generales	12
1.1 Planteamiento del problema.....	12
1.2 Objetivos.....	14
1.2.1 Objetivo general	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
1.3 Hipótesis	14
1.4 Alcances	15
1.5 Estructura de la tesis	15
2. Antecedentes generales sobre morteros con material cementicio suplementario ..	16
2.1. Morteros	16
2.2. Aspectos generales del cemento	19
2.3. Aspectos generales de conchas de moluscos	22
2.3.1. Características de las conchas de moluscos	23
2.3.2. Usos de la concha de molusco en la construcción	23
2.4. Aspectos generales de la cal	22
2.5. Material Cementicio Suplementario (MCS)	27
2.6. Generalidades de las Puzolanas.....	29
2.6.1. Puzolanas	30
2.6.2. Reacción puzolánica	30

3.	Metodología de la investigación	31
3.1.	Diseño experimental.....	31
3.2.	Selección de materiales	31
3.3.	Procesamiento de conchas de moluscos.....	33
3.4.	Diseño del mortero	33
3.5.	Caracterización química y física del material fino proveniente de concha de almeja.....	37
3.5.1.	Caracterización química	37
3.5.2.	Caracterización física	37
3.6.	Caracterización física de la pasta	40
3.6.1.	Ensayo de consistencia normal.....	40
3.6.2.	Ensayo tiempo de fraguado.....	42
3.7.	Caracterización física y mecánica del mortero	43
3.7.1.	Ensayo de absorción capilar.....	43
3.7.2.	Ensayo de resistencia a la compresión	46
4.	Presentación y Análisis de resultados.....	48
4.1.	Caracterización de la arena	48
4.1.1.	Determinación de densidades	48
4.1.2.	Determinación de la granulometría de la arena	49
4.2.	Preparación concha de almeja.....	50
4.3.	Caracterización química y física del material fino proveniente de concha de almeja.....	53
4.3.1.	Caracterización química	53
4.3.2.	Caracterización física	55
4.4.	Caracterización física de la pasta	58
4.4.1.	Ensayo de consistencia normal.....	58
4.4.2.	Ensayo de tiempo de fraguado.....	60
4.5.	Caracterización física y mecánica del mortero	61
4.5.1.	Ensayo de absorción capilar	61

4.5.2. Ensayo de resistencia a la compresión	65
5. Conclusiones y propuesta de futuras investigaciones	70
5.1. Conclusiones	70
5.2. Investigaciones futuras.....	70
Bibliografía.....	72
Anexos	75

Lista de Figuras

Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología de la investigación	34
Figura 3.2 Equipo S2 Puma – Bruker	37
Figura 3.3 Matraz de Le Chatelier	39
Figura 3.4 Equipo - Mastersizer 2000.....	40
Figura 3.5 Vicat con sonda Tetmayer	41
Figura 3.6 Vicat con aguja	43
Figura 3.7 Esquema de Montaje del ensayo	45
Figura 3.8 Máquina utilizada para ensayo de resistencia a compresión, modelo UE34300 ..	47
Figura 4.1 Curva Granulométrica.....	50
Figura 4.2 Lavado de concha de almeja con soda cáustica.....	51
Figura 4.3 Secado y limpieza de cada concha de almeja	51
Figura 4.4 Equipo, Desgaste de los ángulos, Universidad de Valparaíso.....	52
Figura 4.5 Tamizado de concha de almeja por malla n° 200	52
Figura 4.6 Material - sin calcinar y calcinado.....	53
Figura 4.7 Matraz Le Chatelier con material sin calcinar.....	55
Figura 4.8 Matraz de Le Chatelier con material calcinado	56
Figura 4.9 Concha de almeja calcinada.....	57
Figura 4.10 Concha de almeja sin calcinar	58
Figura 4.11 Ensayo de consistencia normal “MP”	59
Figura 4.12 Resultado de consistencia normal.....	59
Figura 4.13 Ensayo de tiempo de fraguado.....	60
Figura 4.14 Resultado de tiempo de fraguado.....	61
Figura 4.15 Resultado de absorción capilar 90 días	62
Figura 4.16 Resultado de absorción capilar 240 días	63
Figura 4.17 Ensayo de resistencia a compresión	65

Figura 4.18 Probeta ensayada a compresión	65
Figura 4.19 Gráfico de resistencia a compresión – 28 días de edad	66
Figura 4.20 Gráfico de resistencia a compresión – 56 días de edad	67
Figura 4.21 Gráfico de resistencia a compresión – 90 días de edad	67
Figura 4.22 Gráfico de resistencia a compresión – 240 días de edad.....	68
Figura 4.23 Gráfico de resistencia a compresión 28, 56, 90 y 240 días de edad.....	69

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Análisis de los Óxidos del Cemento Portland	20
Tabla 3.1 Nomenclatura de las mezclas de mortero.....	36
Tabla 3.2 Muestras con conchas de almeja sin calcinar.....	36
Tabla 3.3 Muestras con conchas de almejas calcinadas.....	36
Tabla 3.4 Porcentaje de porosidad del mortero.....	36
Tabla 4.1: Resultados, Densidad real, neta y absorción de agua.....	48
Tabla 4.2: Resultados densidad aparente suelta de la arena.....	49
Tabla 4.3: Resultados densidad aparente compactada de la arena.....	49
Tabla 4.4 Análisis químico del material sin calcinar	46
Tabla 4.5 Análisis químico del material calcinado.....	54
Tabla 4.6 Datos peso específico sin calcinar.....	56
Tabla 4.8 Cantidad de agua absorbida desde inicio a fin de ensayo 28 días	62
Tabla 4.9 Evaluación de calidad de mortero a los 28 días de edad	63
Tabla 4.10 Cantidad de agua absorbida desde inicio a fin de ensayo 240 días.....	64
Tabla 4.11 Evaluación de calidad de mortero a los 28 días de edad.....	64

Resumen

El mortero es uno de los productos más utilizados en la actualidad, su fabricación consta de: áridos, agua, cemento y eventualmente aditivos y adiciones. Dentro de éstos, el material más contaminante en la mezcla es el cemento, ya que, en su confección se producen más de 4 mil toneladas de CO₂ al año, es por esto que se buscan nuevos materiales en su reemplazo que minimicen esta contaminación y tenga las mismas o mejores propiedades que el cemento.

Por otro lado, existe la contaminación provocada por las conchas de moluscos. Chile es uno de los países con mayores desembarques de recursos pesqueros, lo cual lo lleva a producir más de 300 mil toneladas de moluscos, es por ello que existe una elevada contaminación de conchas de moluscos, ya que éstas son desechadas en vertederos y/o devolviéndolas al mar en forma de desechos.

Dichos motivos el objetivo de la presente investigación fue analizar la utilización de conchas de almejas como material cementicio suplementario, ya que esto podría traer dos beneficios a la problemática descrita anteriormente: La utilización de conchas de almeja, lo cual disminuiría el volumen a desechar en vertederos y evitaría arrojarlas al mar; Por otro lado, minimizar la utilización de cemento, ya que éste genera un alto nivel de contaminación en su proceso de fabricación.

El programa experimental considera, la limpieza de las conchas de almejas y caracterización física y química del material, además de analizar el comportamiento físico y mecánico de la mezcla de mortero con reemplazo parcial de cemento por concha de almeja en un período de 28 a 240 días. Los ensayos asociados a dichas caracterizaciones son: Distribución de tamaño de partículas, fluorescencia de rayos X, ensayo de resistencia a compresión, consistencia normal, tiempo de fraguado y absorción capilar.

El resultado de este estudio fue que la hipótesis no fue validada, ya que, a mayor reemplazo de material fino proveniente de conchas de almejas, No superaban las propiedades físicas ni mecánicas respecto al mortero patrón convencional, sin embargo, si se logró igualar las propiedades en lagunas muestras. En las propiedades físicas, todas las probetas igualan a la muestra patrón excepto M45Cs/c, mientras que en las propiedades mecánicas las probetas M5Cs/c, M30Cs/c, M5Cc y M30Cc igualaron su resistencia a compresión del mortero patrón convencional a la edad de 240 días.

Abstract

One of the most widely used utensils nowadays is the mortar. Its fabrication ranges from arids, water, cement and, in some cases additives and additions. Among them, the most contaminant mixture is the cement mix for it, during its production, is responsible for the emission of over 4.000 tons of carbon dioxide a year. This called for the search of new materials which, by replacing it, would minimize this contamination and would have the same or even better properties than cement.

On the other hand, there is contamination caused by seashell residue. Chile is one of the countries with the most landing of fishing resources which means a production of over 300.000 tons of mollusk. This carries along pollution in the form of seashell shells, disposed in landfills or sent back to the sea as waste.

Said reasons motivated this research which studied the use of clam shells as cement-alternative. This could bring along two solutions to the aforementioned situation: using clam shells would reduce the amount of waste in landfills and the sea, it would also minimize the use of cement, and the contamination associated to its production.

The pilot program considers the cleaning of clam shells, the physical and chemical characterization of the material, and the physical and mechanical behavior analysis of the mortar sample with partial substitution of cement by clam in a 28-to-240-day span. The trials associated to such characteristics are: Particle size distribution, X-ray fluorescence, compression resistance trial, normal consistency, setting time, and capillary permeability.

The results of this study debunked the hypothesis. The substitution of cement by clam fine material did not outperform the physical or mechanical properties of the conventional mortar; some properties, however, were matched in some samples.

In the physical properties, all test tubes matched the pattern sample except for M45Cs/c, while in the mechanical properties the test tubes M5Cs/c, M30Cs/c, M5Cc y M30Cc matched its resistance to compression to the conventional pattern mortar after 240 days.

1. Antecedentes Generales

1.1 Planteamiento del Problema

En la actualidad, y desde hace cientos de años, el mortero es usado frecuentemente en la construcción, siendo algunas de sus aplicaciones: mortero de estuco, mortero de pega en uniones de piezas prefabricadas, como material de reparación, entre otras.

Para su confección son esenciales los áridos, agua, cemento y eventualmente aditivos y adiciones. Dentro de estos materiales uno de los más contaminantes en la mezcla de mortero es el cemento.

El cemento es obtenido mediante la pulverización del clinker, producido por la calcinación de piedras calizas y arcillas que genera los silicatos de calcio hidratados, a esta mezcla se le agrega yeso que actúa como retardador de fraguado (Yamaguchi, 1961).

En el año 2017 Chile tuvo una producción de 4 mil toneladas de cemento, lo que genera elevadas emisiones de dióxido de carbono (CChC, 2017). Pierre (2000) dice que por cada tonelada de cemento producido se genera una tonelada de dióxido de carbono.

Otro tipo de contaminación que el proceso de producción del cemento genera se debe a las partículas del polvillo, nocivos para la salud de los seres humanos, ya que de un 30% de partículas contaminantes, un 3% son partículas submicrónicas, este tipo de partículas es el más perjudicial para la salud, éstas pueden producir neumoconiosis a las personas que estén sometidos a una larga exposición (Villalonga, 1977).

Una forma de bajar la tasa de contaminación es disminuyendo el porcentaje de clinker en el cemento por medio de la incorporación de adiciones minerales durante el proceso productivo o en el momento de la fabricación del mortero u hormigón, estas adiciones podrían mejorar su desempeño tanto físico como mecánico (Schneider et al, 2011).

Se ha logrado reemplazar el cemento por materiales cementicios suplementarios, en un 10%, por una adición mineral "cal - Zeolita" la cual aumentó la resistencia a compresión del mortero en un 15% en el periodo de 7 a 60 días respecto a un mortero patrón (Dopico et al., 2008). Otro estudio relacionado es el de López & Castro (2010), ellos dicen que al reemplazar un 30% de puzolanas naturales por cemento en el periodo de 28 y 84 días, obtuvieron resultados desfavorables en la resistencia a compresión, disminuyendo ésta en un 27% respecto a un hormigón patrón convencional, sin embargo la impermeabilidad del hormigón aumentó considerablemente hasta en un 200% en comparación al hormigón patrón.

Por otro lado, los resultados de un estudio de Valdez et al (2009), dice que al reemplazar el cemento por un 25% de ceniza volante en el periodo de 7 a 28 días su resistencia a compresión es similar al mortero sin ceniza.

Según los estudios del Comité ACI 226 (1987) la actividad puzolánica continúa desarrollándose, aumentando la resistencia a compresión a edades posteriores de 28 a 150 días, siempre y cuando el hormigón sea conservado en condiciones de elevada humedad.

En este estudio se buscará reemplazar el cemento parcialmente por material fino proveniente de conchas de almeja calcinadas y sin calcinar, ya que, este es un material que cuenta con una elevada cantidad de óxido de calcio al igual que la cal, lo cual resultaría ser útil para la construcción. Este material se está desperdiciando, botándolo en vertederos y/o devolviendo al mar en forma de desechos, lo cual trae consigo un fuerte impacto ambiental debido a que los residuos contienen restos de materia orgánica que se descompone, provocando malos olores y el incremento de microorganismos e insectos (Biovalvo, 2013).

En el caso de los vertederos se puede llegar a producir lixiviación¹ la cual produce contaminación de las aguas subterráneas. Por otro lado, al arrojar los desechos al mar se produce una situación más perjudicial, ya que al arrojar estos desechos al mar se ocultaría toda la forma de vida que pudiese existir en el sector, generando una elevada tasa de mortalidad en la zona. (Biovalvo, 2013).

Por lo demás, Chile es un gran productor de recursos marinos contando con una zona exclusiva de 200 millas náuticas, lo cual nos lleva a tener grandes ventajas frente a otros países, logrando situarse entre los 10 países con mayores desembarques de recursos pesqueros (Subpesca, 2014).

En el año 2016 Chile tuvo un desembarque total de 2.878.886 toneladas de recursos pesqueros. Los centros de acuicultura proporcionan el 37% entre especies salmónidas y moluscos, de este 37% un 29% equivalen a moluscos (Sernapesca, 2017).

Debido a que las conchas de los moluscos son estructuras altamente mineralizadas presentan gran dureza y rigidez, es por esa característica que se están estudiando y usando en la construcción (Marin et al., 2008).

Existen investigaciones satisfactorias reemplazando los áridos por conchas de moluscos trituradas previa limpieza y eliminación del material orgánico mediante tratamiento térmico, logrando reemplazar hasta un 25% como árido grueso y un 12,5% por árido fino, estos resultados fueron adecuados para hormigón estructural (Martínez, 2016).

¹ Lixiviación: *Proceso en el que un disolvente líquido se pone en contacto con un sólido, produciendo la disolución de uno de los componentes sólidos.*

Un equipo de investigadores de la Universidad de Sevilla patentó un material con alta capacidad de resistencia al fuego, lograron reemplazar hasta un 60% de áridos por conchas de moluscos, logrando materializarlo en tabiques, cielos falsos, entre otros (Leiva, et al 2006).

En esta investigación se plantea implementar el uso de los desechos de los moluscos para transformarlo en un material fino para confeccionar un mortero, ya que estos presentan un 95% en materia inorgánica (CaCO_3), lo cual con su debido tratamiento mecánico y/o térmico podría reaccionar con el cemento y mejorar las propiedades físicas y/o mecánicas (Marin et al., 2008).

Para realizar este estudio se confeccionarán 2 morteros distintos, uno con el material calcinado y el otro con el material sin calcinar. Estos materiales se irán reemplazando por el cemento en distintas proporciones (5, 15, 30 y 45%) y se verificará mediante ensayos físicos y mecánicos cuál de estos materiales proporciona mayores mejoras al mortero comparándolo con un mortero patrón convencional, los ensayos a realizar serán: resistencia a compresión, consistencia normal, tiempo de fraguado y absorción capilar.

Si los resultados de estos ensayos resultan cumplir con las normas y logran mejorar algunas propiedades se podrá asignar un respectivo uso para la construcción.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Determinar el comportamiento físico y mecánico de un mortero con reemplazo parcial del cemento por material fino proveniente de la trituración de conchas de moluscos tratados.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar química y físicamente el material fino proveniente de conchas de moluscos calcinadas y sin calcinar.
- Caracterizar físicamente el mortero con material fino proveniente de conchas de moluscos.
- Caracterizar mecánicamente del mortero con material fino proveniente de conchas de moluscos

1.3 Hipótesis

“El aumento de la proporción de conchas de almeja finamente molidas mejorará las propiedades físicas y mecánicas del mortero”.

1.4 Alcances

- Se utilizará la concha de almeja.
- Se utilizará cemento portland puzolánico.
- La calcinación de las conchas de almeja y ensayo de Fluorescencia de Rayos X se realizarán en la Universidad Técnica Federico Santa María.
- El ensayo de resistencia a compresión y distribución tamaño de partícula se realizarán en la Pontificia Universidad Católica de Chile – Campus San Joaquín
- El desarrollo y ensayos de las probetas de mortero serán realizados en el laboratorio de la Universidad de Valparaíso ubicado en Playa Ancha.

1.5 Estructura de la tesis

En el capítulo 1, se dan a conocer los antecedentes generales del estudio, identificando la problemática y su debida justificación, entre otras cosas se abordan los objetivos, hipótesis y alcances.

En el capítulo 2, se presentan los aspectos fundamentales sobre los morteros de cal, así como también cómo funcionan las adiciones en los morteros, estado del arte de los desechos de moluscos y definiciones que permitan la comprensión del estudio.

En el capítulo 3, se exponen aspectos relacionados con los procesos de fabricación del material fino proveniente de conchas de almeja. Además de dar a conocer los procedimientos para la confección de probetas y sus respectivos ensayos.

En el capítulo 4, se presentarán y analizarán los resultados obtenidos con este residuo.

En el capítulo 5, Se darán a conocer las conclusiones con los datos obtenidos en el capítulo anterior, además se verificar la hipótesis y entregar recomendaciones para posibles nuevas investigaciones.

2. Antecedentes generales sobre morteros con material cementicio suplementario

2.1. Morteros

Hoy en día los morteros son indispensables para la construcción, es por ello que resultan ser frecuentemente estudiados, su composición es básicamente, agua, cemento, áridos finos y eventualmente aditivos y/o adiciones.

En la antigüedad los morteros eran preparados por calcinación de rocas carbonatadas, apagado de cal y su mezcla con arena. La temperatura del horno para la descomposición del carbonato de calcio era de sólo 1000° C. (Álvarez et al,sf).

También existen datos que indican en el siglo XVII se usaban morteros con cal viva en Chile, la cual era abastecida a Santiago desde caleras existentes en la región: Melón en el valle de Aconcagua y Polpaico en las cercanías de dicha Ciudad. Cabe destacar que también existía la cal proveniente de conchas de moluscos, sin embargo, estas últimas sólo se utilizaban como pinturas para blanquear muros (De Ramón y Larrain, 1982).

Por otro lado, Furlan (1975) y Rassineux (1989) generalizaron el uso de los morteros de cal y puzolana, ya que, se insiste sobre el hecho de que para obtener una buena cal hay que partir de una caliza muy pura. En consecuencia, las calizas arcillosas eran rechazadas sistemáticamente (como se cita en Álvarez et al,sf).

2.1.1. Propiedades de los morteros

Los morteros se estudian física y mecánicamente, además estas propiedades son diferenciadas en estado fresco y endurecido respectivamente.

2.1.1.1. Propiedades en estado fresco

Fase en que el mortero es trabajable y depende netamente del tiempo de fraguado, el cual se ve influenciado por la temperatura en que se trabaja, humedad ambiente, dosificación de la mezcla, entre otras condiciones.

En esta fase se estudian las propiedades físicas, las cuales son:

- a) Consistencia: Es el grado de firmeza o de la facilidad para deformarse el mortero recién mezclado, esta se clasifica según la NCh 2257/1 of96 "Morteros – Determinación de la consistencia – Parte 1: Método del extendido en la mesa de sacudidas".
- b) Tiempo de utilización o de trabajabilidad: Es el periodo que va desde su amasado hasta el principio de fraguado, este periodo puede aumentar o disminuir dependiendo de la temperatura, aditivos o adiciones empleadas al mortero (UNE-EN, 1015-9).

2.1.1.2. Propiedades en estado endurecido

Es la fase en la que el mortero pierde su trabajabilidad, pero aumenta su capacidad de resistencia, en esta fase se estudian propiedades físicas y mecánicas las cuales son:

a) Propiedades físicas

- a.1) Durabilidad: Capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas a las que está expuesta y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes, tales como cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural (EHE-08, 2008).

La durabilidad se puede ver afectada por factores físicos, mecánicos, químicos y biológicos. Las físicas son aquellas derivadas de los cambios volumétricos que experimenta el hormigón en cualquiera de sus estados, debido a los cambios de humedad, temperatura y variaciones de masa (Becker, 2003). En los factores mecánicos se ven influenciados por sollicitaciones externas, entre ellas las cargas, sobrecargas, impactos, vibraciones, etc, cualquiera que pudiese afectar el funcionamiento estructural. Químicamente se ve afectado por la permeabilidad que tenga la estructura o recubrimiento de hormigón, por último, los factores biológicos, en los cuales el más relevante es por la vegetación, ya que puede generar fisuración debido a fuerzas expansivas que generan las raíces, estas tienden a penetrar en fisuras existentes y/o puntos débiles del hormigón.

- a.2) Porosidad: se consideran los espacios vacíos que quedan en la masa de hormigón y morteros a consecuencia de la evaporación del agua excedente del amasado y del aire atrapado en su manipulación (Castro, 2009).

Los agentes agresivos que disminuyen la durabilidad del hormigón se introducen en éste utilizando la parte de su estructura interna de poros que está conectada al exterior. Es por

esta razón la gran importancia de la porosidad en relación con un posible control de la durabilidad. A continuación, se definirán 3 tipos de poros.

a.2.1) Poros de gel: Sus tamaños oscilan desde valores menores a 15A hasta los 25A. Forman los espacios intersticiales del gel de cemento. Intercambian agua con el ambiente cuando se secan a humedades menores a 20% .

a.2.2) Poros capilares: Poseen forma y tamaño variable (2nm a 1um) Se encuentran interconectados y abiertos al exterior. Forman parte de pastas permeables y vulnerables a los agentes externos.

a.2.3) Poros de aire: Corresponden a burbujas de aire atrapadas. No están interconectados. Sus dimensiones son mayores de 0,05mm. Presentan un efecto beneficioso para la durabilidad.

a.3) Permeabilidad: corresponde a la facilidad con la cual los líquidos y los gases pueden viajar a través del mortero u hormigón debido a la existencia de un gradiente de presión entre dos caras del mismo (Fernandez, 2003).

Existen dos tipos de Permeabilidad definidas a continuación:

a.3.1) Permeabilidad potencial: Permeabilidad medida sobre probetas confeccionadas en obra, las que se llenan y compactan según NCh 1017, manteniéndose sumergidas en agua saturada con cal desde el momento de su confección. En laboratorio deben ser desmoldadas según NCh 1017 y mantenidas sumergidas en agua saturada con cal hasta los 28 días de edad (Comité de Durabilidad del Hormigón – ICH, 2009).

a.3.2) Permeabilidad real: Permeabilidad del recubrimiento superficial del elemento de hormigón de servicio (Comité de Durabilidad del Hormigón – ICH. 2009).

b) Propiedades mecánicas

b.1) Resistencias mecánicas: Las resistencias a flexión y a compresión son las propiedades mecánicas más importantes que se evalúan en los morteros, es un requisito esencial, ya que esto permite clasificarlos (M20, M40, etc) para ello es necesario conocer la NCh158.0f67. Los factores que tienen gran influencia en sus resistencias son

dosificaciones, formas de ejecución, condiciones de curados y calidad de los componentes empleados.

- b.2) Adherencia: Es la capacidad que tiene el mortero para absorber tensiones normales o tangenciales a la superficie de otro material. Esta se mide según la NCh 2471 of2000 “Morteros – Ensayo de adherencia – Método de tracción directa”.

2.2. Aspectos generales del cemento

Aspdin fabrica por primera vez el cemento portland patentándolo en el año 1824, el cual contenía caliza y arcilla, este fue el primer cemento artificial. El invento consistió en cocer en un horno a elevadas temperaturas una mezcla molida de creta calcinada y arcilla, el nombre se debió a que el color era parecido a la piedra natural de la localidad inglesa de portland (Yepes, 2013).

Actualmente el cemento se define según NCh 148 of 68 “Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales” como un material pulverizado que por adición de una cantidad conveniente de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire.

a) Fabricación del Cemento

El cemento es un producto que se obtiene de la molienda conjunta de clínquer y yeso. Durante el proceso de molienda se pueden adicionar otros productos naturales o artificiales constituyendo los “cementos portland con adiciones” o “especiales”, estas adiciones pretenden mejorar propiedades del mortero. Entre las adiciones más conocidas y utilizadas están las puzolanas artificiales, las cuales destacan las cenizas volantes y las escorias granuladas de alto horno (Lucero, 2009).

Estas adiciones presentan una reactividad química potencial, que se activa durante la hidratación del clínker a temperatura ambiente. Así, las puzolanas y cenizas volantes reaccionan con hidróxido de calcio liberado durante la hidratación de los componentes activos del clínker (Lucero, 2009).

b) Composición química del cemento

Se puede sintetizar los componentes del cemento en sus 3 principales óxidos: óxido de calcio (CaO) – dióxido de silicio (SiO₂) y Trióxido de dialuminio (Al₂O₃) como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Análisis de los Óxidos del Cemento Portland (Mehta y Monteiro, 2006).

Nombre del compuesto	Nomenclatura	%
Óxido de Calcio	CaO	65,0%
Dióxido de Sílice	SiO ₂	21,0%
Trióxido de dialuminio	Al ₂ O ₃	5,2%
Trióxido Dihierro	Fe ₂ O ₃	2,9%
Trióxido de Azufre	SO ₃	2,0%
Otros óxidos	-	3,9%

2.2.1. Hidratación del cemento

El agua de amasado cumple una función relevante en el proceso de hidratación del cemento, ya que esta hace que los silicatos y aluminatos en el cemento se hidraten, formando productos que otorgan a la pasta mayor resistencia y durabilidad.

- Hidratación de los silicatos: La hidratación del silicato tricálcico (C₃S) es responsable de la alta resistencia inicial del cemento, este pasa del fraguado inicial al final a muy corto plazo, sin embargo, el silicato bicálcico (C₂S), se demora un poco más de tiempo para fraguar, este desarrolla su resistencia a largo plazo (Munizaga, 2009).
- Hidratación de los aluminatos: El aluminato tricálcico (C₃A) provoca casi un hidratado inmediato, por lo tanto, no otorga las mejores propiedades al fraguado, es por ello que a la mezcla se le debe agregar yeso, por otro lado, el ferroaluminato tetracálcico (C₄AF), actúa de manera más lenta, su función es bajar la temperatura de fusión del clinker, su fraguado es lento y solo desarrolla baja resistencia (Mehta y Monteiro, 2006).

Las ecuaciones entre silicatos y agua son las siguientes:

- Silicato tricálcico + agua = $2 C_3S + 6 H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3 Ca (OH)_2$
- Silicato bicálcico + agua = $2 C_2S + 6 H \rightarrow C_3S_2H_3 + Ca (OH)_2$

c) Clasificación de Cementos

La NCh 148 of 68 "Cemento – Terminología, Clasificación y especificaciones generales" clasifica los cementos de acuerdo con su composición en las siguientes clases:

- c.1) Cemento Portland: Es el producto que se obtiene de la molienda conjunta del clinker y el yeso y que puede aceptar hasta un 3% de materias extrañas.
- c.2) Cemento Portland Puzolánico: Es el cemento en cuya composición entrará puzolana en una proporción no superior al 30% en peso del producto terminado.
- c.3) Cemento Puzolánico: Es el cemento en cuya composición entrará puzolana en una proporción entre el 30% y 50% en peso del producto terminado.
- c.4) Cemento Portland siderúrgico: Es el cemento en cuya composición habrá escoria básica granulada de alto horno en una proporción no superior al 30% del peso del producto terminado.
- c.5) Cemento siderúrgico: Es el cemento en cuya composición habrá una proporción de escoria básica granulada comprendida entre el 30% y 75% del peso del producto terminado.

d) Propiedades del cemento

El cemento es un material finamente molido que, al ser amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece incluso bajo el agua por medio de reacciones y procesos de hidratación.

Este material tiene como función unir los materiales que componen el mortero. Esta mezcla al endurecer tiene la capacidad de conservar su resistencia y estabilidad, es por ello que es llamado "conglomerante hidráulico".

- d.1) Finura: El tamaño de los granos de cemento está comprendido entre 2 y 150 micrones. Los granos más activos son aquellos comprendidos entre 3 y 30 micrones. Los granos menores de 3 micrones se hidratan casi instantáneamente al entrar en contacto con el agua, mientras que los granos superiores a 60 micrones, son prácticamente inertes, ya que su hidratación es extremadamente lenta. (Cordova, 2017). Sin embargo, los valores descritos anteriormente, no tienen relación con el tamaño de partícula de las cales, ya que estas partículas son inferiores a 1 micra, es por esto que tiene mejores propiedades de impermeabilidad, capilaridad, porosidad, entre otras (Galván y Velázquez, 2011).

Por otra parte, las cenizas de conchas de moluscos resultan ser activos con un tamaño de 45 micrones según Ubong (2017). Sin embargo, Etuk (2012) logra un tamaño de 63 micrones, logrando activar las cenizas de conchas de moluscos. En este caso la finura no fue un factor relevante para la activación de las cenizas de conchas de moluscos, esto se puede deber a los diferentes tratamientos, tanto de limpieza como de temperaturas realizados al material como se indica en la sección 2.3.3.

- d.2) Peso específico absoluto o densidad real: Es la relación entre el peso del cemento y en volumen real que ocupan los granos (Cordova, 2017).
- d.3) Tiempo de fraguado: Es el tiempo que transcurre entre el instante en que el cemento se mezcla con agua para formar una pasta y el momento en que la pasta pierde plasticidad.
- d.4) Consistencia normal: Es la cantidad de agua expresada como porcentaje del peso del cemento, que confiere a la pasta una plasticidad determinada.
- d.5) Resistencias mecánicas: Los cementos deben ser capaces de cumplir con las resistencias dadas por las normas NCh 158 of.67.

2.3. Aspectos generales de conchas de moluscos

2.3.1. Características de las conchas de moluscos

La mayoría de las conchas de moluscos están formadas casi en un 95% por una parte inorgánica (CaCO_3), y por un 5% de componente orgánico fundamentalmente proteico (Marin et al., 2008).

De acuerdo con resultados de ensayos de fluorescencia de rayos X, Martínez (2016) logró determinar que la composición química de las conchas de moluscos, son similares independientemente del tipo de especie.

Dentro de sus características es importante mencionar que son materiales frágiles o semi frágiles, ya que son sensibles a defectos iniciales como poros y fisuras, pero la dureza es tal, que impide que se propaguen dichos defectos (Barthelat, 2010).

Las conchas de moluscos es un material que se está comenzando a explotar en todo el mundo, sobre todo en países costeros con mayores desembarques pesqueros. Chile se sitúa entre los 10 países con mayores recursos pesqueros, debido a que es un país con una zona exclusiva de 200 millas náuticas. En el año 2016 se extrajeron aproximadamente 308.000 toneladas de moluscos (Sernapesca, 2017).

2.3.2. Usos de la concha de molusco en la construcción

Actualmente existen diversos estudios que incorporan las conchas de los moluscos a la construcción como agregados. ANEFA (2005) realiza estimaciones anuales de la explotación de áridos, la cual determinó que se utiliza aproximadamente 11 toneladas de áridos por habitante.

Debido a esta sobreexplotación de áridos se ha ido tomando conciencia y visto la necesidad de buscar materias primas no explotadas, es por ello que existen diversos estudios que implementan el uso de conchas de moluscos como material de construcción (Martínez, 2016).

Las conchas de bígara es una de las más utilizadas en el hormigón, estas se han utilizado como reemplazo parcial de las gravas o gravillas en proporciones de 10%, 20% y 30% (Falade 1995). Adegoke (2008) también utilizó conchas de bígara en su estudio teniendo resultados similares a Falade, disminuyendo su resistencia a compresión y a flexión en un periodo de 28 días, a medida que se aumentaba el porcentaje de reemplazo.

En la Universidad de Coruña la investigadora Martínez (2016) estudió el comportamiento de la concha de mejillón como árido para la fabricación de hormigones en masa logrando resultados satisfactorios reemplazando los áridos por conchas de moluscos previa limpieza, pudiendo reemplazar hasta un 25% como árido grueso y un 12,5% árido fino, estos resultaron adecuados para hormigón estructural.

Por otra parte, un equipo de investigadores de la Universidad de Sevilla patentó un material con alta capacidad de resistencia al fuego, lograron reemplazar hasta un 60% de áridos por conchas de moluscos. Logrando materializarlo en tabiques, cielos falsos, entre otros (Leiva, et al 2006).

También existe una investigación derivada de un proyecto llamado Biolvavo (2013) el cual busca investigar sobre las posibilidades de utilización de subproductos derivados del residuo de concha de mejillón para elaborar materiales de construcción. Entre los subproductos estudiados está el mortero, en el cual se logró sustituir arena convencional por una combinación de arena fina y arena gruesa de mejillón, estas sustituciones son de 25%, 50%, 75% y 100%, para poder evaluar como varían las propiedades a medida que se aumenta el contenido de concha. Se concluyó que a medida que aumenta

el contenido de mejillón como arena, la consistencia aumenta, mientras que la densidad, la resistencia a flexión y compresión disminuye.

En el año 2014 otro autor logra llegar a una conclusión similar que Biovalvo, en esta investigación se reemplazó parcialmente el árido por 4 especies de conchas de moluscos, Abalón rojo, Mejillón, almeja y ostión, Según Vallejos (2014) al aumentar el porcentaje de conchas de moluscos como reemplazo de árido, la resistencia a compresión y adherencia disminuye, mientras que la retentividad aumenta respecto a un mortero patrón convencional.

Existen otros estudios relacionados, los cuales buscan reemplazar cemento por conchas de moluscos como material fino, Etuk et al (2012) y Villa (2006), logran reemplazar conchas de moluscos, obteniendo mejoras en las resistencias a compresión. Etuk et al (2012) incorporan ceniza de bigaro y ostra como adición al hormigón. A estas conchas se les realizó un ensayo de fluorescencia de rayos X para determinar los elementos químicos existentes, resultaron tener capacidades puzolánicas, lo cual se vio directamente reflejado en el tiempo de fraguado, ya que la mezcla se demoraba más en fraguar a medida que se aumentaba el porcentaje de reemplazo a la mezcla de hormigón. Por otro lado, las resistencias mecánicas fueron satisfactorias para porcentajes de 15% de concha de ostra y 10% de concha de bigaro las cuales se comportaron similares a muestras patrones. Mientras que Villa (2006) adicionó conchas de moluscos trituradas en proporciones de 5, 10, 20, 30 y 40% al mortero con una finura de 70,15 micrones, superiores a las nombradas en la sección 2.2.1. d.1., sin embargo, obtuvo mejoras en los resultados de resistencia a compresión con adición de 5%, superando a la muestra patrón convencional.

2.3.3. Tratamiento de conchas de moluscos

La mayoría de los autores no mencionan haber llevado a cabo ningún tipo de limpieza o tratamiento a las conchas de moluscos, en su totalidad buscan abaratar costos por medio de un simple lavado de las conchas con agua limpia y secado a temperatura ambiente, como lo mencionan entre ellos, Etuk et al (2012) y Ubong et al (2017), los cuales lavaron con agua limpia y secaron por 3 y 7 días al sol respectivamente. Sin embargo, estos autores realizaron una activación mecánica y térmica de las conchas de moluscos aplicando temperaturas entre 500°C y 1000°C, logrando por parte de Etuk et al (2012) un tamaño de partícula de 63 micrones aproximadamente obtenido a partir de la utilización de un pisón y/o mortero metálico para su trituración. Por otro lado, Ubong et al (2017), logra obtener un tamaño de 45 micrones gracias a la utilización de un molino de fresas para su trituración.

A diferencia de lo establecido por Martínez (2016), quien calcinó a 135°C por 30 minutos para eliminar toda la materia orgánica existente en las conchas de almejas, mientras que Sahari (2011)

procedió a tratar las conchas de berberecho por medio de agua limpia, trituración y someterlas a temperaturas de 250 a 300°C, sin embargo, no especificó la máquina que usó para triturar la concha ni el tamaño de partícula del material que utilizó. Por otro lado, Villa (2006) procedió a la activación mecánica utilizando para la trituración de conchas de ostión el molino de bolas “BICO” logrando alcanzar un tamaño de partícula de 78,15 micrones.

El tratamiento más completo es de Gengying (2015), el cual busca mejorar las propiedades de los ladrillos a base de cemento con cenizas de conchas de ostras. Para llevar a cabo esta investigación fue necesario realizar una limpieza exhaustiva a las conchas, se procedió a lavar las conchas de ostra con un 0.5% de hidróxido de sodio según el peso de las conchas, para eliminar todo tipo de materia orgánica. El siguiente paso del autor fue triturarlas hasta obtener un polvo de concha, el cual debía pasar por el tamiz N° 200 para asegurar su finura y homogeneidad con la mezcla. Obtenido el material fino de las conchas, lo calcinó a 800°C por 2 horas para que éstas se activaran térmicamente, lo cual resultó exitoso, ya que, los ladrillos tuvieron mejoras mecánicas frente a un ladrillo convencional.

Gengying (2015), indica que para obtener los mejores resultados se debe realizar una limpieza meticulosa si se quiere reemplazar cemento, ya que, cualquier tipo de partícula orgánica, elementos químicos o parásitos, pueden afectar el futuro comportamiento de la mezcla.

2.4. Aspectos Generales de la Cal

Se denominan cales a todo producto que su composición, aspecto físico propiedades y aplicaciones resulte de la calcinación de piedra caliza. Tras la calcinación se debe proceder a apagar con agua a una cantidad exacta para que de este modo quede cal apagada en polvo (ANFACAL, 2007).

2.4.1. Cal hidráulica

“Producto cementicio compuesto de cal hidratada y cantidades apropiadas de compuestos hidráulicos sílico-aluminosos cálcicos que aseguren su adurecimiento bajo agua “(NCh 2256/1, 2001).

La cal es un producto que en su relación precio/calidad le otorga múltiples beneficios al mortero los cuales se detallan a continuación (Kandora, 2008):

- a) Mayor trabajabilidad: Para el mortero en estado fresco la trabajabilidad es una propiedad de gran importancia, ya que, ésta le permite ser más maniobrable al momento de ser aplicada en la construcción, como son las juntas de albañilería o el mortero de estuco entre otras labores que puede realizar. Debido a su tamaño de partícula produce una disminución de los tamaños de los poros del mortero provocando una mayor atracción entre partículas, lo que le confiere una mayor cohesión a la mezcla lo que aumenta la trabajabilidad.

- b) Economía: Con relación a los costos en el mercado de cementos y cal, no existen mayores diferencias, lo que si hace la diferencia entre uno y otro, es que las propiedades de la cal reducen las pérdidas de mortero en su ejecución y aumenta considerablemente el rendimiento de mano de obra de hasta un 50%.
- c) Permeabilidad: La cal al disminuir el tamaño de poros del mortero disminuye la permeabilidad de éste. Además, la cal tiene la capacidad de curar fisuras y reducir tamaño de poros, ya que al penetrar el agua en una fisura o poro disuelve una pequeña cantidad de calcio, el cual reacciona con el dióxido de carbono del aire formando carbonato de calcio, tapando de esta forma la fisura o poro. Esto produce que los morteros a los que se les incorporan cal tengan una mayor durabilidad e impermeabilidad (Vélez, 2010)
- d) Adherencia: Como se describió anteriormente debido al tamaño de partículas de cal, ésta aumenta la adherencia del mortero, ya que, al entrar en los poros de mortero o del sustrato a adherirse se produce un mecanismo de anclaje y esto permite que el muro trabaje monolíticamente (San Bartolomé, 2003).
- e) Mayor Retentividad: 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 adsorber una mayor cantidad de agua a su alrededor, aumentando de esta forma la retentividad de la mezcla (Vallejos, 2014).

Es importante mencionar que las partículas de la cal se originan naturalmente luego de una violenta reacción exotérmica durante la hidratación del óxido de calcio, a diferencia de las partículas de cemento Pórtland, que se originan luego de la molienda del clinker y el tamaño de sus partículas se encuentra en un rango entre 5 y 100 μm , mucho mayor que el de la cal (inferior a 1 μm) como fue nombrado en la sección 2.2.1.d1. Esto explica por qué la cal tiene propiedades superiores al cemento en cuanto a impermeabilidad, capilaridad, porosidad, difusión térmica y acústica, contracción química y autógena, y evolución de humedad interna, además de mejor adherencia (Galván & Velázquez, 2011).

En Chile los morteros se fabrican habitualmente mediante la mezcla básica de cemento, agua y arena, ya que, las cales son de baja resistencia y mediana retentividad comparadas a las de EE. UU. y países europeos. Los morteros así construidos no son apropiados para recubrir superficies de materiales de resistencia moderada como son la albañilería de ladrillos y bloques o los paneles estructurales (Vallejos, 2014).

El desarrollo de la industria del cemento hidráulico en los últimos 50 años ha tenido como objetivo preponderante aumentar su resistencia a la compresión y flexo tracción. El logro de este objetivo, sin

embargo, ha impedido mejorar otras características tales como: retentividad, trabajabilidad, menor fisurabilidad y menor retracción hidráulica (Kandora, 2008).

Si hacemos una comparación de resistencias a compresión vemos que Chile está muy por debajo de los países desarrollados.

- La norma alemana DIN 1060 específica para la cal altamente hidráulica una resistencia a la compresión de 50 y 150 kg/cm², según el tipo.
- La norma francesa NF P 15 310 específica resistencia a la compresión a los 28 días de 60 y 100 kg/cm², según su tipo.
- La norma Norteamérica ASTM C91 78 específica la resistencia a la compresión a los 28 días debe ser de un mínimo de 62,1 kg/cm².

Las cales hidráulicas en nuestro país alcanzan resistencia a la compresión de 10-20 kg/cm² a los 28 días, en tanto el cemento llega a 250 kg/cm² (Kandora, 2008).

2.5. Material Cementicio Suplementario (MCS)

El material cementicio nace de la idea de mejorar propiedades del hormigón o mortero, primeramente, se agregaron productos químicos a las mezclas de mortero, estos tuvieron el nombre de aditivos, luego fueron incluidos materiales de la naturaleza inorgánica, los cuales fueron llamados adiciones minerales, siendo usados por criterios económicos, primeramente. Luego estos materiales se lograron establecer debido a que eran más económicos que el cemento y en algunos casos cumplía con los requisitos establecidos (Martínez, 2003).

2.5.1. Adiciones minerales

Las adiciones aparecen debido a la contaminación que resulta de la producción del cemento, tanto en lo económico como en lo ecológico (Calleja, 1983).

En lo ecológico ya que algunas adiciones son sacadas de residuos de escorias y cenizas volantes de centrales termoeléctricas y esto supone la reducción o eliminación de vertederos.

En lo económico ya que dicha utilización por una parte aprovecha subproductos desechados que aun contienen masas y energía potencial recuperables y de menor costo.

La fundamental causa de la adición mineral es el ahorro de energía y reutilización de desechos, esto comienza el año 1973 en la crisis del petróleo, por lo cual se tuvo que buscar alternativas para la producción del cemento (Calleja, 1983).

Según la NCh 170 of 2016 "Hormigón – Requisitos generales" define las adiciones como materiales minerales finamente molidos utilizados en el hormigón con el fin de mejorar ciertas

propiedades o conferirle propiedades especiales, en esta norma se diferencian las adiciones activas o inertes.

- a) Adiciones activas: son materiales de origen sílico – aluminoso que, al entrar en contacto con el hidróxido de calcio, producto de hidratación del cemento, desarrollan compuestos aglomerantes secundarios.
- b) Adiciones inertes: son aquellas que aun no teniendo reactividad con el hidróxido de calcio pueden modificar propiedades del hormigón.

2.5.1.1. Activación de adiciones minerales

- a) Activación térmica: Proceso el cual son sometidos materiales como, arcillas, residuos agrícolas y forestales, éste es un tratamiento térmico que consiste en elevar considerablemente la temperatura alrededor de 500 °C a 1500°C por un tiempo determinado, esto depende de cada material a activar (Latorre, 2009).
- b) Activación química: Son sustancias alcalinas que se le añaden a la mezcla en la cual se encuentran materiales puzolánicos, para activar ciertos componentes dentro de la mezcla de manera más rápida y eficaz, ya que la puzolana tiene una lenta actividad a edades tempranas (Bernal et al, 2016).
- c) Activación mecánica: Este proceso es básicamente disminuir el tamaño de partícula, mediante la molienda fina del material, este acelera la velocidad de reacción de la puzolana en presencia de la cal y por lo tanto la formación de productos más resistentes (Bernal et al, 2016).

La molienda se puede clasificar en gruesa y fina, estos procesos de trituración se pueden realizar de dos formas, molienda en circuito abierto y circuito cerrado, además estos tipos de moliendas se clasifican según el estado del material, molienda vía seca, molienda secado, molienda vía húmeda (Duda,1986).

c.1) Tipos de molienda

- c.1.1) Molienda gruesa: corresponde a la subdivisión del sólido en tamaños relativamente gruesos, alrededor de la malla N°8 (2360 micras).

c.1.2) Molienda Fina: se refiere a la subdivisión de los materiales en zonas de gran finura generalmente que pasen el 100% la malla 200 (75 micras).

c.2) Procesos de molienda

c.2.1) Molienda en circuito abierto: En el que el material de molienda pasa solo una vez por el molino.

c.2.2) Molienda en circuito cerrado: El material pasado por el molino que no cumpla con el fino necesario retorna al molino hasta alcanzar el tamaño exigido.

c.3) Clasificación de molienda

c.3.1) Molienda vía seca: el material se muele seco, con un porcentaje de humedad menor al 3%.

c.3.2) Molienda- secado: el material entra húmedo y se seca durante la molienda a expensas del calor suministrado desde el exterior.

c.3.3) Molienda vía húmeda: el material se muele en un medio líquido, ya sea agua o algún solvente orgánico.

2.6. Generalidades de las Puzolanas

Las Puzolanas son materiales naturales, artificiales o subproductos capaces de reaccionar con la cal liberada en la hidratación de los minerales del clinker.

Por otro lado, se entiende como puzolana a todos los materiales silíceos, inorgánicos, naturales o artificiales capaces de endurecer en agua al ser mezclados con hidróxido de calcio o con materiales que en su proceso de reacción desprenden este compuesto (Martínez, 2003).

También son definidas en la norma NCh148 Of.68 como un “material silíceo-aluminoso que, aunque no posee propiedades aglomerantes por sí solo, las desarrolla cuando está finamente dividido y en presencia de agua, por reacción química con hidróxido de calcio a temperatura ambiente”.

Las primeras puzolanas datan de la época de los romanos en la localidad de Pozzuoli, es por ello la palabra puzolana (Neville, 1988).

El uso de altos contenidos de puzolana como material cementicio 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 (Latorre, 2009).

2.6.1. Puzolanas

2.6.1.1. Puzolanas Naturales

Corresponden a materiales puzolánicos latentes o con potencial puzolánico, éstas son activadas por compuestos químicos aportados por la pasta de cemento. La composición química de las puzolanas no determina claramente la capacidad de éstas para combinarse con hidróxido de calcio y álcalis (Martínez. 2003).

2.6.1.2. Puzolanas artificiales

Estas son materiales que adquieren propiedades puzolánicas mediante un tratamiento térmico. Las puzolanas más estudiadas son las cenizas volantes, escoria de hierro de alto horno, microsílíce y cenizas de cáscara de arroz (Soria, 1983).

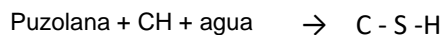
2.6.2. Reacción puzolánica

Capacidad para reaccionar con el hidróxido de calcio para formar compuestos hidráulicos similares a los que se generan durante la hidratación del clinker del cemento.

La reacción puzolánica aumenta la impermeabilidad del hormigón, disminuyendo por tanto la penetración hasta la superficie del acero, de agua y oxígeno, por otra parte, de anhídrido carbónico y sales disueltas (Soria, 1983).

Martínez (2003) por su parte expresa de manera más simple que la actividad puzolánica es un proceso de remoción del Ca(OH)_2 y producción de C-S-H, lo que genera una disminución del tamaño de los poros de la pasta de cemento y, por tanto, una mejora en la impermeabilidad de la misma.

Es importante evaluar cada puzolana, para confirmar su grado de actividad puzolánica, ya que es imposible determinar técnicamente la cantidad de materiales amorfos (ACI, 1994), a continuación, se muestra en la ecuación de la reacción puzolánica.



3. Metodología de la investigación

En este capítulo se presenta la metodología que será empleada para cumplir con el objetivo general, los objetivos específicos y comprobar la veracidad de la hipótesis de la investigación. Se definirán materiales a utilizar, procedimientos a seguir y los equipos necesarios para realizar ensayos normalizados.

3.1. Diseño experimental

Para cumplir con los objetivos específicos y con el objetivo general se diseñó el diagrama metodológico que se presenta con los pasos fundamentales para llevar a cabo esta investigación (figura 3.1). Este consiste en 3 Etapas.

- Etapa I: Corresponde a la formulación de la investigación, en esta se desarrolla la revisión bibliográfica que explica el problema de la investigación, se establecen los objetivos y se respalda con el marco teórico, el cual es uno de los elementos más importantes de la Etapa I, ya que nos entrega la base para entender la investigación.
- Etapa II: Aquí se definen los parámetros y variables a estudiar según nuestros objetivos, se definen los materiales y se caracterizan, para luego dar paso al factorial de ensayo, este es de suma importancia, ya que nos permite realizar la dosificación correspondiente.
- Etapa III: Finalmente se realiza el análisis de los resultados, verificando los objetivos y comprobando la hipótesis para dar lugar a las conclusiones de la investigación.

3.2. Selección de materiales

En esta sección se define cada material, su importancia y características, que conformarán parte de la mezcla de mortero. Ya sea el mortero patrón, como los morteros con variaciones de adición de concha de molusco en reemplazo parcial de cemento.

- a) Cemento: Según la NCh 148 of 68 "Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales", el cemento es un material pulverizado que por adición de una

cantidad de agua conveniente forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire, el tipo de cemento a emplear corresponderá a cemento Melón especial grado corriente. El objetivo en este estudio es reemplazar parte del cemento por material fino proveniente de conchas de almeja.

- b) Agua: El agua como componente fundamental de la mezcla de mortero, tiene 2 roles principales; participa en la hidratación del cemento y a su vez otorga trabajabilidad, aportando a la fluidez de la mezcla, para la confección del mortero se utilizará agua potable de la Región de Valparaíso que cumple con los requisitos de la NCh 1498 Of. 1993 “Hormigón y mortero – Agua de amasado – Clasificación y requisitos”
- c) Arena: Según la NCh 165 of 2009 “Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría” el árido está compuesto de un material pétreo que pasa por el tamiz de abertura 4,75 mm y queda retenido en el tamiz de abertura 0,075 mm. para efectos de determinar la granulometría se debe considerar hasta el tamiz de abertura 0,150 mm. Para la confección de este mortero se usará arena estándar graduada según lo especifica la norma, obtenida de Río Aconcagua del acopio Planta Las Garzas, sector El Melón, V Región.
- d) Concha de molusco: La concha de molusco es el material fundamental de este estudio, ya que, se reemplazará por el cemento en proporciones de 5%, 15%, 30% y 45%, previa limpieza y trituración.

Se realizarán muestras con el material calcinado y muestras con el material sin calcinar, ambas tendrán las mismas proporciones, las cuales se irán comparando con un mortero patrón convencional.

Se seleccionó la concha de almeja debido a que es la que contempla más residuos a nivel país con una extracción de 13.845 toneladas en el año 2016, éstas presentan un alto contenido de carbonato de calcio, lo cual es bastante favorable para el estudio (Sernapesca, 2017). Las conchas serán recopiladas de los desechos de restaurantes en la ciudad de Valparaíso.

3.3. Procesamiento de conchas de moluscos

- a) Limpieza de moluscos: Para la limpieza de las conchas de molusco se utilizará hidróxido de sodio (NaOH) o soda cáustica, como se plantea en la sección 2.3.3, esta es una base química de aspecto incoloro, la cual se usará para eliminar todo tipo de materia orgánica en las conchas de moluscos, además para reducir los malos olores que éstas tengan, ya que las conchas se encontraban con gran cantidad de materia orgánica por lo que no fue eficaz el método de lavado con agua limpia y secado al sol que otros autores realizaron, además se buscaba eficacia y economía por lo que la limpieza en horno no fue contemplado en el proceso.
- b) Trituración: El segundo paso del procesamiento de las conchas de moluscos es la trituración, luego de limpiarlas se procede a triturar en la máquina de los ángeles, esta consta de un tambor cilíndrico con bolas de acero en su interior la cual gira por medio de un motor, con el uso de esta máquina se requiere triturar las conchas de almeja para llegar a un material fino inferior o similar a las conchas de moluscos mencionadas en la sección 2.3.3. ya que estas obtuvieron resultados favorables.
- c) Calcinación de concha de molusco: Solo se calcinará el 50% del material tratado anteriormente, ya que se realizarán mezclas con material calcinado y otras muestras con material sin calcinar. El material fino será activado térmicamente, para ello será sometido a una temperatura de 500°C, según la sección 2.3.3. ésta es la temperatura más baja utilizada para activación térmica, por lo que se utilizará por economía respecto a otras temperaturas utilizadas, esta calcinación se realizará en hornos facilitados por la *Universidad Técnico Federico Santa María*.

3.4. Diseño del mortero

Se confeccionará mortero tipo 1:3 (cemento: arena) con proporciones variables de concha de almeja en reemplazo parcial de cemento en peso, por lo tanto, se obtendrá un mortero patrón con 0% de reemplazo de cemento y morteros con 5, 15, 30 y 45 % de concha de almeja en reemplazo de cemento, tanto calcinada como sin calcinar. Las probetas serán de 5 cm³ según "ASTM C 109 / C 109M" y se ensayarán 3 muestras gemelas en los ensayos de resistencia a compresión a edades de 28, 56, 90 y 240 días.

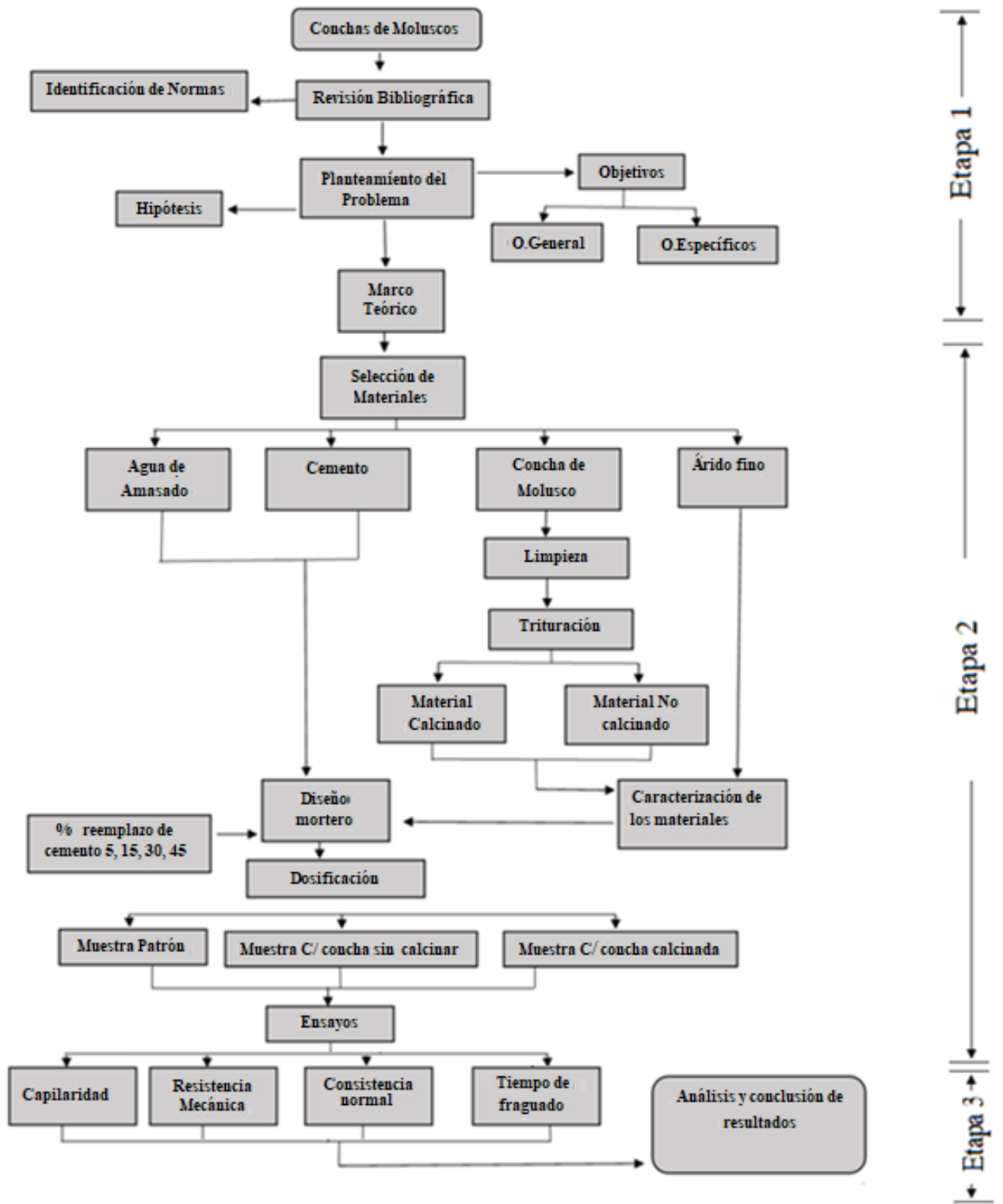


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología de la investigación, Fuente: Elaboración propia (2019)

3.4.1. Factorial de ensayo

En el desarrollo factorial de ensayo se mantendrá fija la cantidad de agua y arena presentes en la mezcla, variando el porcentaje de concha de molusco que reemplazará parcialmente el cemento respectivamente, habrá una mezcla patrón sin reemplazo de conchas de moluscos.

La nomenclatura que se empleará en las tablas 3.1 y 3.2 se detalla a continuación:

M_5C_{SC}

- La primera letra que corresponde a la “**M**” quiere decir Mortero
- El primer número corresponde al porcentaje de reemplazo de concha de molusco por cemento, este valor cambiará según corresponda en **5, 15, 30 o 45**.
- La segunda letra corresponde a la letra “**C**” quiere decir Concha de almeja
- La tercera letra o conjunto de letras corresponde a que, si se usa material calcinado o sin calcinar, por ejemplo, “**sc**” si el material es sin calcinar y “**c**” cuando este es calcinado

Por lo tanto, lo que se quiere decir con la nomenclatura “ M_5C_{SC} ” es: Mortero con 5% de reemplazo con concha de almeja sin calcinar. En la tabla 3.1. se desglosarán las 9 mezclas que se emplearán en este estudio

Tabla 3.1. Nomenclatura de las mezclas de mortero

Mezcla	Mortero	Nomenclatura
1	Mortero patrón	(MP)
2	Mortero con 5% de concha de molusco sin calcinar	(M_5C_{SC})
3	Mortero con 15% de concha de molusco sin calcinar	($M_{15}C_{SC}$)
4	Mortero con 30% de concha de molusco sin calcinar	($M_{30}C_{SC}$)
5	Mortero con 45% de concha de molusco sin calcinar	($M_{45}C_{SC}$)
6	Mortero con 5% de concha de molusco calcinada	(M_5C_c)
7	Mortero con 15% de concha de molusco calcinada	($M_{15}C_c$)
8	Mortero con 30% de concha de molusco calcinada	($M_{30}C_c$)
9	Mortero con 45% de concha de molusco calcinada	($M_{45}C_c$)

Fuente: Elaboración Propia

En las siguientes tablas 3.2 y 3.3 se detallan todos los ensayos que se realizarán a las 9 mezclas desglosadas anteriormente.

Tabla 3.2 Muestras con conchas de almeja sin calcinar

Prop de las Mezclas		Proporciones en % (Cemento/Concha de molusco)					
		100/0	95/5	85/15	70/30	55/45	
Nomenclatura		MP	M3Csc	M15Csc	M30Csc	M45Csc	
Ensayos	Consistencia Normal	Cn _{sto}	Cn _{sto}	Cn _{sto}	Cn _{sto}	Cn _{sto}	
	Tiempo de fraguado	Tf _{sto}	Tf _{sto}	Tf _{sto}	Tf _{sto}	Tf _{sto}	
	Resistencia a Compresión Edad (días)	28	f _{csto} , Cp _{sto}	f _{csto} , Cp _{sto}	f _{csto} , Cp _{sto}	f _{csto} , Cp _{sto}	f _{csto} , Cp _{sto}
		56	f _{csto}	f _{csto}	f _{csto}	f _{csto}	f _{csto}
		90	f _{csto}	f _{csto}	f _{csto}	f _{csto}	f _{csto}
240		f _{csto} , Cp _{sto}	f _{csto} , Cp _{sto}	f _{csto} , Cp _{sto}	f _{csto} , Cp _{sto}	f _{csto} , Cp _{sto}	

Fuente: Elaboración Propia (2019)

Simbología

Cn s/c: Ensayo de consistencia normal con material sin calcinar.

Tf s/c: Ensayo de tiempo de fraguado con material sin calcinar.

f_c s/c: 3 repeticiones de ensayo de resistencia a compresión con material sin calcinar.

Cp s/c: Ensayo de Absorción capilar con material sin calcinar.

Tabla 3.3 Muestras con conchas de almejas calcinadas

Prop de las Mezclas		Proporciones en % (Cemento/Concha de molusco)				
		95/5	85/15	70/30	55/45	
Nomenclatura		M5Cc	M15Cc	M30Cc	M45Cc	
Ensayos	Consistencia Normal	Cn _o	Cn _o	Cn _o	Cn _o	
	Tiempo de fraguado	Tf _o	Tf _o	Tf _o	Tf _o	
	Resistencia a Compresión Edad (días)	28	f _{co} , Cp _o	f _{co} , Cp _o	f _{co} , Cp _o	f _{co} , Cp _o
		56	f _{co}	f _{co}	f _{co}	f _{co}
		90	f _{co}	f _{co}	f _{co}	f _{co}
240		f _{co} , Cp _o	f _{co} , Cp _o	f _{co} , Cp _o	f _{co} , Cp _o	

Fuente: Elaboración Propia (2019)

Simbología

Cn c: Ensayo de consistencia normal con material calcinado.

Tf c: Ensayo de tiempo de fraguado con material calcinado.

f_c c: 3 repeticiones de ensayo de resistencia a compresión con material calcinado

Cp s/c: Ensayo de Absorción capilar con material calcinado

3.5. Caracterización química y física del material fino proveniente de concha de almeja**3.5.1. Caracterización química**

Se extraerá 2 muestras del material fino, una con el material calcinado y otra sin calcinar, a éstas se les realizará un análisis químico por medio de Fluorescencia de Rayos X (FRX) para determinar los elementos químicos que contiene cada muestra y en qué cantidad se concentran. Para este ensayo se utilizó el equipo “S2 Puma – Bruker” el cual se aprecia en la figura 3.2



Figura 3.2 Equipo S2 Puma - Bruker

3.5.2. Caracterización física**3.5.2.1. Peso específico relativo**

Se determinará el peso específico relativo de ambas muestras, calcinada y sin calcinar, este proceso se rige por la NCh154 Of.69 “Cemento – Determinación del peso específico relativo”, el cual consiste en establecer la relación entre las muestras de material fino (g) y el volumen (ml) de líquido que esta masa desplaza en el matraz de Le Chatelier (figura 3.3).

Las muestras a ensayar se tomarán según NCh162 Of77, además este material debe tener un previo secado a 105°C +- 5°C. El procedimiento se detalla a continuación:

- a) Llenar el matraz con bencina hasta un punto comprendido entre las marcas 0 ml y 1 ml. Si es necesario, secar la parte interior del matraz sobre el nivel del líquido.
- b) Sumergir el matraz en un baño de temperatura constante a la de la calibración del matraz, donde permanecerá hasta que su contenido haya alcanzado la temperatura del agua. Efectuar la primera lectura, registra el volumen V1. Evitar variaciones en la temperatura del líquido mayores a 0,2°C.
- c) Pesar una proporción de masa $m=64$ grs de material fino y agregar al líquido contenido en el matraz. Tener cuidado de evitar salpicaduras y que el material se adhiera a las paredes interiores del matraz en la parte sobre el nivel del líquido. Para acelerar la introducción del material al matraz y para prevenir que el material adhiera en el cuello de este, se podrá usar un aparato vibrador.
- d) Tapar el matraz y hacer girar en una posición inclinada o hacer girar despacio en un círculo horizontal hasta que termine el desprendimiento de burbujas de aire. Si se ha agregado una cantidad apropiada de material, el nivel del líquido llegará en su posición final a un punto comprendido entre las marcas superiores del matraz.
- e) Registrar el volumen V2, después de haber dejado sumergido el matraz en el baño de temperatura ambiente.
- f) La diferencia de $V2 - V1$ es el volumen del líquido desplazado por la masa de material usado en el ensayo.
- g) Calcular el peso específico de cada muestra por separado por medio de la siguiente expresión

$$Pe. \text{ relativo } \left(\frac{g}{ml} \right) = \frac{m}{v2 - v1}$$

Ec. 3.1

Donde,

m = masa, (g) de muestra (calcificada y sin calcificar)

$V_2 - V_1$ = volumen de líquido desplazado, (ml) por las muestras

- h) Repetir las determinaciones hasta que los resultados de 3 de ellas no difieran en más de 0,01
- i) El peso específico relativo es el promedio de las 3 determinaciones y su valor se expresa con 3 cifras significativas

Se debe realizar este procedimiento para el material calcificado y sin calcificar, por separado, para determinar el peso específico relativo de cada uno de ellos.

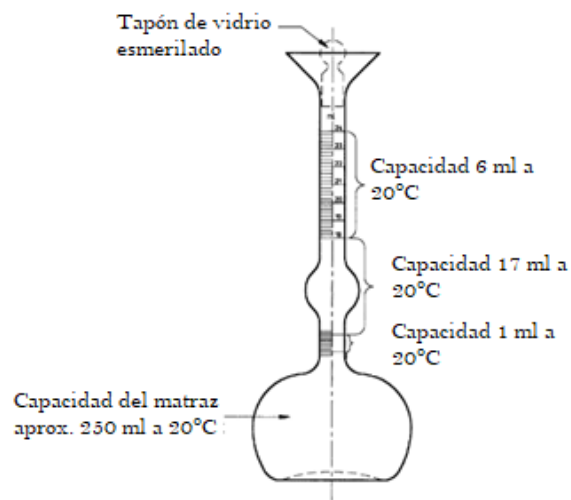


Figura 3.3 Matraz de Le Chatelier, Fuente: NCh 154 Of.69

3.5.2.2. Distribución de tamaño de partícula

Este proceso consiste en obtener el tamaño de partículas que se encuentran en las muestras calcificadas y si calcificar por medio de un equipo de difracción láser "Mastersizer 2000" (figura 3.4). Las muestras son disueltas en una solución de alcohol isopropílico, el cual se agita para luego ser escaneado por un láser. Este láser determina el tamaño de cada partícula para luego generar un gráfico que muestra su distribución. Cabe señalar que para efectuar este ensayo las muestras de concha de almeja pasaron previamente por el tamiz N° 200.

Malhotra y Hemmings, (1995) dicen que es importante saber el tamaño de partícula que contiene el material, ya que, la velocidad y el grado de hidratación inicial comienzan sobre la superficie de las partículas, por lo que a menor tamaño de partícula mayor superficie específica tendrá el material, por ende, se podría obtener propiedades similares o superiores obtenidas por el cemento portland.



Figura 3.4 Equipo Mastersizer 2000

3.6. Caracterización física de la pasta en estado fresco

3.6.1. Ensayo de consistencia normal

La determinación de la consistencia normal de los cementos se basa en la resistencia que opone la pasta de cemento a la penetración de la sonda de un aparato normalizado, este ensayo se realiza según la NCh151 Of68, Cemento – Método de la determinación de la consistencia normal. El ensayo se detalla a continuación.

- a) Colocar en una superficie lisa de material no absorbente (por ejemplo, vidrio) en forma de anillo, 500 g del cemento por ensayar. Verter en el centro del anillo, una determinada cantidad de agua, y con ayuda de la espátula volcar el cemento de la orilla para el centro, sin demorar más de 30 s en esta operación.
- b) Durante un nuevo intervalo de 30 s esparcir el cemento seco de los costados del cono sobre la mezcla para reducir la pérdida por evaporación y provocar la absorción del agua y revolver luego

vigorosamente con la espátula hasta completar 5 min contados desde el momento de agregar el agua.

- c) Colocar la pasta de cemento en el molde, sin efectuar presión, hasta enrasarla con la ayuda de la espátula.
- d) Colocar el molde con la pasta sobre la placa de vidrio y centrarlo debajo del vástago del aparato Vicat (Figura 3.5); colocar el extremo de la sonda Tetmayer en contacto con la superficie de la pasta y fijar el tornillo sujetador.
- e) Llevar el indicador a coincidir con marca superior 0 de la escala o con una lectura inicial determinada y soltarla sonda.
- f) El aparato debe estar libre de toda vibración durante el ensayo.
- g) La pasta tendrá consistencia normal, cuando la sonda se detiene a 6 ± 1 mm sobre el fondo del molde, 30 s después, soltarla. Se confeccionarán pastas con distintas proporciones de agua hasta obtener la consistencia normal.
- h) Efectuar sólo un ensayo con cada porción de pasta

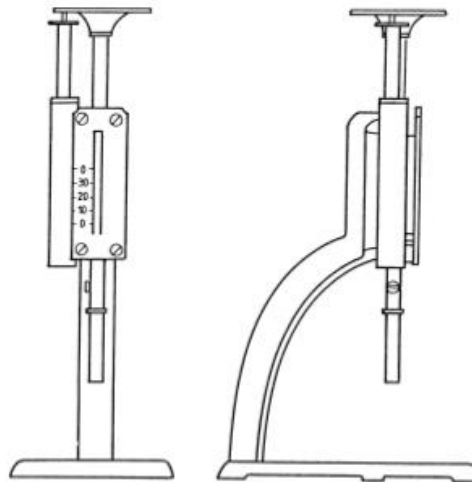


Figura 3.5 Vicat con sonda Tetmayer, Fuente: NCh151 Of.68

3.6.2. Ensayo tiempo de fraguado

Se basa en la resistencia que opone la pasta de cemento a la penetración de aguja de un aparato normalizado, el mortero se ensayará según la NCh152 Of.71 "Cemento – Método de determinación del tiempo de fraguado", para este ensayo es necesario contar con 9 moldes diferentes, los cuales se confeccionaron con tubos PVC, ya que, el aparato Vicat sólo contaba con uno, sin embargo, la norma permite moldes equivalentes de diámetro interno de $80\text{mm} \pm 5\text{mm}$ y altura de $40\text{mm} \pm 1\text{mm}$. Los moldes utilizados fueron de 75mm de diámetro interno y 40mm de alto). El ensayo se detalla a continuación.

- a) Preparar la pasta de cemento de consistencia normal y colocarla en el molde según NCh151 Of.68 "Cemento – Método de la determinación de la consistencia normal".
- b) El molde con la pasta de cemento deberá permanecer en la cámara húmeda y se sacará durante el tiempo necesario para hacer las mediciones.
- c) Colocar el molde con la pasta debajo de la aguja del aparato Vicat (Figura 3.6), colocar el extremo de la aguja en contacto con la superficie de la pasta y fijar el tornillo.
- d) Hacer coincidir el indicador con la marca superior 0 de la escala o con una lectura iniciar determinada y soltar el dispositivo móvil.
- e) El aparato debe estar libre de vibraciones durante el ensayo.
- f) Hacer mediciones sucesivas cada 10 minutos a distancias iguales o superiores a 10 mm del borde interior del molde y a 5 mm entre ellas
- g) Limpiar completamente la aguja después de cada medición.
- h) El cemento ha alcanzado el principio de fraguado cuando la aguja se detenga $4 \pm 1\text{mm}$ sobre el fondo del molde 30 s después de haber soltado el dispositivo móvil.
- i) La determinación del tiempo de fraguado final se hará con la probeta invertida. La inversión se efectuará, cuando la pasta esté suficientemente rígida.
- j) El cemento ha alcanzado el final de fraguado cuando sólo la aguja deja una impresión y no el borde circular del accesorio.

- k) Los tiempos de fraguado inicial y final se computan desde el instante en que se inicia el mezclado de la pasta de cemento.

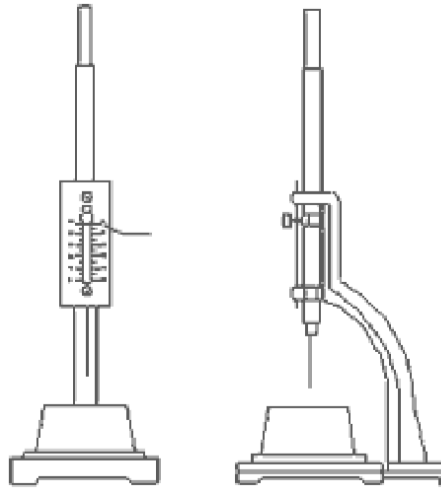


Figura 3.6 Vicat con aguja, Fuente: NCh152 Of.71

3.7. Caracterización física y mecánica del mortero

3.7.1. Ensayo de Absorción capilar

Se realizará mediante el método A, según Proyecto FONDEF (2007), el cual establece un procedimiento estandarizado para su medición mostrado a continuación.

- Registrar la altura y espesor de la probeta
- Acondicionar la probeta colocándola en un horno ventilado a 50°C por 48 horas o más, hasta masa constante.
- Sellar todas las caras de la probeta exceptuando la cara que estará expuesta al agua.

- d) Iniciar el ensayo registrando su peso inicial, luego colocar la probeta en un recipiente de fondo plano con una rejilla, sobre esta colocar la probeta con el extremo expuesto al exterior apoyado en la rejilla.
- e) La altura del agua debe estar como máximo 3mm sobre la parte inferior de la probeta, el ensayo se debe realizar con agua potable.
- f) Registrar la masa de la probeta a los siguientes tiempos desde el inicio del ensayo: 5, 10, 15 y 30 minutos, 1, 2, 3, 4, 5 y 6 horas, 1, 2, 3 días ó más.
- g) Construir gráfico con la ganancia de masa en el eje de las ordenadas y la raíz cuadrada del tiempo en el eje de las abscisas.
- h) Determinar el punto crítico de tiempo donde se produce la estabilización de proceso de saturación de los capilares.
- i) Los coeficientes se calculan en base a las siguientes ecuaciones:

$$m = t_n / h^2 \text{ (s/m}^2\text{)} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde:

- m: Resistencia a la penetración de agua (s/m²)
- t_n: Tiempo en punto crítico de la curva ganancia masa-tiempo (s)
- h: Altura o espesor de la probeta (m)

$$k = ((W_n - W_0) / A) / t_n^{1/2} \text{ (kg/m}^2 \text{ s}^{1/2}\text{)} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Donde:

- k : Coeficiente de absorción capilar (kg/m² s^{1/2})
- W_n: Masa de la probeta en punto crítico de tiempo(kg)
- W₀: Masa inicial de la probeta (kg)
- t_n: Tiempo en punto crítico de la curva ganancia masa-tiempo (s)

A: Área expuesta a la succión de la probeta (m^2)

$$\varepsilon_e = k (m)^{1/2} 100 / 1000 (\%) \quad \text{Ec. 3.3}$$

Donde:

ε_e : Porosidad efectiva (s/m^2)

1000 : Densidad del agua (kg/m^3)

A continuación, se presenta la *figura 3.7* la cual muestra detalladamente el escenario para realizar el ensayo a la probeta.

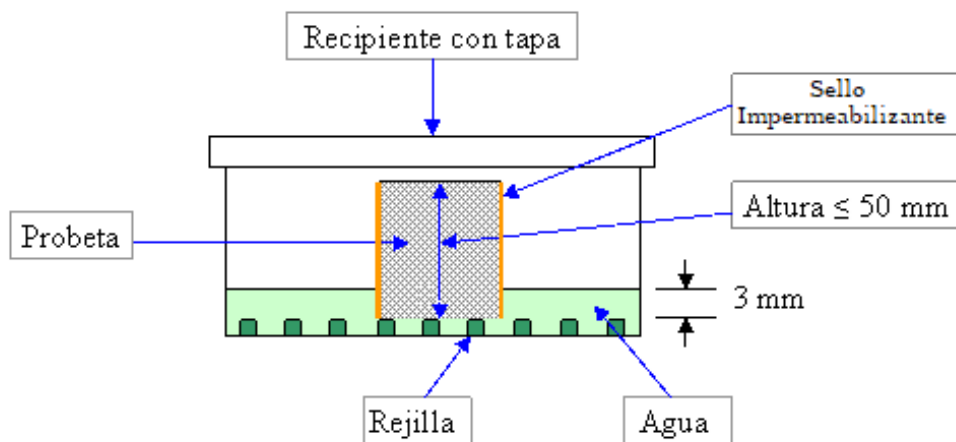


Figura 3.7 Esquema de Montaje del ensayo, Fuente: FONDEF (2007)

Una vez realizado el ensayo, es necesario recopilar la información para luego ser comparada entre las distintas muestras y ser interpretada según la siguiente tabla.

Tabla 3.4 Porcentaje de porosidad del mortero

Porosidad (%)	Evaluación del hormigón
≤ 10	Hormigón de buena calidad y compacidad
10 – 15	Hormigón de regular calidad
> 15	Hormigón de baja calidad, durabilidad inadecuada

Fuente: FONDEF (2007)

3.7.2. Ensayo de resistencia a la compresión

La normativa para este ensayo es la NCh158 Of.67 “Cemento – Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento” y ASTM C – 1709 – 11 “Standard Guide for Evaluation of Alternative Supplementary Cementitious Materials (ASCM) for Use in Concrete”, la geometría de la probeta será según ASTM C 109 / C 109M. A continuación, se detalla el procedimiento a seguir.

- a) Las probetas que se romperán a las 24 horas de desmoldarán 15 a 20 minutos antes del ensayo.
- b) Las demás probetas se desmoldarán 20 y 24 horas después de haberlas moldeado. Si el mortero no ha adquirido suficiente resistencia para desmoldarlo sin peligro de deterioro, el desmolde puede postergarse 24 h, pero debe anotarse en el informe.
- c) Las probetas desmoldadas se sumergirán en posición vertical, en agua detenida saturada en cal, a $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, hasta el momento del ensayo. El agua deberá tener libre acceso sobre todas las caras de las probetas el agua deberá renovarse por mitades cada 30 días el volumen del agua de conservación será a lo menos 4 veces el del total de la probeta contenidas.
- d) Las probetas se sacarán del agua a menos de 15min antes del ensayo si es necesario para satisfacer esta condición, las probetas se transportan a las máquinas de ensayo en un recipiente lleno de agua.

- e) Se ensayará a compresión en una dimensión de 50x50 mm aplicándose la carga a las dos caras provenientes de las laterales del moldaje, colocándose entre las placas de la máquina de compresión.
- f) La velocidad de carga será tal que la presión sobre la probeta aumente entre 10 y 20 kg/cm²/s. Hasta la mitad de la carga de ruptura la carga podrá aumentar a mayor velocidad, pero en todo caso la duración de cada ensayo será menor o igual a 10 s.
- g) La resistencia a compresión del mortero será la media aritmética de los resultados de todos los ensayos realizados en cada fecha, estas se expresarán en (Kg/cm²).

A continuación, se muestra en la figura 3.8 el equipo utilizado para realizar este ensayo



Figura 3.8 Máquina utilizada para ensayo a compresión, Marca Laryee, modelo UE34300

4. Presentación y análisis de resultados

4.1. Caracterización de la arena

4.1.1. Determinación de densidades

4.1.1.1. Densidad real, neta y absorción de la arena

Para realizar este ensayo es necesario utilizar la NCh1239 Of.77 – Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de agua de las arenas.

En la tabla 4.1. se presenta el promedio de dos muestras para obtener resultados de densidades, real, neta y absorción de agua.

Tabla 4.1: Resultados, Densidad real, neta y absorción de agua

Densidades arena	Nomenclatura	Unidad	Promedio	Absorción de agua
Densidad real del árido saturado superficialmente seco	ρ_{Rss}	Kg/m ³	2639	2,99%
Densidad real del árido seco	ρ_{Rs}	Kg/m ³	2562	
Densidad neta	ρ_D	Kg/m ³	2774	

4.1.1.2. Densidad aparente suelta y densidad aparente compactada de la arena

Para la realización de este ensayo es necesario seguir la NCh1116 Of.77 – Áridos para mortero y hormigones – Determinación de la densidad aparente.

En la *tabla 4.2.* se presentan los resultados de dos muestras ensayadas para obtener su densidad aparente suelta de la arena.

Tabla 4.2: Resultados densidad aparente suelta de la arena

Muestras	Peso arena (Kg)	ρ_{as} (Kg/m ³)	Promedio (ρ_{as}) (Kg/m ³)
Muestra 1	7,97	1583	1580
Muestra 2	7,94	1577	

La *tabla 4.3*. Presenta los resultados de dos muestras ensayadas para obtener su densidad aparente compactada.

Tabla 4.3: Resultados densidad aparente compactada de la arena

Muestras	Peso arena (Kg)	ρ_{ac} (Kg/m ³)	Promedio (ρ_{ac}) (Kg/m ³)
Muestra 1	8,43	1675	1670
Muestra 2	8,4	1669	

4.1.2. Determinación de la granulometría de la arena

Para la obtención de la granulometría es necesario seguir los procedimientos de NCh165 Of.2009 – Áridos para morteros y hormigone – tamizado y determinación de la granulometría, estos resultados deben ser comparados con las bandas establecidas en la NCh163 Of.2013.

A continuación, se muestra en la (Figura 4.1) la curva granulométrica de la arena corregida con su respectiva banda. (Detalle de los resultados se presenta en Anexo 1).

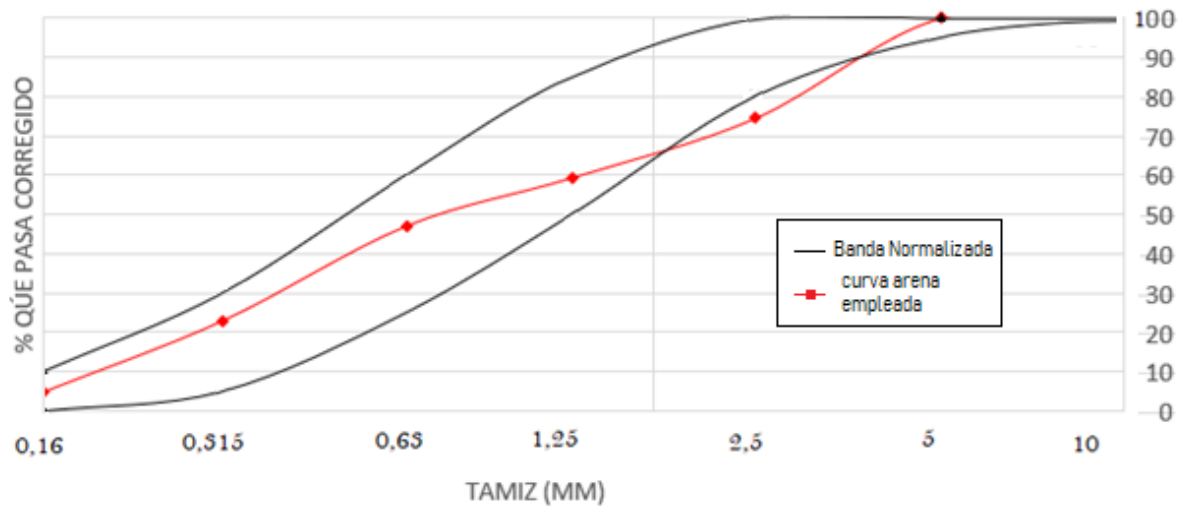


Figura 4.1 Curva Granulométrica

4.2. Preparación concha de almeja

A continuación, se prepararán las conchas de almejas según sección 3.3., la cual contempla limpieza de moluscos, trituración y calcinación de las conchas.

a) Obtención y limpieza de moluscos

Las conchas de almejas fueron obtenidas de desechos de restaurantes ubicados en la ciudad de Valparaíso en el sector de Caleta Portales.

Una vez obtenidas las conchas de almejas se procedieron a lavar con soda cáustica por 20 minutos para eliminar la materia orgánica (Figura 4.2).

Pasado los 20 minutos se deben enjuagar con abundante agua para eliminar residuos químicos que afecten su futuro uso, posterior a esto se secan a temperatura ambiente y se revisarán cada una de ellas verificando que se encuentren limpias de químicos y materia orgánica (Figura 4.3).

b) Trituración y tamizado de concha de almeja

Luego de este procedimiento se proceden a triturar el material con el “Desgaste de los Ángeles”, este equipo fue configurado para triturar por 500 vueltas en un promedio de 20 minutos, para darle efectividad al proceso se introducía 3 kilos de material (Figura 4.4).



Figura 4.2 Lavado de concha de almeja con soda cáustica, Fuente: Elaboración propia (2018)



Figura 4.3 Secado y limpieza de cada concha de almeja, Fuente: Elaboración propia (2018)



Figura 4.4 Equipo, Desgaste de los ángeles, Universidad de Valparaíso, Fuente: Elaboración propia (2018)

Ya que el material que se requiere es de alta finura, este debe pasar por el tamiz N° 200, por lo que se debe repetir el proceso de trituración 6 veces para obtener el material necesario, este tipo de molienda es llamado “Molienda en circuito cerrado”, como se detalla en la sección 2.5.1.1.C.2.2. A continuación, se puede apreciar visualmente la finura a la cual se debe llegar en la figura 4.5.



Figura 4.5 Tamizado de concha de almeja por malla N° 200, Fuente: Elaboración propia (2018)

c) Calcificación de concha de almeja:

Una vez obtenido este material fino se debe separar en 2 partes, una se calcinará a una temperatura de 500°C para su activación térmica según la *sección 2.5.1.1 – a)* y la otra parte se utilizará sin calcinar, acudiendo sólo a su reciente activación mecánica según la *sección 2.5.1.1 – c)*. Figura 4.6.



Figura 4.6 Material - sin calcinar y calcinado, Fuente: Elaboración propia (2018)

Se puede apreciar en la figura 4.6 una diferencia de color, además el material calcinado presenta una textura más grumosa, sin embargo, es necesario verificar si hubo algún cambio químico en el material debido a la calcificación de 500°C y/o en el tamaño de partícula.

Para esto es necesario realizar los ensayos de “Fluorescencia de Rayos X (FRX) y Distribución de Tamaño de Partícula (DTP)” mencionados en la *sección 3.5.1.* y *3.5.2.2,* respectivamente.

4.3 Caracterización química y física del material fino proveniente de concha de almeja

4.3.1. Caracterización química

Se realizó un análisis del material calcinado y sin calcinar para determinar los elementos químicos presentes. El equipo utilizado fue “S2 Puma – Bruker

En la *tabla 4.4.* es posible apreciar los elementos químicos de la concha de almeja sin calcinar, los elementos predominantes son: óxido de calcio, óxido de magnesio y dióxido de silicio. Mientras que

en la tabla 4.5. es posible apreciar los elementos químicos del material calcinado, los principales componentes son: óxido de calcio, óxido de magnesio y dióxido de silicio.

Tabla 4.4. Análisis Químico del Material sin calcinar

Nombre del Compuesto	Nomenclatura	%
Óxido de calcio	CaO	87,73
Óxido de magnesio	MgO	6,76
Dióxido de silicio	SiO ₂	3,62
Trióxido de dihierro	Fe ₂ O ₃	0,52
Monóxido de estroncio	SrO	0,46
Trióxido de dioscandio	Sc ₂ O ₃	0,4
Pentaóxido de difósforo	P ₂ O ₅	0,24

Fuente: FRX UFSM, Valparaíso (2018)

Tabla 4.5. Análisis Químico Material Calcinado

Nombre del Compuesto	Nomenclatura	%
Óxido de calcio	CaO	82,21
Óxido de magnesio	MgO	12,03
Dióxido de silicio	SiO ₂	3,89
Trióxido de dihierro	Fe ₂ O ₃	0,8
Monóxido de estroncio	SrO	0,41
Trióxido de dioscandio	Sc ₂ O ₃	0,38

Fuente: FRX UFSM, Valparaíso (2018)

En la literatura se conocen las conchas de moluscos de forma general, con un 95% de carbonato de calcio, sin embargo al realizar "Fluorescencia de Rayos X" se dio a conocer que las conchas de almejas presentan 3 elementos importantes; óxido de calcio (87.73%), óxido de magnesio (6,76%) y dióxido de silicio (3,62%) en el material sin calcinar, mientras que las calcinadas variaban en un 5% entre óxido de calcio y óxido de magnesio, mientras que el dióxido de silicio se mantenía.

Entre el material calcinado y no calcinado el óxido de magnesio varía en un 5.43%, esto sugiere que el material calcinado podría tener mejores propiedades mecánicas, ya que estas no se verían afectadas por el calor de hidratación del cemento. Al contener MgO se produce una hidratación lenta del mortero evitando posibles agrietamientos en este (Liwu Mo et al, 2014).

4.3.2. Caracterización física

4.3.2.1. Peso específico relativo

a) Material sin calcinar

Se extrajo una muestra del material triturado sin calcinar, para realizar el ensayo de peso específico normado por la NCh154 Of.69 en el matraz de Le Chatelier como se muestra en la (Figura 4.7).



Figura 4.7 Matraz Le Chatelier con material sin calcinar

A continuación, se muestra los resultados correspondientes a 3 ensayos de peso específico, según la ecuación 3.1

Tabla 4.6. Datos de Peso específico M. Sin calcinar

Ensayo	Ensayo N° 1	Ensayo N° 2	Ensayo N° 3
Masa (gr)	50	50	50
1° Lectura (ml)	1,35	1,15	1,25
2° Lectura (ml)	18,3	18,2	18,15
Pe (g/ml)	2,93	2,94	2,96

En la Tabla 4.6 se puede observar que el peso específico del material sin calcinar es similar al cemento, ya que, el cemento fluctúa entre 2,9 (g/ml) y 3,15 (g/ml).

b) Material calcinado

Se extrajo una muestra del material triturado calcinado, para realizar el ensayo de peso específico normado por la NCh154 Of.69 en el matraz de Le Chatelier como se muestra en la *Figura 4.8*.



Figura 4.8 Matraz de Le Chatelier con material calcinado

A continuación, se muestra los resultados correspondientes a 3 ensayos de peso específico según la ecuación 3.1.

Se observa en la *tabla 4.7.* que el peso específico del material calcinado es un 11,5% menor que el peso del cemento y material sin calcinar.

Tabla 4.7. Datos de Peso específico m. calcinado

Ensayo	Ensayo N° 1	Ensayo N° 2	Ensayo N° 3
Masa (gr)	50	50	50
1° Lectura (ml)	0,2	0,9	0,7
2° Lectura (ml)	19,2	19,6	19,6
Pe (g/ml)	2,63	2,67	2,64

4.3.2.2. Distribución de tamaño de partícula

En la *figura 4.9* se observa que la mayor cantidad de partículas se encuentra entre las 40 y 50 micras, lo que es favorable, ya que, se asemeja a las partículas del cemento, mientras que en la *figura 4.10* la mayor cantidad de partículas se encuentra entre 50 y 60 micras, el cual no deja de ser un resultado alentador para la futura mezcla. Ambos tamaños de partículas son similares a las nombradas en la sección 2.2.1.d1, por lo que podrían comportarse de igual manera.

Estos resultados tienden a decir que es probable que el material calcinado se comporte de mejor manera, debido a su finura tiene mayores beneficios según la sección 2.4.1.

Según Córdova (2017) los granos más activos en el cemento son las partículas entre 3 y 30 micrones, por lo tanto, el material calcinado se encuentra en mejores condiciones para mostrar un desempeño más activo.

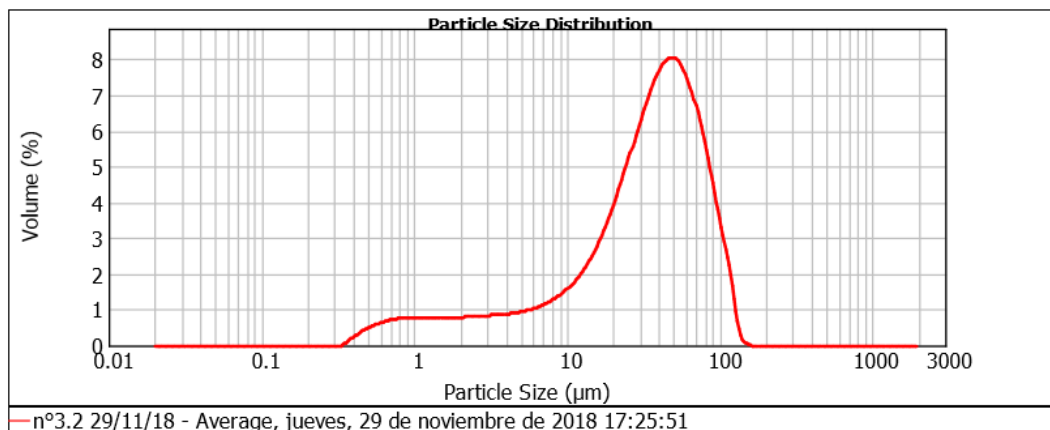


Figura 4.9 Concha de almeja calcinada

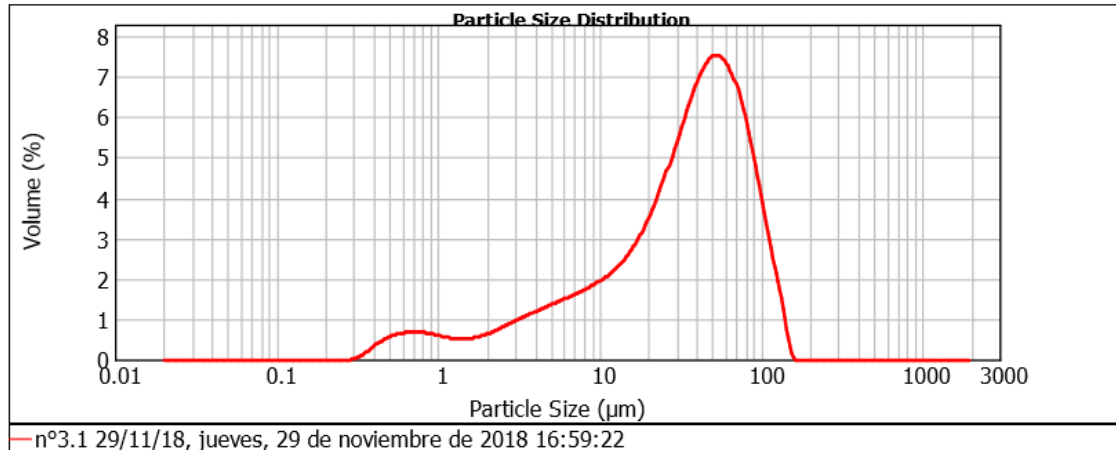


Figura 4.10 Concha de almeja sin calcinar

4.4. Caracterización física de la pasta

4.4.1. Ensayo de consistencia normal

Este ensayo se realizó alrededor de 2 a 4 veces por muestra hasta obtener la consistencia normal normalizada por NCh151 Of.68. La consistencia era alcanzada cuando la sonda Tetmayer llegaba 6 ± 1 sobre el fondo del molde, en la figura 4.11 se aprecia el ensayo realizado.

En el anexo 2 y figura 4.12. se muestran los resultados de los ensayos que cumplieron con la consistencia normal, es posible apreciar que la diferencia entre las muestras calcinadas y no calcinadas respecto a los mismos porcentajes no tienen una gran variación. A medida que aumenta el reemplazo de cemento disminuye la cantidad de agua requerida para lograr la consistencia normal de la mezcla.

En la figura 4.12 se aprecia que la muestra patrón necesita más agua que las otras muestras, esto se puede deber a lo descrito en la sección 2.2.1. d.1. que dice que el cemento contiene partículas que fluctúan entre 2 y 150 micras y su mayor parte se concentra entre 3 y 30 micras, por lo tanto, al tener partículas más pequeñas tienen una mayor superficie para hidratarse, es por eso que necesitan más agua. Por otra parte, las muestras calcinadas necesitan más agua que las sin calcinar, esto se debe al mismo caso, ya que según lo observado en la sección 4.3.2.2. la muestra calcinada tiene un menor tamaño de partícula.

Sin embargo, los resultados expuestos en la figura 4.12 no son sensibles, por lo que se podría comentar que todas las muestras tenderían a comportarse de manera similar.



Figura 4.11 Ensayo de Consistencia normal "Muestra Patrón"

Los datos recolectados se pueden apreciar en anexo A

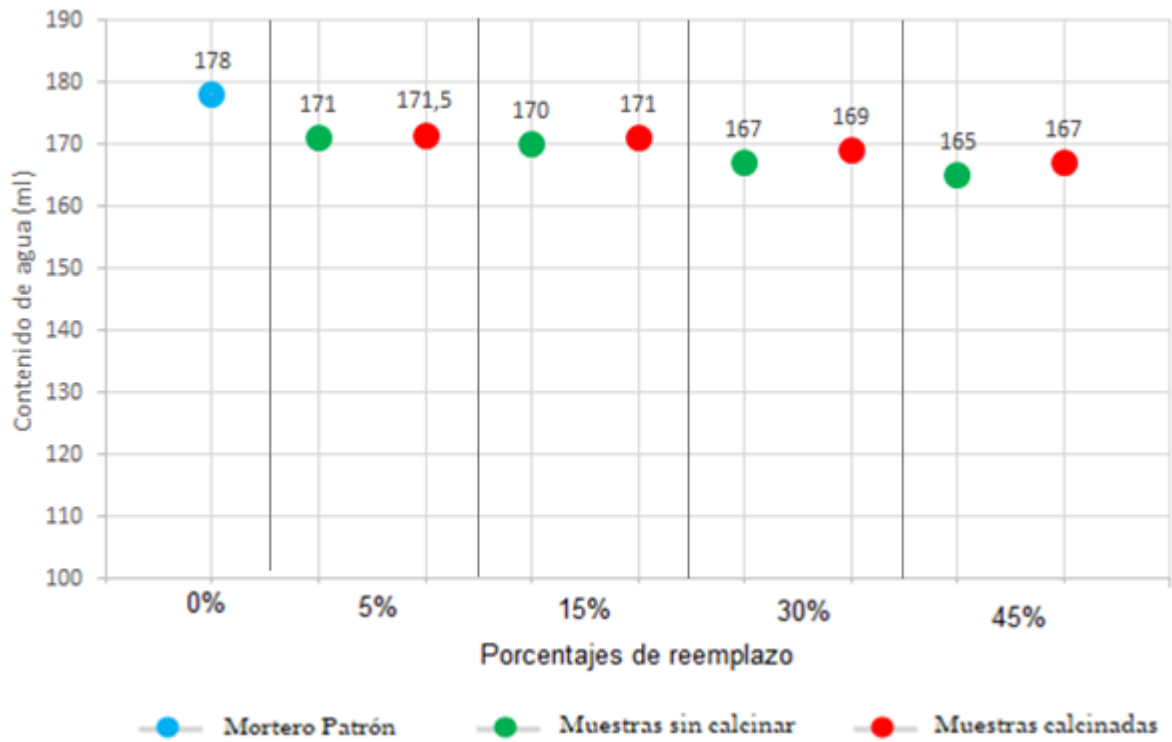


Figura 4.12 resultados de consistencia normal

4.4.2. Ensayo de tiempo de fraguado

Para la realización de este ensayo es necesario obtener cada muestra con su consistencia normal según la sección 4.4.1.

Se realizaron las 9 muestras al mismo tiempo, la norma exige mediciones cada 10 minutos, sin embargo, las primeras mediciones se realizaron cada 30 minutos, ya que, era evidente que aún no comenzaba el inicio de fraguado, transcurrido las primeras 3 horas de ensayo se comenzaron a realizar mediciones según la norma. En la figura 4.13 se puede observar el ensayo realizado y los respectivos moldes.

En la figura 4.14 Se puede apreciar que a medida que aumenta el reemplazo de cemento por material fino de concha de almeja, mayor es su tiempo de fraguado, lo cual es común en materiales cementicios suplementarios.

Por otro lado, las muestras sin calcinar muestran un leve retraso al fraguar respecto a las muestras calcinadas, esto se puede deber a el tamaño de partícula. Como se apreció en la sección 4.3.2.2, la muestra sin calcinar tiene mayor tamaño de partícula, por lo que tiene menor superficie específica respecto a la muestra calcinada.



Figura 4.13 Ensayo de tiempo de fraguado, elaboración propia (2018).

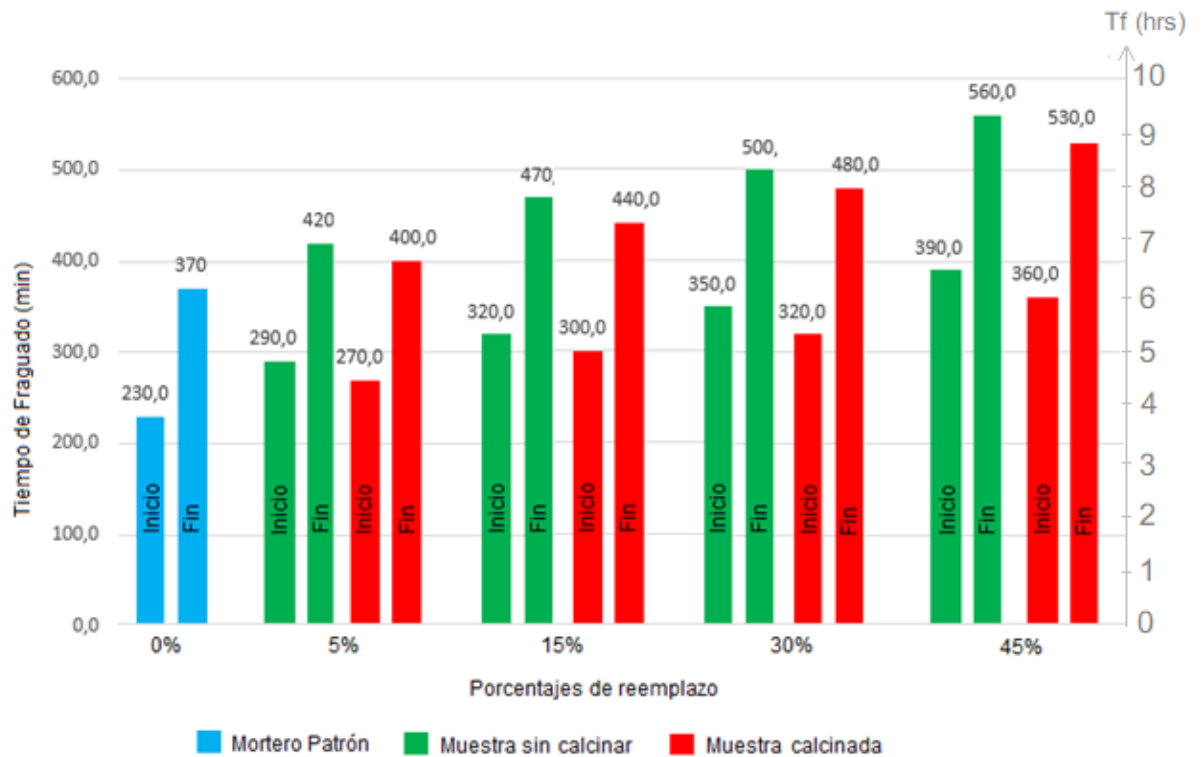


Figura 4.14 Resultados de tiempo de fraguado

4.5. Caracterización física y mecánica del mortero

4.5.1. Ensayo de absorción capilar

En la figura 4.15 y 4.16 se expresan los resultados de absorción capilar de las 8 muestras más el mortero patrón, a los 28 y 240 días respectivamente.

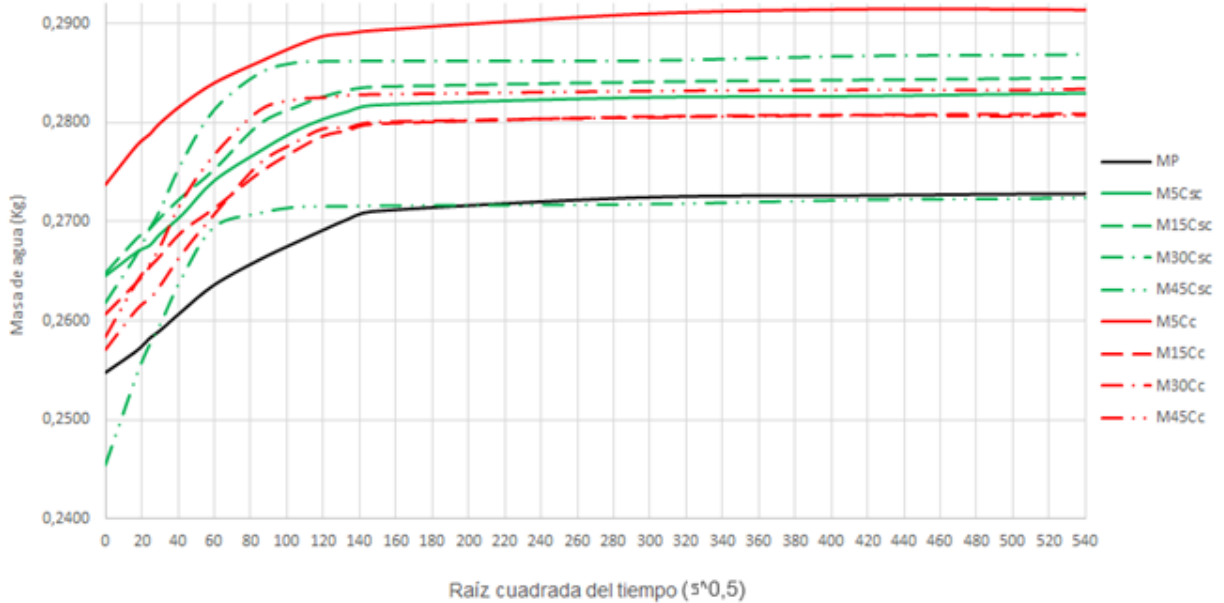


Figura 4.15 Resultados de Absorción Capilar 28 días de edad

Se logra apreciar en la figura 4.15 que MP, M5Csc, M15Csc, M5Cc, M15Cc, M30Cc se comportan de manera similar, sin embargo, esto no implica que tengan las mismas condiciones de compacidad y porosidad. Por otro lado, se observa que las probetas M30Cs/c M45Cs/c y M45Cc, absorben con mayor rapidez el agua en menor tiempo.

Según la tabla 4.8 las probetas M30Cs/c, M45Cc y M45Cc son las que absorben mayor cantidad de agua en el ensayo, esto quiere decir que tienen mayor porosidad, lo cual es verificado según la sección 3.7.1, lo que refleja coherencia a los resultados reflejados en la tabla 4.9, la cual indica que las probetas con mayor índice de porosidad son las nombradas anteriormente, por lo que son más susceptibles a ataques químicos acelerando su deterioro.

Tabla 4.8 Cantidad de agua absorbida desde inicio a fin de ensayo (ml)

MP	M5Cs/c	M15Cs/c	M30Cs/c	M45Cs/c	M5Cc	M15Cc	M30Cc	M45Cc
18,02	18,57	19,81	25,25	27,13	17,49	20,23	24	25,24

Tabla 4.9 Evaluación de calidad del mortero 28 días

Muestra	ϵ_e (%)	Porosidad (%)	Evaluación de Mortero
MP	14,400	10 – 15	Mortero de regular calidad
M5Cs/c	14,800	10 – 15	Mortero de regular calidad
M15Cs/c	15,360	> 15	Mortero de baja calidad, durabilidad inadecuada
M30Cs/c	19,360	> 15	Mortero de baja calidad, durabilidad inadecuada
M45Cs/c	21,280	> 15	Mortero de baja calidad, durabilidad inadecuada
M5Cc	13,040	10 – 15	Mortero de regular calidad
M15Cc	15,520	> 15	Mortero de baja calidad, durabilidad inadecuada
M30Cc	8,000	\leq 10	Mortero de buena calidad y compacidad
M45Cc	19,680	> 15	Mortero de baja calidad, durabilidad inadecuada

En la tabla 4.9 se aprecia que las muestras MP, M5Cs/c, M5Cc y M30Cc arrojan resultados favorables, ya que tienen un bajo porcentaje de porosidad, lo que los hace más compactos y durables.

Según la tabla 4.8 es posible apreciar que, al reemplazar mayor porcentaje de cemento, mayor es la absorción de agua que tienen las probetas. Las probetas calcinadas y sin calcinar se comportan de manera similar, por lo tanto, el fenómeno a los 28 días se ve más influenciado por el porcentaje de reemplazo que por la condición “calcinado; sin calcinar”.

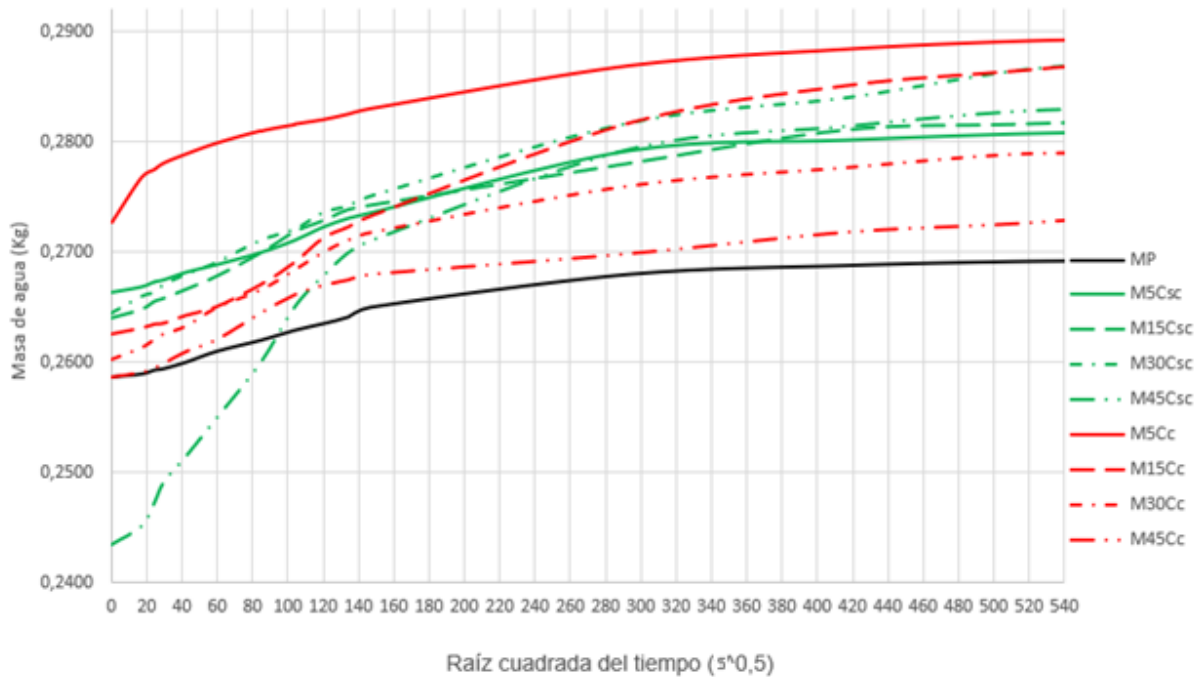


Figura 4.16 Resultados de Absorción Capilar 240 días

Los resultados de absorción capilar a la edad de 240 días se pueden visualizar en la figura 4.16, donde todas las muestras se comportan de manera similar excepto M45Csc, ésta muestra en corto plazo absorbe un gran porcentaje de agua, lo cual se ve reflejado directamente en la tabla 4.10, siendo validado por el índice de porosidad en la tabla 4.11.

Tabla 4.10 Cantidad de agua absorbida desde inicio a fin de ensayo (ml)

MP	M5Cs/c	M15Cs/c	M30Cs/c	M45Cs/c	M5Cc	M15Cc	M30Cc	M45Cc
10,6	14,66	17,9	23,03	39,59	16,7	24,89	18,79	14,8

Tabla 4.11 evaluación de calidad del mortero 240 días

Probeta N°	ϵ_e (%)	Porosidad (%)	Evaluación de Mortero
MP	5,160	≤ 10	<i>Mortero de buena calidad y compacidad</i>
M5Cs/c	9,384	≤ 10	<i>Mortero de buena calidad y compacidad</i>
M15Cs/c	11,2	<i>10 – 15</i>	<i>mortero de regular calidad</i>
M30Cs/c	8,904	≤ 10	<i>Mortero de buena calidad y compacidad</i>
M45Cs/c	22,008	> 15	<i>Mortero de baja calidad, durabilidad inadecuada</i>
M5Cc	4,464	≤ 10	<i>Mortero de buena calidad y compacidad</i>
M15Cc	10,232	<i>10 – 15</i>	<i>mortero de regular calidad</i>
M30Cc	10,264	<i>10 – 15</i>	<i>mortero de regular calidad</i>
M45Cc	7,464	≤ 10	<i>Mortero de buena calidad y compacidad</i>

La evaluación de calidad del mortero realizada a los 240 días es bastante favorable, ya que sólo M45Cs/c, no cumple según la tabla 4.11.

Se puede ver que a la edad de 28 y 240 días ocurre una disminución de absorción de agua lo que influye directamente en la porosidad de las probetas, este fenómeno es influenciado por la reacción de la cal que aporta la concha de almeja la cual disminuye la cantidad y/o el tamaño de poros en las probetas mencionadas según la sección 2.4.1.c

4.5.2. Ensayo de resistencia a la compresión

La primera edad de ensayo fue a los 28 días ya que los materiales cementicios tienden a aumentar su resistencia a largo plazo, por lo tanto, los ensayos más relevantes son a 56, 90 y 240 días.

En la figura 4.17 se muestra la realización del ensayo a compresión y en la figura 4.18. se observa una probeta ensayada a compresión.

Se logra apreciar en la figura 4.19. que las muestras M5Cs/c, M15Cs/c, M5Cc y M15Cc presentan resistencias similares a MP a la edad de 28 días, sin embargo, si comparamos M30Cc y M45Cc con M30Cs/c y M45Cs/c presentan un leve aumento de resistencia las probetas calcinadas, por lo tanto, el fenómeno se ve más influenciado por el porcentaje de reemplazo que por la condición “calcinado; sin calcinar” a la edad de 28 días.



Figura 4.17 Ensayo de resistencia a compresión



Figura 4.18 Probeta ensayada a compresión

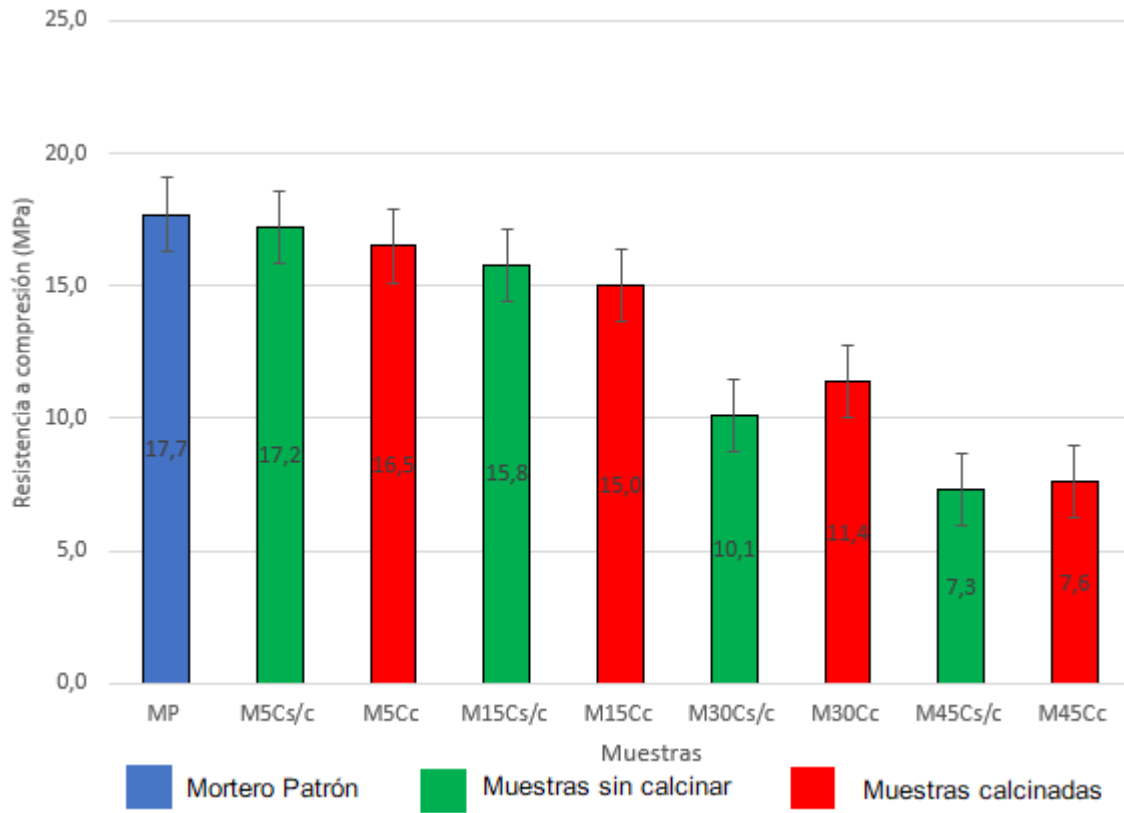


Figura 4.19 Gráfico de resistencia a compresión - 28 días de edad

La figura 4.20 muestra los resultados del ensayo de resistencia a compresión de 56 días, en el cual se puede observar que las muestras MP, M5Cs/c, M5Cc, M15Cc, M15Cs/c, M30Cc y M30Cs/c se están desarrollando de manera similar, por otra se encuentran las probetas con reemplazo de 45%, éstas aún no muestran un gran desarrollo, esto se puede deber a que aún no reacciona la concha de almeja, este fenómeno se podría ver a edades posteriores.

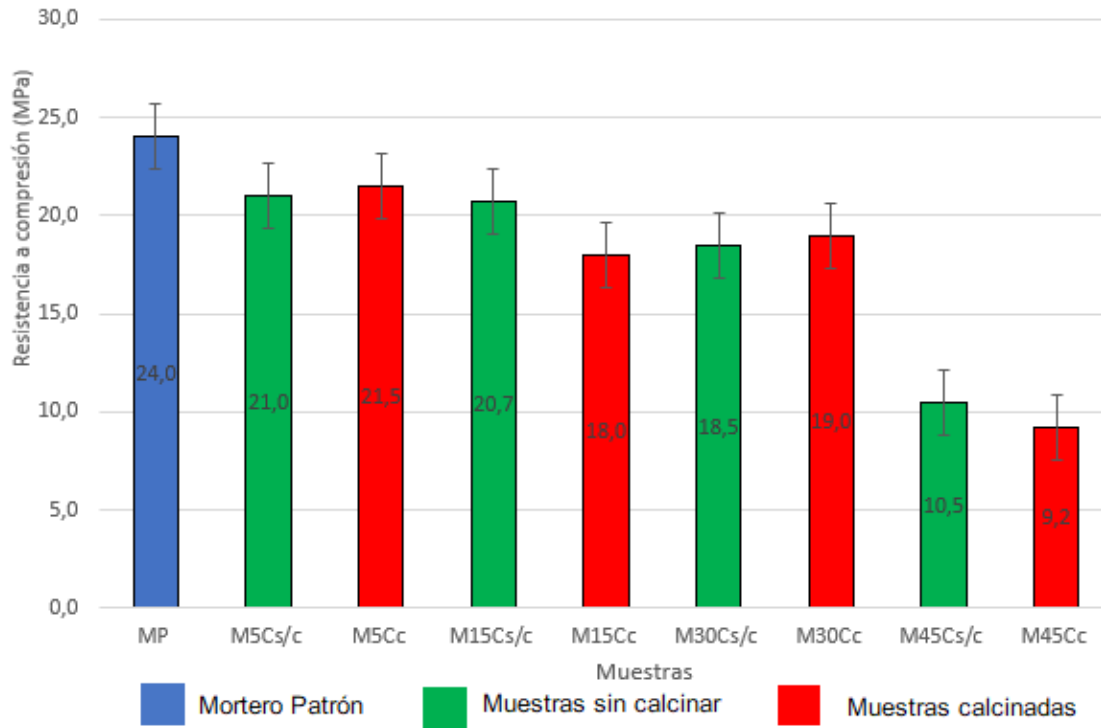


Figura 4.20 Gráfico de resistencia a compresión - 56 días de edad

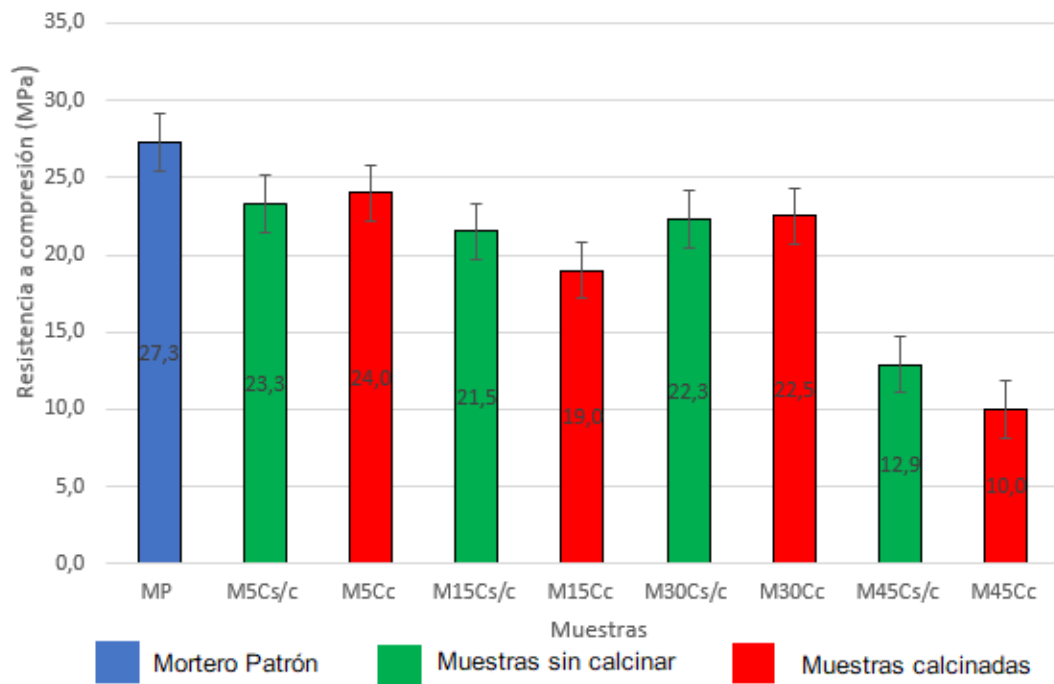


Figura 4.21 Gráfico de resistencia a compresión 90 días de edad

A la edad de 90 días ya se puede visualizar que las resistencias se ven afectadas por el reemplazo de cemento, y no por la condición “calcinada; sin calcinar”, ya que los porcentajes 5%, 15%, 30 y 45% muestran pequeñas diferencias de resistencias entre el mortero calcinado y no calcinado, por lo que, si nos enfocamos en la dispersión que tienen las probetas, los resultados serían los mismos en los porcentajes señalados.

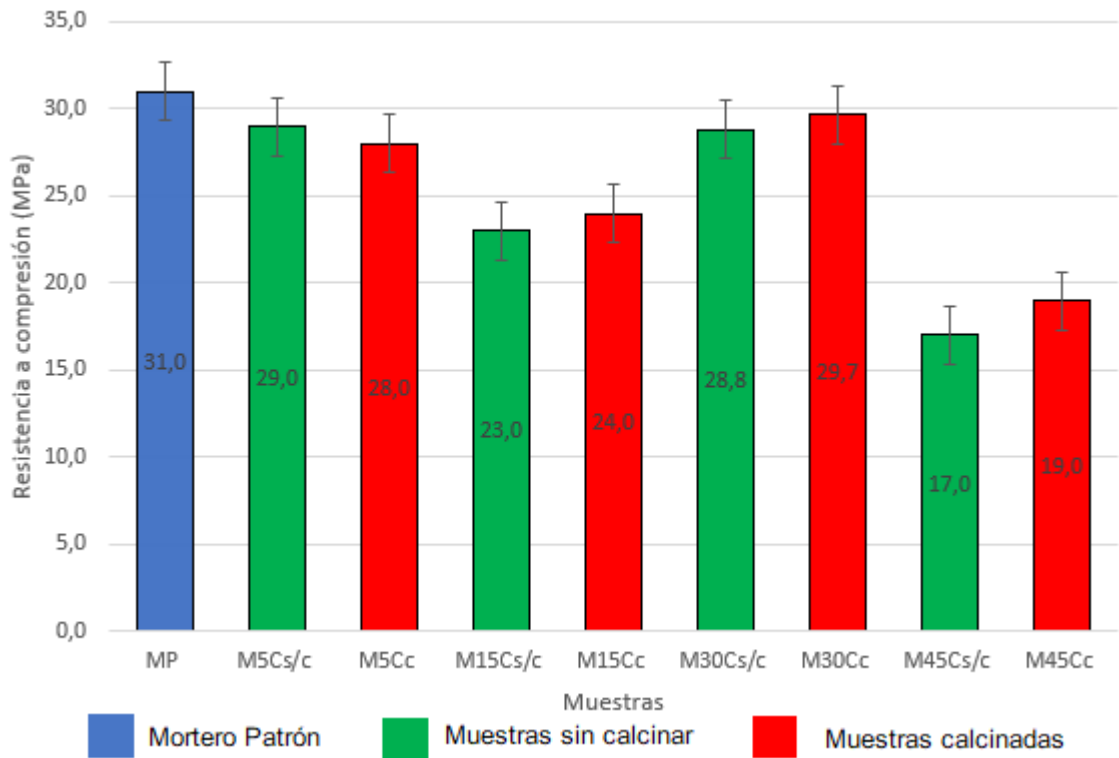


Figura 4.22 Gráfico de resistencia a compresión 240 días de edad

En la figura 4.22 se muestran los resultados de resistencia a compresión de 240 días, en este se puede confirmar que los fenómenos son influenciados por el porcentaje de reemplazo de cemento.

Se puede visualizar que las probetas M5Cs/c, M5Cc, M15Cs/c, M15Cc, M30Cs/c y M30Cc alcanzan una resistencia a compresión equivalente al mortero patrón a la edad de 240 días.

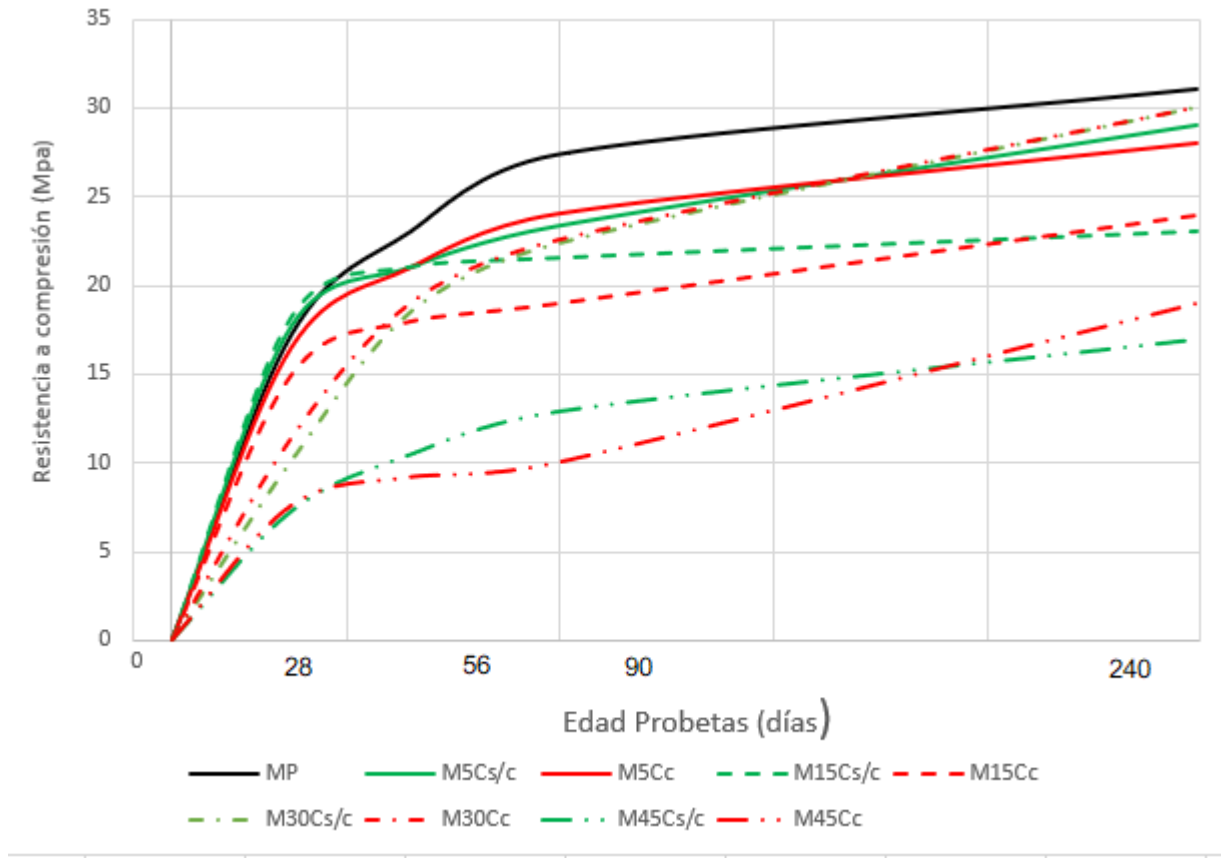


Figura 4.23 Gráfico de resistencia a compresión 28, 56, 90 y 240 días de edad

En la figura 4.23 se logra apreciar que en los primeros días de edad las probetas con mayor reemplazo de cemento, tienden a resistir menos, esto se debe a que los materiales cementicios reaccionan a largo plazo, este fenómeno se ve en las probetas con 30% de reemplazo a la edad de 56 a 90 días las cuales comienzan a reaccionar y elevan su resistencia equiparando al mortero patrón en a la edad de 240 días de edad.

Se puede observar que las resistencias a compresión no son influenciadas por la condición “calcinado; sin calcinar”, si no que por el porcentaje de reemplazo de cemento. Esto quiere decir que la temperatura de calcinación no es la óptima si se quiere activar térmicamente.

5. Conclusiones y propuesta de futuras investigaciones

5.1. Conclusiones

Es posible dar respuesta a todos los objetivos, tanto el general como los específicos.

Respecto a la caracterización química de la concha de almeja finamente molida, permitió determinar que esta contiene un 87,73% y 82,21% de óxido de calcio en el material sin calcinar y calcinado respectivamente, diferente a lo que salía en las fuentes bibliográficas las cuales se refieren en forma global a un 95% de óxido de calcio en conchas de moluscos.

Al realizar la caracterización física del material se determinó que 500°C no es una temperatura suficiente para disminuir el tamaño de partícula al material calcinado, los resultados fueron 40-50 micras en el material calcinado y 50-60 micras en el material sin calcinar, esta diferencia no fue suficiente para intervenir en los ensayos realizados, ya que todos los fenómenos fueron influenciados por el porcentaje de reemplazo de cemento.

La caracterización física del mortero con reemplazo de cemento por material fino de concha de almeja permitió determinar que a la edad de 240 días los morteros calcinados y sin calcinar son de buena calidad y compacidad con excepción de M45Cs/c según tabla 3.3.

Por otra parte, la caracterización mecánica del mortero con reemplazo de cemento por material fino de concha de almeja permitió determinar que a la edad de 240 días los morteros M5Cs/c, M30Cs/c, M5Cc y M30Cc alcanzan la resistencia del mortero patrón convencional.

Respecto a la hipótesis planteada en la sección 1.3 no fue validada, ya que, físicamente, sólo se igualan las propiedades al mortero patrón exceptuando M45Cs/c el cual no cumplió según tabla 3.3. Mecánicamente al reemplazar el cemento por 45% de concha de almeja disminuyó la resistencia a compresión respecto al mortero patrón convencional, sin embargo, se logró igualar la resistencia de éste con las muestras M5Cs/c, M30Cs/c, M5Cc y M30Cc.

Se logró determinar el comportamiento de las conchas de almejas trituradas finamente, los ensayos físicos y mecánicos se vieron influenciados directamente por el porcentaje de reemplazo de cemento, no por la condición "calcinado; sin calcinar", por lo que su activación fue por medios mecánicos según la sección 2.5.1.1., no se logró activar térmicamente a 500°C

5.2. Investigaciones futuras

En este estudio se puede apreciar que la temperatura de 500°C no es suficientemente alta para la activación de la concha de almeja, por lo que se propone evaluar el efecto de mayores temperaturas de calcinación sobre las propiedades físicas y mecánicas. Además de mejorar su activación mecánica, estableciendo tiempos más prolongados de trituración.

Si las mejores propiedades del material son obtenidas a elevadas temperaturas, realizar un estudio de factibilidad de producir concha de almeja calcinada en reemplazo de cemento v/s la producción del cemento.

Además de estudiar la contaminación que genera la producción de concha de almeja calcinada a elevadas temperaturas v/s la contaminación que genera la producción del cemento actualmente.

Bibliografía

- ACI. (2004). "Comité ACI 232" Use of fly ash in concrete., pag 41, doc, American Concrete Institute.
- Adegoke, A.P. Adewuyi & T. (2008). Exploratory study of periwinkles shells as coarse aggregates in concrete works. Hitachi, Japan & Ogbomoso, Nigeria : Asian Research Publishing Ntework, ARPNI Journal of Engineering and Applied Sciences, pág. 6. Vol.
- Álvarez, J. I., Martín, P. A., & Pedro, G. (1995). *Historia de los Morteros*. Facultad de Ciencias, Universidad de Navarra, Departamento de Química y Edafología,
- ANFACAL. (2007). *Asociación Nacional de Fabricantes de CAL, A.C.* Obtenido de <http://anfocal.org/pages/proceso-productivo-de-la-cal.php>
- ASTM C – 1709 – 11 "Standard Guide for Evaluation of Alternative Supplementary Cementitious Materials (ASCM) for Use in Concrete".
- Bernal, S., San Nicolas, R., & Van Deventer, J. (2016). *Alkali-activated slag cements produced with a blended sodium carbonate/sodium silicate activator. Advances in Cement Research, 28 (4). pp. 262-273. ISSN 0951-7197 .*
- Biovalvo. (2013). proyecto *Biovalvo, reutilización de conchas de moluscos*. Obtenido de www.Proyectobiovalvo.wordpress.com
- Calleja, J. (1983). Adiciones y cementos con adiciones. *Materiales de Construcción, Vol. 33*, 190-191. Obtenido de www.Materconstrucc.revistas.csis.es
- CChC. (2017). *Cámara Chilena de la Construcción*. Obtenido de "Índice de despacho de Cemento": <http://www.cchc.cl/centro-de-informacion/indicadores/indice-despacho-de-cemento>
- Cordova, L. (2017). *Fabricación del Cemento*. Universidad Nacional de Tucumán - Escuela de Ingeniería Química, Tucumán -, Tesis para optar grado. Argentina.
- Dopico, J. J., Day, R., Middendorf, B., Gehrke, M., & Martínez, L. (2008). "Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario". *Revista Ingeniería de Construcción , Vol 23(Nº3)*.
- Duda, H. (1986). *"Manual Tecnológico del Cemento" Primera edición pp 131-136 .*
- Etuk, B., Etuk, I. y Asuquo (2012). Feasibility of using sea shells ash as admixtures for concrete.. Nigeria : s.n, Journal of Environmental Science and Engineering.
- Galván, M., & Velázquez, R. (2011). *Cal, un antiguo material como una renovada opción para la construcción*. Ing. Invest. y tecnol. Vol.12 nº1, México.

- Kandora, K. A. (2008). *Factibilidad técnico-económica de producción de cal hidráulica alta resistencia y alta retentividad*. Universidad de Chile - Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Departamento de Ingeniería en minas, Santiago, Chile.
- Latorre Oyanedel, V. (2009). *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 Ingeniería Civil, Universidad de Chile .
- Leiva, C., Vilches, L., & Constantino, F. (2006). Aislantes a partir de conchas de moluscos. *Andalucía Investiga*(Página 38).
- López, M., & Tomás, C. J. (2010). Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del hormigón con el tiempo. *Revista Ingeniería de Construcción, Vol. 25(Nº3)*.
- Lucero, A. F. (2009). *Influencia de un acelerador de fraguado normal en la trabajabilidad y resistencia de morteros*. Valdivia: Universidad Austral de Chile - Tesis Facultad de Ciencias de la Ingeniería .
- Falade, F. (1995). An Investigation of periwinkle shell as coarse aggregate for concrete. Great Britain : Elsevier Science, Building and Environment. págs. 573-577.
- Marín. Frederic; Luquet. Gilles; Benjamin. Marie; Medacovic. Davorin (2008): Molluscan Shell Proteins: Primary Structure, Origin, and Evolution. *UMR CNRS 5561 'Biogeosciences,' Université de Bourgogne Boulevard Gabriel, 21000 DIJON, France Center for Marine Research Rovinj, Ruder Boskovic Institute Giordano Paliaga, 52210 ROVINJ, Croatia
- Martínez, C. (2016). *Estudio del comportamiento de la concha de mejillón como árido para la fabricación de hormigones en masa*.
- Martínez, P. (2003). *Desarrollo de áridos livianos de cenizas volantes para hormigones estructurales*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Munizaga Román, G. A. (2009). Fisuración por retracción en hormigones: Influencia del tipo de cemento. *Memoria para optar a título de Ingeniero Civil*. Santiago, Chile.
- NCh 158 Of.1967: "Cemento - Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento".
- NCh 148 Of.148: "Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales".
- NCh 2256/1 Of.2001: "Morteros - Parte1: Requisitos generales".
- NCh 170 Of.2016: "Hormigón - requisitos generales".
- NCh 1498 Of.1994: "Hormigón y morteros - Agua de amasado - Clasificación y requisitos".
- NCh 165 Of.2009: "Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría".

- NCh 163 Of.2013: "Áridos para morteros y hormigones - requisitos generales".
- NCh 162 Of.1977: "Cemento - Extracción de muestras".
- NCh 1520 Of.1971: "Cemento - Método de determinación del tiempo de fraguado".
- NCh 151 Of.1969: "Cemento - Método de determinación de la consistencia normal".
- NCh 1239 Of.1977: "Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de agua de las arenas".
- NCh 1116 Of.1977: "Áridos para morteros y hormigones - Determinación de la densidad aparente".
- Noel krysty. (2009): Use of recycled oyster shells as aggregate for pervious concrete. Florida, EEUU; University of Florida, Master Thesis
- Neville, A. (1988). Tecnología del concreto. México: Editorial Limusa.
- Pierre, C. A. (2000). Cement and Concrete Research. *Volumen 30*, 1349-1359. Sciencedirect. Obtenido de Cement and Concrete Research.
- Schneider, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production present and future. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 642-650.
- Sernapesca. (2017). Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura - Anuario - Desembarque total.
- Soria Santamaria, F. (s.f.). Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción. *DR. en química industrial*. Revistas de Construcción.
- Subpesca. (2014). Ministerio de Economía Fomento y Turismo. *Datos de extracción pesquera anual*.
- Valdez, T., Herrera Durán, A., Miguel, S., Fajardo, G., & Alvarado Juárez, C. (2009). Influencia de la carbonatación en morteros de cemento Pórtland y ceniza volante. *Vol 10(Nº 1)*. Ingeniería Investigación y Tecnología.
- Vallejos, G. (2014). *Comportamiento físico y mecánico de morteros elaborados con conchas de moluscos como agregado*. Tesis para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Construcción y al Título de Ingeniero Constructor, Universidad de Valparaíso.
- Villalonga, A. E. (1977). La industria del cemento dentro de la problemática de la contaminación atmosférica. *Materconstrucc*, 1-20.
- Yepes, V. (2013). Cuando se inventó el primer cemento artificial . artículo, Universidad Politécnica de Valencia.

Anexos

Anexo 1: Resultados granulometría

Tamiz		% Que pasa	% Que pasa - Corregido	Banda granulométrica NCh163 Of.2013
ASTM	Tamiz (mm) NCh163 Of.013			
3/8	9,5	100	100	
4	4,75	79	100	95 - 100
8	2,36	59	74	80 - 100
16	1,18	47	59	50 - 85
30	0,63	37	47	25 - 60
50	0,315	18	23	5 - 30
100	0,16	4	5	0 - 10
RESIDUO	RESIDUO		0	

Anexo 2: datos recolectados de ensayo de consistencia normal

Muestra	Cemento (gr)	Concha sin calcinar (gr)	Concha calcinada (gr)	agua (ml)	Porcentaje de agua (%) ^(*)
MP	500	0	0	178	35,6
M5Csc	475	25	0	171	36,0
M5Cc	475	0	25	171,5	36,1
M15Csc	425	75	0	170	40,0
M15Cc	425	0	75	171	40,2
M30Csc	350	150	0	167	47,7
M30Cc	350	0	150	169	48,3
M45Csc	275	225	0	165	60,0
M45Cc	275	0	225	167	60,7

(*) Porcentaje respecto al peso del cemento seco

Anexo 3: resultados de ensayo absorción capilar 28 días

Ensayo de Absorción Capilar		Muestras									
		MP	M5Cs/c	M15Cs/c	M30Cs/c	M45Cs/c	M5Cc	M15Cc	M30Cc	M45Cc	
	Tiempo	(Gr)	(Gr)	(Gr)	(Gr)	(Gr)	(Gr)	(Gr)	(Gr)	(Gr)	
Inicio	0	254,79	264,53	264,82	261,85	245,4	273,73	260,63	257	258,36	
	minutos	5	257	266,95	268,31	266,76	254,49	277,7	263,86	261,1	263,93
		10	258,26	267,63	269,32	269,36	257,61	278,84	265,41	262,19	265,72
		15	259	268,73	270,38	271,15	259,5	279,93	266,47	263,42	267,41
Horas	30	261	270,73	272,55	276,13	264,4	281,83	269	266,75	272,14	
	1	263,62	274,17	275,27	281,34	269,44	284	271,32	270,69	276,72	
	2	266,14	277,12	279,83	285,01	270,82	286,12	274,9	275,8	281,21	
	3	267,79	279,14	281,5	286,06	271,43	287,66	277,07	277,89	282,28	
	4	269,12	280,4	282,62	286,21	271,49	288,71	278,61	279,35	282,51	
	5	270,26	281,2	283,3	286,23	271,5	288,99	279,2	279,45	282,75	
Días	6	271	281,8	283,6	286,25	271,58	289,27	279,82	280	282,82	
	1	272,39	282,58	284,1	286,29	271,73	290,93	280,55	280,47	283,16	
	2	272,6	282,72	284,31	286,76	272,17	291,42	280,74	280,69	283,28	
	3	272,75	282,95	284,46	286,85	272,3	291,41	280,82	280,6	283,28	
	4	272,81	283,1	284,63	287,1	272,53	291,22	280,86	281	283,6	

Cantidad de agua absorbida desde el inicio a fin de ensayo (grs)										
	18,02	18,57	19,81	25,25	27,13	17,49	20,23	24	25,24	

Anexo 4: cálculos para determinar porosidad a los 28 días

Probeta N°	h (m)	A (m ²)	tn (s)	tn ^{1/2} (s ^{1/2})	W0 (kg)	Wn (kg)	m (s/m ²)	k (kg/m ² S ^{1/2})	εe (%)
MP	0,05	0,0025	12,247	3,500	0,255	0,273	4898,979	2,057	14,400
M5Cs/c	0,05	0,0025	11,832	3,440	0,265	0,283	4732,864	2,151	14,800
M15Cs/c	0,05	0,0025	11,180	3,344	0,265	0,284	4472,136	2,297	15,360
M30Cs/c	0,05	0,0025	8,367	2,893	0,262	0,286	3346,640	3,347	19,360
M45Cs/c	0,05	0,0025	8,062	2,839	0,245	0,272	3224,903	3,747	21,280
M5Cc	0,05	0,0025	10,954	3,310	0,274	0,290	4381,780	1,970	13,040
M15Cc	0,05	0,0025	11,180	3,344	0,261	0,280	4472,136	2,321	15,520
M30Cc	0,05	0,0025	10,488	3,239	0,270	0,280	4195,235	1,235	8,000
M45Cc	0,05	0,0025	9,220	3,036	0,258	0,283	3687,818	3,241	19,680

Anexo 5: Cálculos para determinar la porosidad a los 240 días

Probeta N°	h (m)	A (m ²)	t _n (s)	t _n ^{1/2} (s ^{1/2})	W ₀ (kg)	W _n (kg)	m (s/m ²)	k (kg/m ² S ^{1/2})	ε _e (%)
MP	0,05	0,0025	12,247	3,500	0,259	0,265	4898,979	0,737	5,160
M5Cs/c	0,05	0,0025	16,733	4,091	0,266	0,278	6693,280	1,147	9,384
M15Cs/c	0,05	0,0025	16,432	4,054	0,266	0,278	6572,671	1,157	9,384
M30Cs/c	0,05	0,0025	14,832	3,851	0,264	0,276	5932,959	1,156	8,904
M45Cs/c	0,05	0,0025	12,649	3,557	0,243	0,271	5059,644	3,094	22,008
M5Cc	0,05	0,0025	6,325	2,515	0,273	0,278	2529,822	0,888	4,464
M15Cc	0,05	0,0025	14,142	3,761	0,263	0,275	5656,854	1,360	10,232
M30Cc	0,05	0,0025	12,649	3,557	0,260	0,273	5059,644	1,443	10,264
M45Cc	0,05	0,0025	11,832	3,440	0,259	0,268	4732,864	1,085	7,464