



Facultad de Ingeniería.

Escuela de Construcción Civil.

Estudio del efecto de la inclusión de microsílice y cenizas de madera sobre la permeabilidad de hormigones.

Por

Gabriela Verónica

Tobar Palma

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

Prof. Guía: Juan Egaña Ramos.
Mayo, 2017.

AGRADECIMIENTOS

A mi profesor guía, Sr. Juan Egaña Ramos, por su gran ayuda, dedicación y colaboración en cada momento de consulta en esta investigación.

A don Víctor, quien me apoyó y ayudó cada vez que lo necesité en el laboratorio, gracias por todo.

A mis padres, Jessica y José Manuel, por su apoyo y amor incondicional durante toda mi vida.

A mi hermana, Eloisa, por estar conmigo y apoyarme en cada proceso de mi vida.

A mis abuelos, Tata, Mama y Lela, por su cariño incondicional.

A mis primeras amigas de universidad, Amalia, Catalina y Nicol, gracias por cada momento vivido en esta etapa y por su apoyo.

A mis amigos, Axel, Seba y Eduardo, por todas las tardes y noches de estudio y comida. Por cada momento de distracción.

A ti, mi compañero de viaje, mi amigo y confidente, Felipe, gracias por estar presente en cada momento y por tu apoyo, en esta etapa.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	2
LISTA DE ABREVIATURAS.....	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE GRÁFICOS.....	11
RESUMEN	12
ABSTRACT	12
CAPÍTULO I: GENERALIDADES.....	13
1.1 Introducción.....	14
1.2 Planteamiento del Problema	15
1.3 Objetivos.....	18
1.3.1 Objetivo General.....	18
1.3.2 Objetivos específicos	18
1.4 Hipótesis	19
1.5 Alcances.....	20
1.6 Estado del Arte	21
1.7 Metodología de Investigación	23
1.8 Estructura de tesis.....	24
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	25
2.1 Aspectos generales del hormigón.....	26
2.2 Constituyentes del hormigón.....	27
2.2.1 Cemento.....	27
2.2.1.1 Tipos de cemento	27
2.2.2 Áridos	28
2.2.2.1 Clasificación de los áridos.....	28
2.2.2.2 Función de los áridos en el hormigón.....	29
2.2.3 Agua de amasado.....	29
2.2.4 Aditivos.....	30
2.2.4.1 Tipos de aditivos.....	30
2.3 Cenizas	31

2.3.1. Definición	31
2.3.2. Tipos de cenizas.....	31
2.3.2.1. Cenizas volantes	31
2.3.2.2. Cenizas volcánicas	31
2.3.2.3. Cenizas de bagazo de caña de azúcar	32
2.3.3. Cenizas de madera	32
2.3.3.1. Origen	32
2.3.3.2. Composición química	32
2.3.3.3. Usos de la ceniza de madera	33
2.3.3.4. Utilización en el mundo.....	33
2.4. Microsílice	35
2.4.1. Definición	35
2.4.2. Producción	35
2.4.3. Composición química	36
2.4.4. Propiedades de la microsíllice	37
2.4.4.1. Propiedades químicas	37
2.4.4.2. Propiedades físicas.....	37
2.4.5. Reacción en el hormigón	39
2.4.5.1. Mejoras en el hormigón fresco	39
2.4.5.2. Mejoras en el hormigón endurecido	40
2.5. Permeabilidad	42
2.5.1. Definición	42
2.5.2. Factores que influyen en la permeabilidad	42
2.5.2.1. Porosidad	42
2.5.2.2. Relación agua/cemento	44
2.5.2.3. Curado.....	45
2.5.2.4. Áridos.....	46
2.5.3. Impermeabilización	47
2.5.3.1. Definición	47
2.5.3.2. Tipos de impermeabilización.....	47
2.5.3.3. Aditivos para impermeabilizar.....	48
2.5.4. Ensayos para determinar la permeabilidad	50

2.5.4.1.	Método de absorción.....	50
2.5.4.2.	Profundidad de penetración de agua bajo presión	50
2.5.4.3.	Método de Karsten.....	51
2.6.	Asentamiento.....	52
2.6.1.	Definición	52
2.6.2.	Consistencia y asentamiento del hormigón	52
2.6.3.	Ensayos para determinar el asentamiento.....	53
	A. Método del asentamiento del cono de Abrams	53
2.7.	Resistencia a compresión.....	54
2.7.1.	Definición	54
2.7.2.	Ensayos para determinar la resistencia a compresión.....	54
2.8.	Densidad aparente en hormigón endurecido	55
2.8.1.	Definición	55
2.8.2.	Ensayo para determinar la densidad aparente en hormigón endurecido.....	55
CAPITULO III: METODOLOGIA DE TRABAJO		56
3.1.	Programa experimental.....	57
3.2.	Diseño de la experiencia.....	58
3.3.	Selección y caracterización de los materiales.....	59
3.3.1.	Cemento.....	59
3.3.2.	Agua.....	59
3.3.3.	Cenizas de madera aromo.....	59
3.3.4.	Microsílice	59
3.3.5.	Aditivo hiperplastificante	59
3.3.6.	Áridos	59
3.4.	Granulometría.....	60
3.4.1.	Arena.....	60
3.4.2.	Gravilla	61
3.4.3.	Combinación árido grueso y árido fino	62
3.5.	Características de los áridos	64
3.6.	Tamaño máximo de la ceniza.....	64
3.7.	Dosificaciones	65
3.7.1.	Dosificación del hormigón patrón.	65

3.7.1.1.	Resistencia (fc):	65
3.7.1.2.	Resistencia media requerida (fr):	65
3.7.1.3.	Cantidad de agua (A):	66
3.7.1.4.	Cantidad de cemento (C):	66
3.7.1.5.	Cantidad de áridos:	67
3.7.1.6.	Resumen dosificación de hormigón patrón.....	67
3.7.2.	Dosificación de hormigones.	68
CAPÍTULO IV: DESARROLLO EXPERIMENTAL.....		69
4.1.	Fabricación del hormigón	70
4.1.1.	Materiales y herramientas.....	70
4.1.2.	Proceso de mezclado	71
4.1.3.	Preparación de los moldes	71
4.1.4.	Determinación de la docilidad.....	72
	72
4.1.5.	Llenado y vibrado de los moldes.....	72
4.1.6.	Desmolde y curado.	73
4.2.	Dosificaciones experimentales	74
4.2.1.	Corrección por humedad	74
CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS		77
5.1.	Ensayo de asentamiento.....	78
5.2.	Ensayo de densidad aparente del hormigón endurecido.....	79
5.3.	Ensayo de absorción	86
5.4.	Ensayo de resistencia a compresión	92
5.5.	Ensayo de permeabilidad.....	96
CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES.....		102
6.1.	Conclusiones.....	103
6.2.	Futuras investigaciones.....	104
BIBLIOGRAFÍA		105

LISTA DE ABREVIATURAS

Al_2O_3 : Óxido (III) de aluminio o Alúmina

C: Carbono

CaO: Óxido de calcio

Fe_2O_3 : Óxido de hierro (III)

H_2O : Agua

K_2O : Óxido de potasio

MgO: Óxido de magnesio

Na_2O : Óxido de sodio

P_2O_5 : Óxido de fosforo (V)

S: Azufre

SO: Óxido de azufre

SO_3 : Óxido de azufre (VI)

SiO_2 : Dióxido de silicio

TiO_2 : Dióxido de titanio

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Microsílice.....	35
Figura 2.2: Esquema de una fundición de metal de sílice o ferro-silicio.....	36
Figura 2.3: Micro fotografía de granos de cemento portland (izquierda) y partículas de microsílice (derecha), en la misma ampliación.....	38
Figura 2.4: Comparación microscópica entre hormigón sin microsílice (izquierda) y hormigón con microsílice (derecha).....	39
Figura 2.5: Esquema de exudación y canales capilares.....	40
Figura 2.6: Esquema de la permeabilidad en el hormigón. A la izquierda un hormigón normal y a la derecha hormigón con adición de microsílice, mucho menos permeable.....	41
Figura 2.7: Porosidad y permeabilidad.....	43
Figura 2.8: Relación entre porosidad capilar y permeabilidad en el hormigón.....	44
Figura 2.9: Influencia de la relación agua/cemento sobre la permeabilidad del hormigón.....	45
Figura 2.10: Influencia del curado en la permeabilidad del hormigón.....	46
Figura 2.11: Influencia del tamaño máximo del árido en la permeabilidad.....	46
Figura 2.12: Equipo para ensayo de profundidad de penetración de agua bajo presión.....	50
Figura 2.13: Pipeta karsten.....	51
Figura 2.14: procedimiento cono de abrams.....	53
Figura 2.15: Ensayo de resistencia a compresión.....	54
Figura 3.16: Tamaño máximo ceniza.....	64
Figura 4.17: Proceso de mezclado.....	71
Figura 4.18: Determinación de docilidad.....	72
Figura 4.19: Llenado y vibrado de moldes.....	72
Figura 4.20: Probetas recién desmoldadas y marcadas.....	73
Figura 4.21: Curado de probetas.....	73
Figura 5.22: Medición de caras laterales, probeta cúbica.....	79
Figura 5.23: Medición de alturas probeta cúbica.....	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Composición química de la ceniza de madera de diferentes especies.	32
Tabla 2.2: Rangos para la composición química de las microsílices.	36
Tabla 2.3: Límites de asentamiento según consistencia del hormigón fresco.	52
Tabla 3.4. Análisis granulométrico promedio de la arena.	60
Tabla 3.5. Análisis granulométrico promedio de la gravilla.	61
Tabla 3.6. Análisis granulométrico combinación árido grueso/árido fino.	63
Tabla 7: Características de los áridos.	64
Tabla 3.8. Resumen dosificación hormigón patrón.	67
Tabla 3.9. Resumen dosificación de hormigones.	68
Tabla 4.10: Dosificación hormigón P corregida por humedad.	74
Tabla 4.11: Dosificación hormigón PCM corregida por humedad.	75
Tabla 4.12: Dosificación hormigón PMS corregida por humedad.	75
Tabla 4.13: Dosificación hormigón 10% CM corregida por humedad.	75
Tabla 4.14: Dosificación hormigón 20% CM corregida por humedad.	76
Tabla 4.15: Dosificación hormigón 30% CM corregida por humedad.	76
Tabla 5.16: Variación de asentamiento para hormigones.	78
Tabla 5.17: Resultados ensayo densidad aparente, hormigón HP.	80
Tabla 5.18: Resultados ensayo densidad aparente, hormigón HPCM.	80
Tabla 5.19: Resultados ensayo densidad aparente, hormigón HPMS.	80
Tabla 5.20: Resultados ensayo densidad aparente, hormigón H10%CM.	81
Tabla 5.21: Resultados ensayo densidad aparente, HORMIGÓN H20%CM.	81
Tabla 5.22: Resultados ensayo densidad aparente, HORMIGÓN H30%CM.	81
Tabla 5.23: Resumen resultados ensayo densidad aparente.	82
Tabla 5.24: Variación de resultados de densidad aparente.	84
Tabla 5.25: Resultados ensayo de absorción, hormigón HP.	86
Tabla 5.26: Resultados ensayo de absorción, hormigón HPCM.	86
Tabla 5.27: Resultados ensayo de absorción, hormigón HPMS.	87
Tabla 5.28: Resultados ensayo de absorción, hormigón H10%CM.	87
Tabla 5.29: Resultados ensayo de absorción, hormigón H20%CM.	87
Tabla 5.30: Resultados ensayo de absorción, hormigón H30%CM.	87
Tabla 5.31: Resumen resultados ensayo de absorción.	88
Tabla 5.32: Variación resultados de absorción.	90

Tabla 5.33: Resultados ensayo resistencia a compresión.....	92
Tabla 5.34: Variación de resistencia a compresión.....	94
Tabla 5.35: Resultados ensayo de permeabilidad, hormigón HP.....	96
Tabla 5.36: Resultados ensayo de permeabilidad, hormigón HPCM.....	96
Tabla 5.37: Resultados ensayo de permeabilidad, hormigón HPMS.....	96
Tabla 5.38: Resultados ensayo de permeabilidad, hormigón H10%CM.....	97
Tabla 5.39: Resultados ensayo de permeabilidad, hormigón H20%CM.....	97
Tabla 5.40: Resultados ensayo de permeabilidad, hormigón H30%CM.....	97
Tabla 5.41: Resumen resultados ensayo de permeabilidad.....	98
Tabla 5.42: Variación de permeabilidad.....	100

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1: Granulometría promedio de la arena.....	61
Gráfico 3.2. Granulometría promedio de la gravilla.	62
Gráfico 3.3. Granulometría árido combinado.	63
Gráfico 5.4: Variación de asentamiento para los diferentes hormigones.....	78
Gráfico 5.5: Comparación densidad aparente, hormigones patrones.....	82
Gráfico 5.6: Comparación densidad aparente: HP, H10% CM, H20% CM y H30% CM.....	83
Gráfico 5.7: Comparación densidad aparente: HPCM, H10% CM, H20% CM y H30% CM.....	83
Gráfico 5.8: Comparación densidad aparente: HPMS, H10% CM, H20% CM y H30% CM.....	84
Gráfico 5.9: Variación densidad aparente.....	85
Gráfico 5.10: Comparación absorción, hormigones patrones.....	88
Gráfico 5.11: Comparación absorción: HP, H10% CM, H20% CM y H30% CM.....	89
Gráfico 5.12: Comparación absorción: HPCM, H10% CM, H20% CM y H30% CM.....	89
Gráfico 5.13: Comparación absorción: HPMS, H10% CM, H20% CM y H30% CM.....	90
Gráfico 5.14: Variación de absorción.....	91
Gráfico 5.15: Comparación resistencia a compresión, hormigones patrones.....	92
Gráfico 5.16: Comparación resistencia a compresión: HP, H10% CM, H20% CM y H30% CM.....	93
Gráfico 5.17: Comparación resistencia a compresión: HPCM, H10% CM, H20% CM y H30%.....	93
Gráfico 5.18: Comparación resistencia a compresión: HPMS, H10% CM, H20% CM y H30% CM.....	94
Gráfico 5.19: Variación de resistencia a compresión.....	95
Gráfico 5.20: Comparación de permeabilidad: hormigones patrones.....	98
Gráfico 5.21: Comparación de permeabilidad: HP, H10% CM, H20% CM y H30% CM.....	99
Gráfico 5.22: Comparación de permeabilidad: HPCM, H10% CM, H20% CM y H30% CM.....	99
Gráfico 5.23: Comparación de permeabilidad: HPMS, H10% CM, H20% CM y H30% CM.....	100
Gráfico 5.24: Variación de permeabilidad.....	101

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es estudiar la posibilidad de incluir cenizas de madera de aramo en conjunto con microsílíce, como adición al hormigón esperando que contribuya a la impermeabilidad, sin desmedro de la resistencia a compresión. Para tal efecto, se realizaron diversos hormigones, haciendo variar los contenidos de las adiciones. Con estos hormigones se realizaron distintos ensayos: docilidad, densidad aparente, absorción o porosidad y resistencia a la compresión para observar sus variaciones.

Los resultados obtenidos muestran una disminución de la permeabilidad en el hormigón H10%CM, además, se mantuvo la resistencia a compresión de dicho hormigón.

Palabras clave: Hormigón, cenizas de madera de aramo, microsílíce, impermeabilidad, resistencia a compresión.

ABSTRACT

The objective of this research is to study the possibility of including acacia ash together with silica fumes, as an addition to the concrete hoping that it contributes to the impermeability, without loss of the resistance to compression. For this purpose, several mixes were made, varying the contents of the additions. With these mixes, different tests were realized: docility, bulk density, absorption or porosity and resistance to compression to observe its variations.

The results show a decrease in the permeability in the concrete H10% CM, in addition, the compressive strength of the concrete was maintained.

Keywords: Concret, acacia ash, silica fumes, impermeability, resistance to compression.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES.

1.1 Introducción

La industria de la construcción es un sector muy dinámico, donde continuamente se consiguen avances y mejoras en los materiales utilizados con el fin de ofrecer mejores prestaciones y mayor seguridad. Dentro de dichos avances se encuentra la utilización de materiales puzolánicos que mejoran el comportamiento de los conglomerantes que los incorporan.

La ingeniería de materiales de construcción como rama de la ciencia es una disciplina que avanza día a día, en una constante búsqueda por tener mejores alternativas para dar solución a los distintos requerimientos del mercado. Se desea que las estructuras sean lo más resistentes posibles, que aseguren una determinada vida útil, y un óptimo desempeño de los materiales empleados, pero sin perder de vista la rentabilidad del proyecto, todo esto enmarcado en el ambiente en el cual nos desenvolvemos como sociedad.

El hormigón es por lejos el material más utilizado en la construcción, debido a su buen comportamiento, cuando se diseña y se produce adecuadamente el hormigón presenta excelentes propiedades mecánicas, en cuanto a resistencia a distintos esfuerzos, impactos, la acción del fuego, ambientes agresivos, etc.

Es por esto que hoy en día el uso de materiales residuales puzolánicos supone un beneficio medioambiental doble, por un lado el sustituir parte de cemento, cuya fabricación produce emisiones de dióxido de carbono, y por otro lado el consumo de los materiales residuales de otros procesos industriales.

1.2. Planteamiento del Problema

El hormigón es el material de construcción más utilizado en todo el mundo. Alrededor de 11 mil millones de toneladas de hormigón se consumen al año [Mehta y Monteiro, 2006].

En la sociedad actual los desechos sólidos representan un importante volumen de material que no es empleado, el cual ocupa espacio y causa problemas de salud, urbanismo e impacto en el medio ambiente, desmejorando la calidad de vida de los ciudadanos.

"El desarrollo es sustentable cuando satisface las necesidades de la presente generación sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para que satisfagan sus propias necesidades" [Brundtland, 1987]. Es por esto que la tecnología de la construcción se encuentra en la búsqueda de sistemas que aprovechen y aumenten el uso de materiales reciclables, que permitan estimular y disminuir el deterioro del medio ambiente.

El aprovechamiento al máximo de cualquier subproducto generado durante un proceso industrial tiene que tener hoy día un carácter prioritario. Una de las ventajas que presenta el sector de la construcción es que, al margen de poder digerir grandes cantidades de productos, admite una gama inmensa de calidades, lo que permite confeccionar una gran panorámica de materiales, cada uno adecuado para un uso concreto [A. Hidalgo, 2012].

Uno de los elementos que hoy en día se están utilizando son las cenizas, ya sea procedentes de la combustión en centrales termoeléctricas de carbones antracíticos, bituminosos, sub-bituminosos y lignitos; otras procedentes de la eyección de un viento volcánico, y por último las cenizas procedentes de la madera.

Debido al aumento del costo del cemento Portland, se plantea la sustitución de una parte de dicho cemento por cenizas vegetales que aporten una mayor o igual resistencia a la aportada por el Portland puro, lo cual disminuye el costo del material de construcción [Freites Antonio, 2013]. Y a la vez contribuye en la disminución de este tipo de desechos.

Naik (1999) investigó las propiedades morfológicas de la ceniza de madera, físicas y químicas, y encontró que podrían ser utilizadas potencialmente como un aditivo mineral puzolánico y activador químico en el material a base de cemento. Además, indicó que la ceniza de madera tiene un significativo potencial de ser utilizado en la producción de material de baja resistencia controlada (CLSM) y otros materiales de construcción tales como el producto de mampostería, hormigón compactado con rodillo y pavimento (RCCP) y cementos mezclados.

Investigaciones recientes confirman la idoneidad de la ceniza de madera como un material de sustitución de cemento parcial en la producción de hormigón de grado estructural y hormigón autocompactante para aplicaciones en la construcción [Elinwa y Mahmood, 2002; Elinwa et al., 2008; Abdullahi, 2006].

Además un estudio realizado para investigar la viabilidad de la utilización de cenizas de madera como una sustitución parcial de material para el proceso de consumo intensivo de energía de cemento hidráulico para la producción de hormigón. Las pruebas mostraron resultados prometedores en la que la ceniza de madera pueden convenientemente ser utilizado como material constituyente durante la producción de hormigón de calidad estructural con propiedades mecánicas aceptables y durabilidad [Udoeyo y Dashibil, 2002; Elinwa y Ejeh, 2004; Udoeyo et al, 2006; Naik et al, 2003].

Debido a diferencias en las proporciones y estructuras de los componentes, no es posible reemplazar completamente el cemento, pero sí es posible reemplazar una cantidad menor (entre el 10% y el 25%) de cemento por ceniza de residuos madereros [Sotomayor Alejandro, 2011].

Hoy en día, las cenizas de madera también se utilizan como material de relleno en la construcción de pavimentos flexibles para carreteras y autopistas [Etiegni y Campbell, 1991].

Udoeyo et al. (2006) investigaron las propiedades de absorción de agua de hormigón con cenizas de madera como material de sustitución parcial del cemento. Las mezclas oscilan entre el 5% y el 30%, en incrementos del 5%. La absorción de agua de hormigón con cenizas de madera fue observada a aumentar gradualmente, desde 0,14 a 1,05% con el aumento en el nivel de sustitución de cemento. En los niveles de sustitución de cemento por residuos de la madera debajo del 10% ha sido un valor aceptable para la mayoría de materiales de construcción.

Por otro lado, el micro-sílice debido a su extrema finura además de su contenido de sílice, tiene un importante papel en las reacciones internas de la pasta de cemento. Su uso se incrementó en la producción de hormigones de alta resistencia en la década de los 80's y 90's.

Al ser tan pequeñas las partículas actúan como un filler llenando los espacios vacíos en la pasta, haciendo que el hormigón tenga mayores propiedades adherentes, creando mayor compacidad que a la vez brinda mayor fluidez a la mezcla. Además las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón mejoran, en términos generales, con la adición de micro-sílice [QING Y, ZENAN Z, DEYU K, RONGSHEN C, 2007].

La incorporación del micro-sílice en las mezclas de concreto afecta varias de las propiedades del mismo, produce un incremento en la resistencia y reducción en permeabilidad del concreto, combinados con la reducción de hidróxido de calcio, significan que las características de durabilidad del concreto son enormemente mejoradas [**KOPRIMO S.A. DE C.V., 2005**].

En nuestro país no se tiene mucha claridad sobre el tema de la incorporación de cenizas de madera mezcladas con micro-sílice, motivo por cual se hace necesario acudir a la micro estructura del cemento que utilizada en la forma correcta, posibilitaría realizar a este nivel pequeños cambios que generarían mejoras en la resistencia, durabilidad y demás propiedades a escala real en el hormigón [Gibbons Pat, 1997].

Al realizar este estudio se espera comparar el comportamiento del hormigón convencional con el hormigón con sustitución de cenizas de madera y micro-sílice, para así encontrar una dosificación adecuada que permita disminuir la permeabilidad del hormigón y a la vez mantener o aumentar la resistencia mecánica de este mismo. Por otro lado se desea minimizar el costo que tiene el hormigón convencional, ya que las cenizas de madera son un desecho fácil de conseguir, aportando además a la disminución de desechos que pueden dañar el medio ambiente.

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Determinar la influencia que ejercen las incorporaciones de microsílíce y cenizas de madera sobre la permeabilidad del hormigón.

1.3.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de adiciones variables de cenizas de madera sobre la permeabilidad del hormigón, comparándola con la de hormigón sin adiciones y con la de hormigón con adiciones de microsílíce.
- Evaluar los efectos colaterales de la adición de cenizas de madera sobre las siguientes propiedades:
 - Asentamiento.
 - Demanda de agua para mantener asentamiento constante.
 - Resistencia a compresión.
 - Densidad aparente.

1.4. Hipótesis

“La adición de cenizas de madera al hormigón, reducirá su permeabilidad y contribuirá a aumentar su resistencia mecánica.”

1.5. Alcances

- El estudio estará limitado al uso de microsílíce y cenizas obtenidas de la quema de madera de aramo.
- Se utilizará cemento portland puzolánico grado corriente.
- Se realizará un hormigón patrón sin sustituciones, un hormigón patrón con adición de 4% de microsílíce y un hormigón patrón con adición de 20% de cenizas de aramo. Estos serán comparados entre sí.
- Se realizaran las siguientes sustituciones que serán comparadas con los hormigones patrones:
 - Hormigón con adición de 4% de microsílíce y sustitución 10% de cenizas de aramo.
 - Hormigón con adición de 4% de microsílíce y sustitución 20% de cenizas de aramo.
 - Hormigón con adición de 4% de microsílíce y sustitución 30% de cenizas de aramo.
- Se realizarán los siguientes ensayos:
 - Asentamiento.
 - Permeabilidad a los 28 días.
 - Resistencia a la compresión a los 28 días
 - Porosidad, absorción de agua a los 28 días.
 - Densidad aparente en hormigón endurecido.
- Se realizaran un total de 54 probetas, 18 probetas estarán destinadas a ensayos de permeabilidad a los 28 días, 18 probetas a ensayos de resistencia a compresión a los 28 días y 18 probetas a ensayos de porosidad.
- El ensayo de asentamiento se realizará a cada una de las mezclas.
- El ensayo de densidad aparente será realizado con las probetas existentes.

1.6. Estado del Arte

La industria de la construcción es un área en donde continuamente se consiguen avances y mejoras en los materiales utilizados. Hoy en día, se considera al hormigón el rey universal de los materiales de construcción debido a sus indiscutibles ventajas. Es un material que permite conseguir piezas de cualquier forma, con la única limitación del molde o sistema de encofrado, esto se debe al carácter plástico que posee. Además, es un material con resistencias apreciables a compresión y aunque posea resistencias débiles a tracción, permite aumentarlas de manera significativa con el acero.

Dentro de los avances que hoy se tienen es la incorporación de materiales puzolánicos que mejoran el comportamiento del hormigón y que a la vez aporten en la disminución de residuos al medio ambiente.

A nivel mundial, la reutilización de productos procedentes de la combustión de carbón (CCPs, Coal Combustion Products) es una realidad y existen agrupaciones que promueven el uso, como son la European Coal Combustion Products Association (ECOBA), en EEUU la American Coal Ash Association (ACAA) y en Canadá la Association of Canadian Industries Recycling Coal Ash (CIRCA). El hormigón con incorporación de cenizas volantes da a conocer que la permeabilidad del hormigón baja con respecto al hormigón sin adición y además puede llegar a producir un incremento en la resistencia mecánica.

En Estados Unidos, año 2008, el profesor Mulalo Doyoyo del Instituto Tecnológico de Georgia, desarrolló un tipo de hormigón a partir de las cenizas procedentes de la industria, convirtiendo un desecho en una materia prima realmente útil. Este hormigón se conoce como “cenocell” y se diferencia del hormigón convencional ya que está hecho solo con cenizas, además posee buenas propiedades aislantes y alta resistencia al fuego.

Un estudio realizado en India, en el año 2014, de hormigón con ceniza de bagazo el cual muestra como resultado un aumento en la resistencia del hormigón con sustitución de hasta 10% de ceniza.

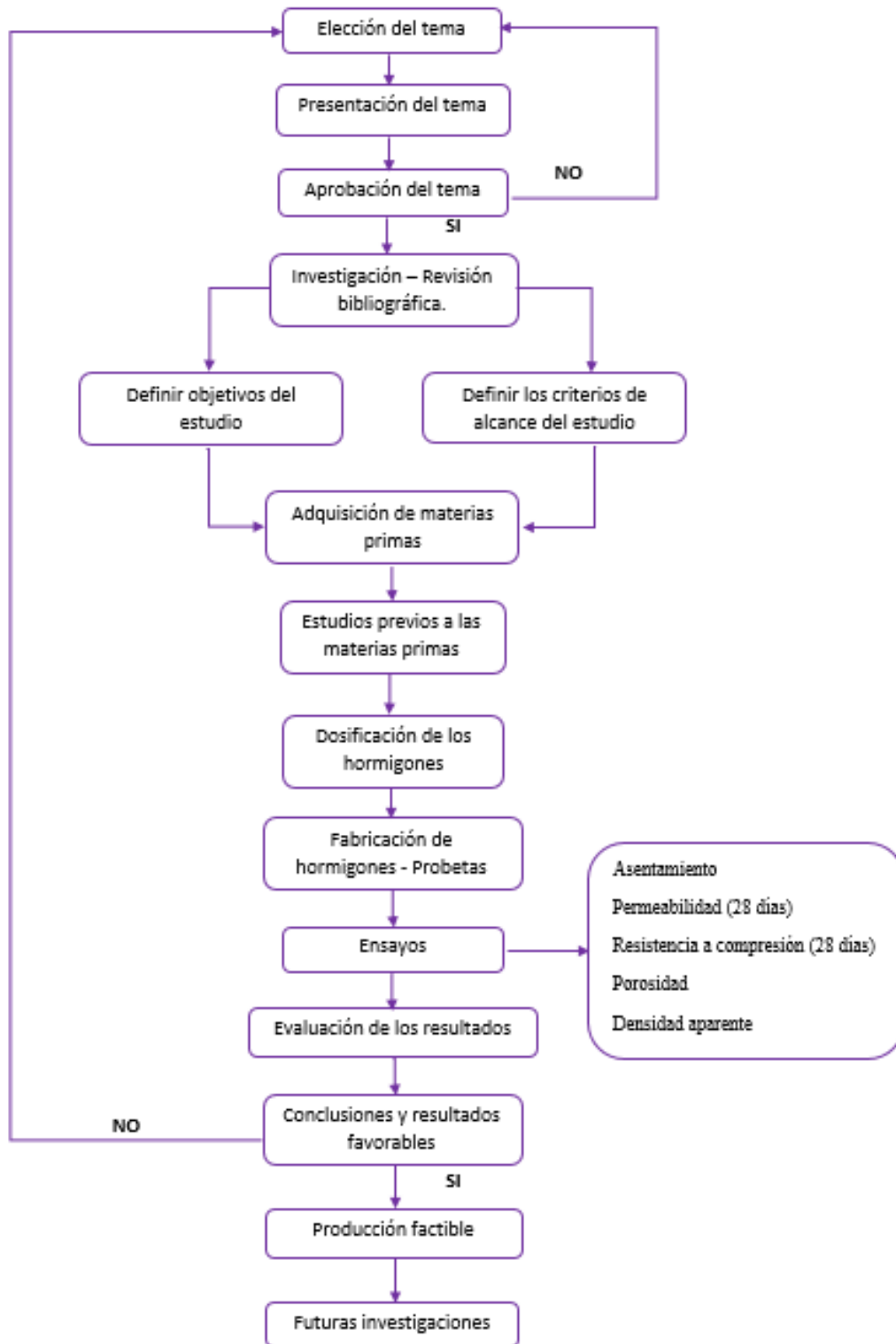
A nivel mundial existen diversos estudios que avalan la utilización de cenizas, provenientes de distintas materias primas, en el uso del hormigón, pero es muy poca la información sobre hormigones con incorporación de cenizas.

En Chile la inclusión de cenizas volantes en la producción de cemento y hormigón no es una práctica común, debido a diversos factores entre los cuales podría incidir el costo de transporte de las cenizas y la disponibilidad de materias primas para la producción de

cemento existente en nuestro país. Pero no se encuentran registro de estudios de hormigones con incorporación de cenizas de madera.

En la Universidad de Valparaíso existen registros de estudios de remplazos parciales de cemento por ceniza volante, factibilidad de utilización de cenizas volantes en morteros e influencia en la incorporación combinada de microsílíce y ceniza volante en la reducción de calor de hidratación del hormigón. Pero no existen registros de hormigón con incorporación de cenizas de madera.

1.7. Metodología de Investigación



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

1.8. Estructura de tesis

La estructuración de la presente tesis se encuentra dividida en seis capítulos.

El primer capítulo correspondiente a las generalidades, en el cual se plantean los objetivos, alcances, hipótesis, justificación de la investigación y la metodología que se seguirá, para llevar a cabo la investigación

El segundo capítulo correspondiente al marco teórico, en el cual se presentan los aspectos generales del hormigón, de la ceniza de madera y de la microsílíce; además de sus constituyentes.

El tercer capítulo se detallarán los materiales a utilizar, ensayos a realizar y dosificación del hormigón a utilizar, para poder llevar a cabo la experiencia.

El cuarto capítulo hace referencia al desarrollo experimental de la investigación, confección de probetas y ensayos utilizados basados en la normativa chilena.

En el quinto capítulo se expondrán los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el laboratorio, a través de tablas y gráficos.

En el sexto capítulo se analizarán las tablas y gráficos obtenidos en el capítulo anterior, para obtener las conclusiones, que corresponden al contenido de este capítulo.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.

2.1. Aspectos generales del hormigón.

La palabra hormigón proviene del latín “Formicus” o “Concretus” que traducido quiere decir homogéneo con molde o forma.

El hormigón es una mezcla homogénea de áridos finos, áridos gruesos, un aglomerante y agua en las debidas proporciones para que fragüe y endurezca. En el momento de su amasado puede añadirse otros productos o materiales para mejorar alguna de sus características determinadas.

Cada uno de estos elementos constituyentes del hormigón debe cumplir con determinados requisitos de calidad, de manera que podamos disminuir al mínimo el margen de error en el diseño de dosificaciones. La norma chilena establece claramente los parámetros dentro de los cuales se pueden considerar aptos estos materiales para la elaboración de hormigón con fines estructurales, desde las densidades de los distintos materiales, características del agua de amasado, tratamiento de los materiales y procedimientos de elaboración, entre otras.

El hormigón tiene su origen en el Antiguo Egipto y desde entonces también sería empleado en siglos posteriores por otras culturas y civilizaciones como sería el caso de Grecia o el imperio romano. Precisamente durante este último periodo histórico habría que destacar que el hormigón se utilizó en parte para poner en pie construcciones tan importantes como el Coliseo de Roma.

El primer puente creado con hormigón de manera íntegra se realizó en la ciudad francesa de Souillac en el año 1816. En Estados Unidos una de las obras más significativas que lo empleó tal y como hoy lo conocemos es el canal de Erie. El Canal de Panamá, la afamada internacionalmente prisión de Alcatraz e incluso la espectacular Ópera de Sidney, situada en Australia, son otras de las sorprendentes edificaciones que también se han levantado haciendo uso del hormigón.

2.2. Constituyentes del hormigón

2.2.1. Cemento

El cemento es 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.

En el mercado actual, disponemos de varios tipos de cementos, elaborados a partir de materias base similares, pero mezcladas en determinadas proporciones, proporcionando un amplio abanico de posibilidades, de acuerdo a las necesidades y requerimientos para una mezcla de hormigón.

2.2.1.1. Tipos de cemento

Según la norma NCH 148 Of 68, los cementos se clasifican de acuerdo a su composición en las siguientes clases:

a. Cemento Portland

Es el producto que se obtiene de la molienda conjunta de clínquer y yeso, con adición de otros materiales.

b. Cemento siderúrgico

b.1. Cemento Portland siderúrgico

Es el cemento en cuya composición entrará escoria básica granulada de alto horno en una proporción no superior al 30% en peso del producto terminado.

b.2. Cemento siderúrgico

Es el cemento en cuya composición entrará escoria básica granulada de alto horno en una proporción comprendida entre el 30% y el 75% del producto terminado.

c. Cemento con agregado tipo A

c.1. Cemento Portland con agregado tipo A

Es el cemento en cuya composición entrará agregado tipo A, en una proporción no superior a 30% en peso del producto terminado.

c.2. Cemento con agregado tipo A

Es el cemento en cuya composición entrará agregado tipo A en una proporción comprendida entre el 30% y 50% en peso del producto terminado.

d. Cemento puzolánico

d.1. Cemento Portland puzolánico

Es el cemento en cuya composición entrará puzolana en una proporción no superior a 30% en peso del producto terminado.

d.2. Cemento puzolánico

Es el cemento en cuya composición entrará puzolana en una proporción comprendida entre el 30% y 50% en peso del producto terminado.

2.2.2. Áridos

Los áridos son materiales pétreos compuestos de partículas duras, de forma y tamaño estable. Habitualmente se dividen en tres fracciones: grava, gravilla y arena.

- Grava: Árido cuyas partículas tienen tamaños comprendidos entre 20 y 40 mm.
- Gravilla: Árido cuyas partículas tienen tamaños comprendidos entre 5 y 20 mm.
- Arena: Árido cuyas partículas tienen tamaños comprendidos entre 0.16 y 5 mm.

2.2.2.1. Clasificación de los áridos.

Los áridos pueden clasificarse según cuatro parámetros.

- I. Según tamaño del grano:
 - Árido grueso > 5 mm: Árido retenido en tamiz de 5 mm.
 - Árido fino ≤ 5 mm: Árido que pasa por el tamiz de 5mm y es retenido en el tamiz de 0.08mm.
- II. Según procedencia:
 - Árido natural: Árido procedente de yacimientos pétreos y que no ha sido sometido a tratamiento alguno
 - Árido tratado: Árido que ha sido sometido a tratamiento de trituración, clasificación por tamaños y/o lavado.
- III. Según granulometría:
 - Continua: Son aquellas en las que están presentes todos los tamaños de granos.
 - Discontinua: Son aquellas a las que les falta una fracción intermedia de su granulometría.
 - Irregular: Son aquellas que solo poseen un o dos tamaños.

IV. Según su forma:

- Áridos chancados: Aquel árido proveniente de un proceso industrial. Normalmente chancado o triturado, separado por tamaños y lavado. Sus partículas presentan caras rugosas y de forma irregular, pero cercanas a una forma cúbica.
- Áridos rodados: Aquel árido que proviene de ríos o empréstitos naturales. Su proceso de producción contempla básicamente la separación por tamaños y el lavado. Sus partículas presentan caras lisas y son de forma redondeada.

2.2.2.2. Función de los áridos en el hormigón

Los áridos ocupan entre un 65 y 75% del volumen total del hormigón. Debe darse gran atención a su elección y control, ya que de sus características dependerán:

- Docilidad del hormigón fresco
- Resistencia del hormigón endurecido
- Durabilidad de las estructuras
- Economía en las mezclas
- Disminuir la cantidad de cemento, pero teniendo cuidado de no afectar la resistencia del hormigón, esto se logra con una buena granulometría del árido grueso.
- Formar un esqueleto rígido, reduciendo variaciones de volumen. Lo ideal es un esqueleto bien graduado, con buenas proporciones de áridos.

2.2.3. Agua de amasado

El agua de amasado o agua libre es el agua contenida en el hormigón fresco, descontada el agua absorbida por los áridos.

El agua de amasado cumple dos roles fundamentales en el hormigón:

- Hidratar al cemento para formar una pasta que pueda fraguar y posteriormente endurecer, convirtiéndose en el cementante requerido para unir las partículas de áridos. La cantidad de agua necesaria para activar químicamente al cemento es aproximadamente un 28 % de su peso.
- Otorgar trabajabilidad o fluidez a la mezcla de hormigón para que pueda ser utilizado en obra. La cantidad de agua necesaria para esta función es adicional a la requerida para combinarse químicamente con el cemento.

2.2.4. Aditivos

Los aditivos son productos que han sido desarrollados con el fin de modificar y mejorar las características del hormigón, por eso, es necesario que su uso sea muy cuidadoso, ya que el empleo inadecuado de aditivos puede traer consecuencias negativas a la estructura. Existen diversas características del hormigón que pueden ser modificadas con el uso de aditivos, ya que a medida que la tecnología de la construcción avanza, surgen nuevos aditivos para otorgarle características especiales del material.

2.2.4.1. Tipos de aditivos

La norma NCH 2182 Of 95 clasifica y establece los requisitos de los aditivos químicos que se le agregan al hormigón durante su fabricación. Refiriéndose solo a los siguientes tipos:

- Tipo A: Aditivos plastificantes.
- Tipo B: Aditivos retardadores.
- Tipo C: Aditivos aceleradores.
- Tipo D: Aditivos plastificantes y retardadores.
- Tipo E: Aditivos plastificantes y aceleradores.
- Tipo F: Aditivo superplastificante.
- Tipo G: Aditivos superplastificantes y retardadores.
- Tipo H: Aditivos incorporadores de aire.

2.3. Cenizas

2.3.1. Definición

Según la Real Academia Española las cenizas son un polvo de color gris claro que queda después de una combustión completa, y está formado, generalmente, por sales alcalinas y térreas, sílice y óxidos metálicos.

2.3.2. Tipos de cenizas

Se han estudiado diversos tipos de cenizas para utilizar como sustituyente del hormigón, debido a sus propiedades puzolánicas. Dentro de las cenizas estudiadas están las siguientes:

2.3.2.1. Cenizas volantes

➤ Origen

La ceniza proviene del residuo de procesos industriales que emplean carbón (antracita pulverizada u otros carbones bituminosos) como combustible, tales como centrales termoeléctricas, fábricas, y otras.

➤ Componentes

Los porcentajes en que se presentan los distintos componentes de las cenizas varían unas de otras. En general poseen los siguientes componentes, en mayor proporción: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO y carbón sin quemar; en menor proporción, generalmente menor del 5% en peso: MgO , SO_3 , Na_2O , K_2O y otros constituyentes en cantidades aún más reducidas, como compuestos de titanio, vanadio, manganeso, fosforo, germanio, galio, etc.

2.3.2.2. Cenizas volcánicas

➤ Origen

La ceniza se genera a partir de la roca cuarteada y separada en partículas diminutas durante un episodio de actividad volcánica explosiva. La ceniza volcánica es una composición de partículas de roca y mineral muy finas, de menos de 2 milímetros de diámetro, eyectadas por un viento volcánico.

➤ Componentes

Los porcentajes en que se presentan los distintos componentes de la ceniza varían unas de otras, siendo un factor importante el volcán del que fueron extraídas. En general poseen los siguientes componentes: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , TiO_2 y P_2O_5 .

2.3.2.3. Cenizas de bagazo de caña de azúcar

➤ Origen

Son producidas como residuo de la quema de bagazo de caña de azúcar en calderas generadoras de energía. El bagazo es obtenido del proceso de extracción de jugo de caña de azúcar.

➤ Componentes

Los principales componentes de estas cenizas son: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O y Na_2O . Los porcentajes en que se presentan estos componentes varían dependiendo del tipo de quema, aun así los componentes con mayor presencia son SiO_2 y Al_2O_3 .

2.3.3. Cenizas de madera

2.3.3.1. Origen

Las cenizas de madera son una mezcla heterogénea compleja de todos los minerales no inflamables, no volátiles que permanecen después de la madera y el carbón han quemado.

2.3.3.2. Composición química

Cabe destacar que los porcentajes en que se presentan los componentes varían de acuerdo al tipo de madera incinerada.

Las características químicas de la ceniza de madera, que gobiernan su credibilidad para ser utilizado como un sustituto para el cemento, tal como sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), óxido de hierro (Fe_2O_3) y la cal viva (CaO) difieren considerablemente de una especie de árboles a otra. La variación en las características químicas de la ceniza producida a partir de diferentes especies de árboles se da en la siguiente tabla:

TABLA 2.1: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CENIZA DE MADERA DE DIFERENTES ESPECIES.

grupo de biomasa	SiO_2	CaO	K_2O	P_2O_5	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	SO_3	Na_2O	TiO_2
corteza de perra	4.38	69.06	8.99	4.13	0.55	5.92	2.24	2.75	1.85	0.13
residuos forestales	20.65	47.55	10.23	5.05	2.99	7.2	1.42	2.91	1.6	0.4
corteza de pino	9.2	56.83	7.78	5.02	7.2	6.19	2.79	2.83	1.97	0.19
astillas de pino	68.18	7.89	4.51	1.56	7.04	2.43	5.45	1.19	1.2	0.55
Álamo	3.87	57.33	18.73	0.85	0.68	13.11	1.16	3.77	0.22	0.28
corteza de álamo	1.86	77.31	8.93	2.48	0.62	2.36	0.74	0.74	4.84	0.12
Serrín	26.17	44.11	10.83	2.27	4.53	5.34	1.82	2.05	2.48	0.4
corteza de abeto	6.13	72.39	7.22	2.69	0.68	4.97	1.9	1.88	2.02	0.12
Madera de abeto	49.3	17.2	9.6	1.9	9.4	1.1	8.3	2.6	0.5	0.1
residuos de madera	53.15	11.66	4.85	1.37	12.64	3.06	6.24	1.99	4.47	0.57

Fuente: SV Vassilev et al, 2010

2.3.3.3. Usos de la ceniza de madera

Actualmente la ceniza de madera se utiliza en aplicaciones agrícolas como un suplemento para mejorar la alcalinidad del suelo y como abono. En el área de la construcción se utiliza como relleno para la construcción de pavimentos flexibles para caminos y carreteras. Además estudios confirman la idoneidad de las cenizas de madera como material sustituyente del cemento para la fabricación de hormigones de grado estructural y hormigón autocompactante.

2.3.3.4. Utilización en el mundo

A nivel mundial aún se están estudiando las propiedades de las cenizas de madera como material de sustitución del cemento para hormigones. Se sabe que la composición química de las cenizas de madera varía de acuerdo a la especie de la cual se obtuvieron.

A continuación se presentan dos estudios acerca de la utilización de la ceniza de madera como sustituta parcial del cemento.

- Ceniza de madera de panadería como sustituto parcial del cemento en el hormigón (Wood Ash from Bread Bakery as Partial Replacement for Cement in Concrete)

En este trabajo se presentan los resultados de los experimentos que evalúan el uso de la ceniza de madera de panadería como la sustitución parcial del cemento Portland ordinario en el hormigón. Se determinó la composición química de la ceniza de madera, así como la capacidad de trabajo y resistencia a la compresión del hormigón. La ceniza de madera se utilizó para reemplazar 5% - 25% en peso del cemento en el hormigón. Hormigón sin ceniza de madera sirve como control. La relación de mezcla utilizado fue 1: 2: 4 con agua a aglutinante se mantiene a 0,5. La resistencia a compresión se determinó a la curación de las edades de 3, 7, 28, 56, 90 y 120 días. Los resultados mostraron que la ceniza de madera de panadería es una Clase F cenizas volantes ya que la suma de ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) es mayor que 70%. La resistencia a la compresión del hormigón ceniza de madera aumenta con el período de curado y disminuye con el aumento de contenido de cenizas de madera. Hubo una fuerte disminución de la resistencia a la compresión más allá del 10% de sustitución ceniza de madera. Se concluyó que un máximo de 10% de sustitución ceniza de madera es adecuada para su uso en hormigón estructural.

- Cenizas de madera como eficaz materia prima para bloques de hormigón (WOOD ASH AS AN EFFECTIVE RAW MATERIAL FOR CONCRETE BLOCKS)

La utilización de la ceniza de madera como sustitución parcial del cemento es uno de los métodos prometedores para aumentar la resistencia y aislamiento térmico de los bloques de cemento. El presente estudio utilizó la ceniza de madera como sustitución parcial del cemento, en la fabricación de bloques. En las mezclas de hormigón se ha sustituido un 10%, 15%, 20% y 25% de ceniza de madera por cemento, realizando ensayos de resistencia a compresión, absorción de agua y liberación de calor. La mayor resistencia a compresión se observó en las muestras de hormigón con sustitución de 15% de cenizas de madera. Sin embargo fueron las muestras que contenían un 15% de sustitución de ceniza de madera la que presentó una mayor absorción.

Por otro lado se observó que las muestra de hormigón con sustitución de 15% y 20% presentaron una lenta liberación de calor, después de 21 días de curado.

La adición de 15% de cenizas de madera para la fabricación de bloques se ha desarrollado y cumple los límites normales.

2.4. Microsílice

2.4.1. Definición

El Instituto Americano del Hormigón define a la microsíllice como “la sílice no cristalina muy fina, elaborada en hornos eléctricos como subproducto de la producción del silicio o de las aleaciones elementales que contienen el silicio”. Es generalmente un polvo gris, algo similar al cemento Portland o algunas cenizas volantes.

FIGURA 2.1: MICROSÍLICE.



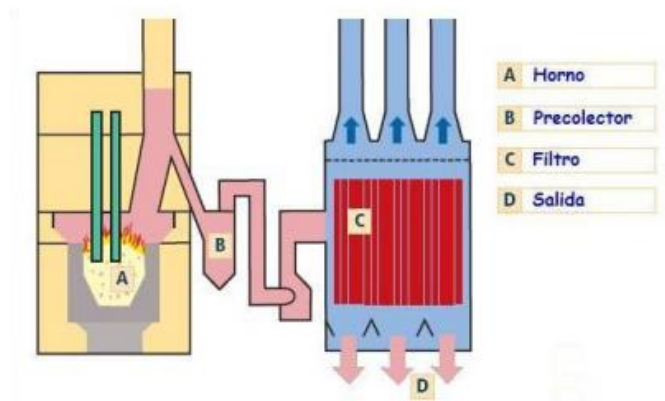
La microsíllice tiene un elevado poder puzolánico, e incrementa propiedades esenciales al hormigón. El uso de microsíllice puede tener dos razones: como sustituto de parte de cemento, en general por razones económicas, o como adición para mejorar propiedades tanto en estado fresco como endurecido.

La adición de microsíllice va en función al contenido de cemento del hormigón y generalmente varía entre el 5 y 10%.

2.4.2. Producción

El humo de sílice condensado es un subproducto de las industrias del silicio y del ferrosilicio, en donde se producen dichos metales en hornos eléctricos. A medida que se genera el metal fundido, se emite un gas con base de silicio. Este humo gaseoso, a medida que sube, se enfría rápidamente y forma partículas esféricas vítreas que son extremadamente pequeñas. El humo de sílice condensado, que se denomina microsíllice, es recogido por una bolsa interna, un sistema para filtrar el aire caliente y los gases expulsados por el horno.

FIGURA 2.2: ESQUEMA DE UNA FUNDICIÓN DE METAL DE SÍLICE O FERRO-SÍLICIO.



Fuente: Microsilica for superior concrete, Elkem, 2006.

2.4.3. Composición química

La microsílíce es un subproducto con composición química muy constante, aunque puede tener algunos cambios dependiendo de la aleación de silicio que se está produciendo y la naturaleza de las materias primas. En la composición química predomina el SiO_2 con el 90 al 93%.

La siguiente tabla da la composición química de microsílíce típicas provenientes de hornos de Noruega y los Estados Unidos. Los humos contienen generalmente más del 90% de dióxido de silicio, la mayoría del cual está en estado amorfo. La composición química de la microsílíce varía de acuerdo al tipo de aleación que está siendo producido. Por ejemplo, los humos de un horno de ferrosilíceo generalmente contienen más óxidos de hierro y magnesio que aquellos provenientes de un horno que produce silicio.

TABLA 2.2: RANGOS PARA LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MICROSÍLICES.

ÓXIDO	%
SiO_2	90.0 – 93.0
Al_2O_3	0.5 – 0.6
Fe_2O_3	3.4 – 4.5
MgO	0.3 – 0.5
CaO	0.5 – 0.8
Na_2O	0.1 – 0.3
K_2O	1.0 – 1.2
C	1.3 – 3.6
S	0.1 – 0.2
C + S	1.4 – 3.8
SO	0.4 – 1.3
H_2O	0.0 – 4.8

Fuente: P-C. AÍTCIN. “Tecnología del concreto de alto desempeño”. Pablo Portugal Barriga

2.4.4. Propiedades de la microsílíce

La microsílíce afecta tanto las propiedades del hormigón fresco como endurecido, estos efectos son los resultados obtenidos gracias a sus propiedades físicas y químicas. Las características físicas de la microsílíce son bastante diferentes a las de los componentes del hormigón corriente, pero su composición química es muy similar.

2.4.4.1. Propiedades químicas

A. Amorfa

Este término nos dice que la microsílíce no es un material cristalino. Un material cristalino no se disuelve reaccionando con el hormigón. La arena es un material cristalino siendo similar a la microsílíce porque es principalmente dióxido de silicio (SiO_2), pero no reacciona por su naturaleza cristalina.

B. Dióxido de silicio

Es el material reactivo en la microsílíce, siendo su composición química casi únicamente dióxido de silicio (SiO_2), que va aproximadamente desde un 90 a 93%.

C. Elementos adicionales

Puede haber elementos adicionales en la microsílíce dependiendo del metal que se haya fundido donde fueron recuperadas las partículas. Normalmente, estos materiales no tienen ningún impacto en el desempeño de la microsílíce.

2.4.4.2. Propiedades físicas

A. Color

La microsílíce varía de color gris claro a oscuro, dando una lechada de color negro. Debido a que el SiO_2 es incoloro, el color es determinado por los componentes no silicios, los cuales incluyen el carbón y óxido de hierro. En general al igual que en otros productos derivados de la calcinación por carbón, cuanto más alto es el contenido de carbón, más oscuro es el color.

B. Tamaño de las partículas.

La microsílíce es un material compuesto por partículas extremadamente finas, con diámetros promedios que son entre 0,1 a 0,2 μm (micrones), 100 veces más finos que los de las partículas de cemento.

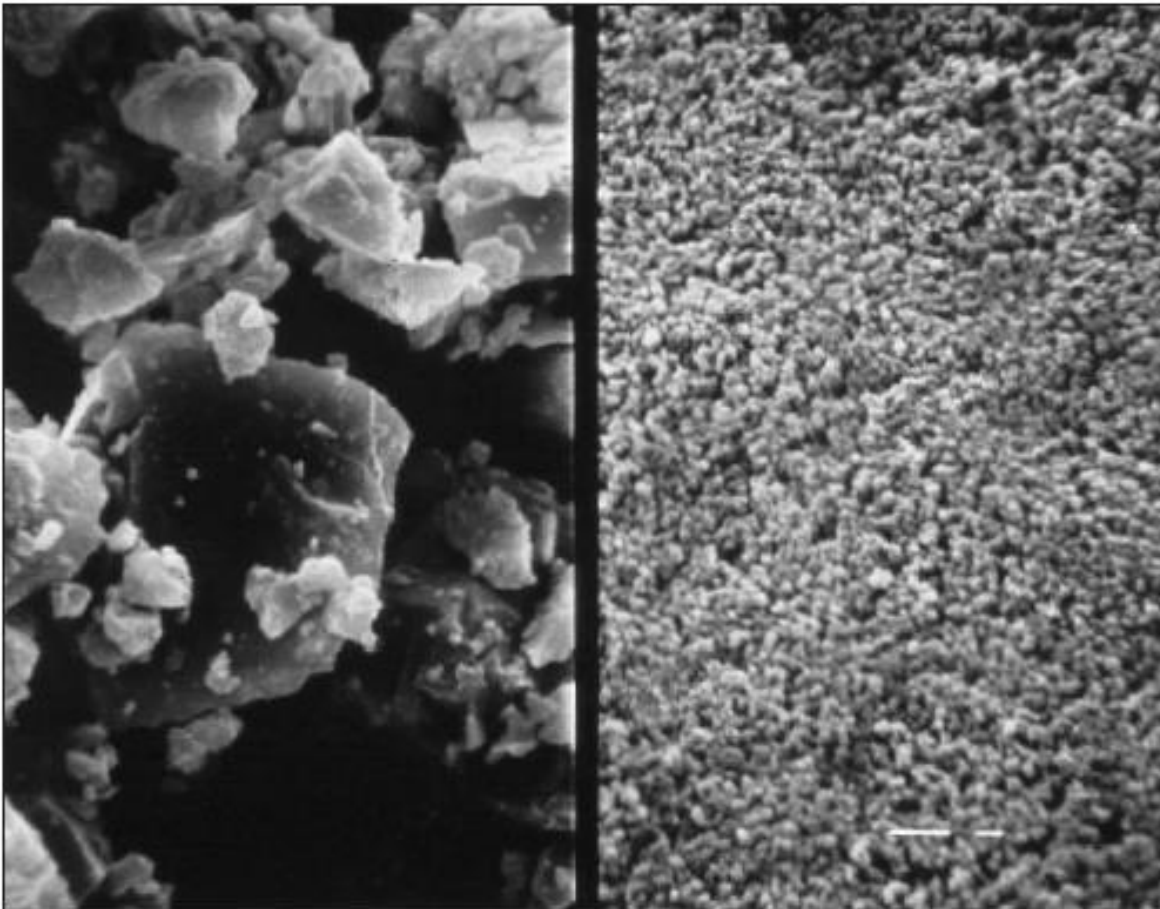
C. Densidad aparente

La densidad de la microsílíce es usualmente reportada como 300 kg/m³ sin embargo este valor puede variar según el productor, un alto contenido de carbón en la microsílíce será reflejada en una menor densidad.

D. Superficie específica

La superficie específica es el área total de la masa dada de un material aportada por la sumatoria de cada una de sus partículas. La microsílíce es un conjunto de partículas vítreas muy finas, de perfil esférico y diámetro muy pequeño, cuya superficie específica está en el orden de 200.000 cm² /gr. cuando es determinada empleando las técnicas de absorción de nitrógeno. La distribución por tamaños indica partículas con diámetro promedio de 0.1 micrómetros, el cual es aproximadamente 100 veces menor que el de las partículas de cemento promedio. Así, esta alta superficie específica y el gran contenido de dióxido de sílice amorfa proporcionan excepcionales propiedades puzolánicas.

FIGURA 2.3: MICRO FOTOGRAFÍA DE GRANOS DE CEMENTO PORTLAND (IZQUIERDA) Y PARTÍCULAS DE MICROSÍLICE (DERECHA), EN LA MISMA AMPLIACIÓN.



Fuente: Silica Fume Association, 2005, Silica Fume user's manual

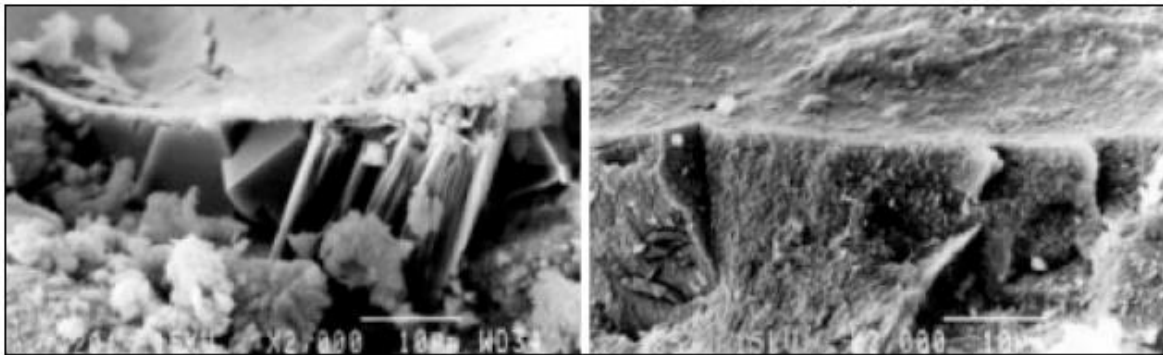
2.4.5. Reacción en el hormigón

2.4.5.1. Mejoras en el hormigón fresco

A. Aumento de la cohesión

El hormigón debido a la incorporación de microsílíce se vuelve mucho más cohesivo y por consiguiente es menos propenso a la segregación, gracias a la transformación del hidróxido de calcio a silicato de calcio hidratado similar al producido por el cemento al reaccionar con el agua.

FIGURA 2.4: COMPARACIÓN MICROSCÓPICA ENTRE HORMIGÓN SIN MICROSÍLICE (IZQUIERDA) Y HORMIGÓN CON MICROSÍLICE (DERECHA)



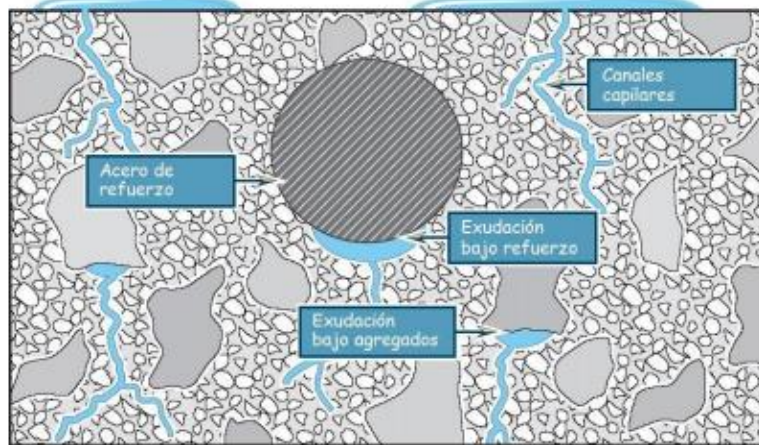
Fuente: Grace, 2006

B. Disminución de la exudación

Debido a la mayor área de la superficie y la usual baja de la utilización del contenido de agua en la mezcla, habrá una mínima o ninguna exudación. Con un porcentaje aproximado del 5% de microsílíce (en relación al cemento de la mezcla), no habrá exudación en la mayoría de los hormigones. El hormigón exuda cuando los componentes más pesados (cemento y agregados) por la influencia de la gravedad antes que se endurezca el hormigón se acomodan, el agua más ligera se fuerza hacia arriba, algunas de estas partículas de agua se atrapan bajo los agregados, otras en las armaduras y algunas salen a la superficie. Este movimiento del agua es llamado canales capilares y son mostrados en la figura.

La falta de exudación permite un proceso más eficaz además de mejorar la durabilidad, con armaduras más protegidas y un hormigón más homogéneo y compacto.

FIGURA 2.5: ESQUEMA DE EXUDACIÓN Y CANALES CAPILARES.



Fuente: Silica Fume Association, 2005, Silica Fume user's manual

C. Aumenta la trabajabilidad

La microsílíce disminuye la viscosidad y el hormigón fluye más fácilmente con un hormigón fresco estable y con menor tendencia a la segregación.

2.4.5.2. Mejoras en el hormigón endurecido

Principalmente son dos efectos obtenidos: aumento de las propiedades mecánicas como la resistencia y el módulo de elasticidad, y la reducción de la permeabilidad; que directamente mejora otras propiedades como la durabilidad, están se detallan a continuación.

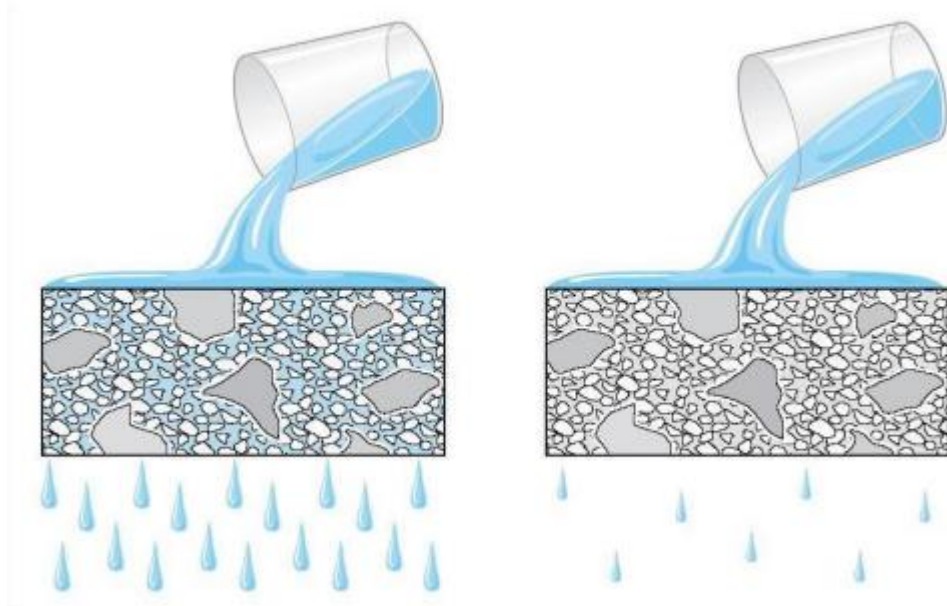
A. Propiedades mecánicas mejoradas

La microsílíce ganó inicialmente la atención en el mercado debido al gran aumento producido en la resistencia a la compresión del hormigón. También se ven las mejoras en otras propiedades mecánicas interrelacionadas como el aumento significativo del módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión. Aunque el hormigón ha sido especificado para aprovechar estas propiedades, la más importante es la "Resistencia a la compresión".

B. Reducción de la permeabilidad

En muchas situaciones, la durabilidad del hormigón está directamente relacionada con la permeabilidad, dependiendo de la exposición en la que se encuentra; como por ejemplo lecherías a ambiente marino. Con la adición de microsílíce se contribuye a la reducción de la permeabilidad en el hormigón. Un hormigón mucho más impermeable permanece por más tiempo sin daño ante los ataques químicos.

FIGURA 2.6: ESQUEMA DE LA PERMEABILIDAD EN EL HORMIGÓN. A LA IZQUIERDA UN HORMIGÓN NORMAL Y A LA DERECHA HORMIGÓN CON ADICIÓN DE MICROSÍLICE, MUCHO MENOS PERMEABLE



Fuente: Silica Fume Association, 2005, Silica Fume user's manual

2.5. Permeabilidad

2.5.1. Definición

La permeabilidad es la capacidad del hormigón para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Esta tiene lugar cuando un fluido líquido o gaseoso, atraviesan el material debido a la fuerza impulsora generada mediante un diferencial de presión hidráulica.

2.5.2. Factores que influyen en la permeabilidad

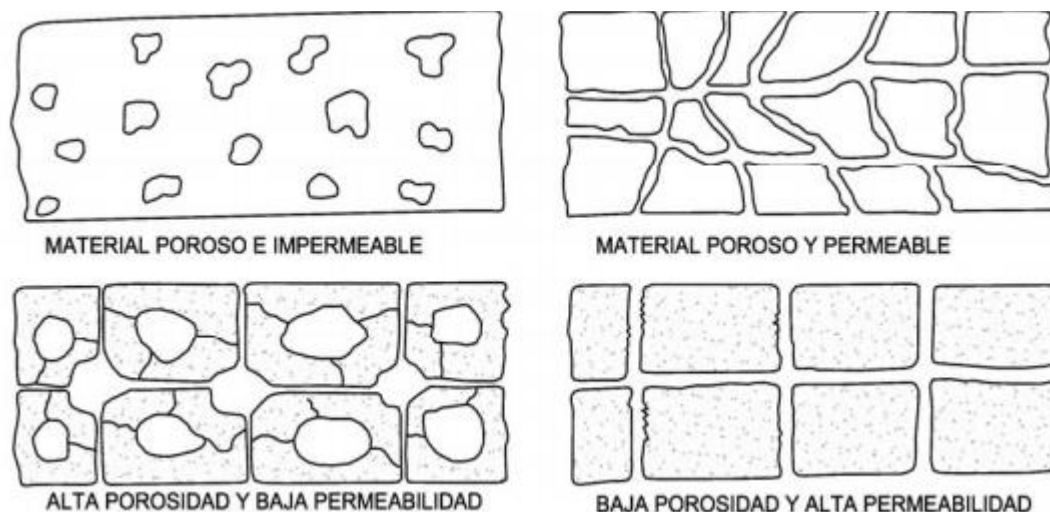
2.5.2.1. Porosidad

El transporte de agua desde el exterior al interior del hormigón se desarrolla en tres etapas:

- **Adsorción:** Proceso en el que las partículas se adhieren al hormigón por procesos físicos, resultado de las fuerzas de Van der Waals, y químicos mediante la formación de enlaces químicos.
- **Absorción:** Proceso en el que a partir de los huecos existentes en la superficie de hormigón, aparecen tensiones superficiales en las partículas, por las que estas tienden a rellenar los poros.
- **Difusión:** Proceso por el que las partículas fluyen a través de los poros del hormigón, bajo la acción de un gradiente de concentraciones.

La permeabilidad es producida cuando la estructura de los poros es permeable, lo cual puede no ocurrir, en el caso de que los poros se encuentren embebidos en una masa impermeable. De este modo, se pueden encontrar materiales cuyos valores de porosidad son muy altos y que son altamente impermeables, y viceversa.

FIGURA 2.7: POROSIDAD Y PERMEABILIDAD.



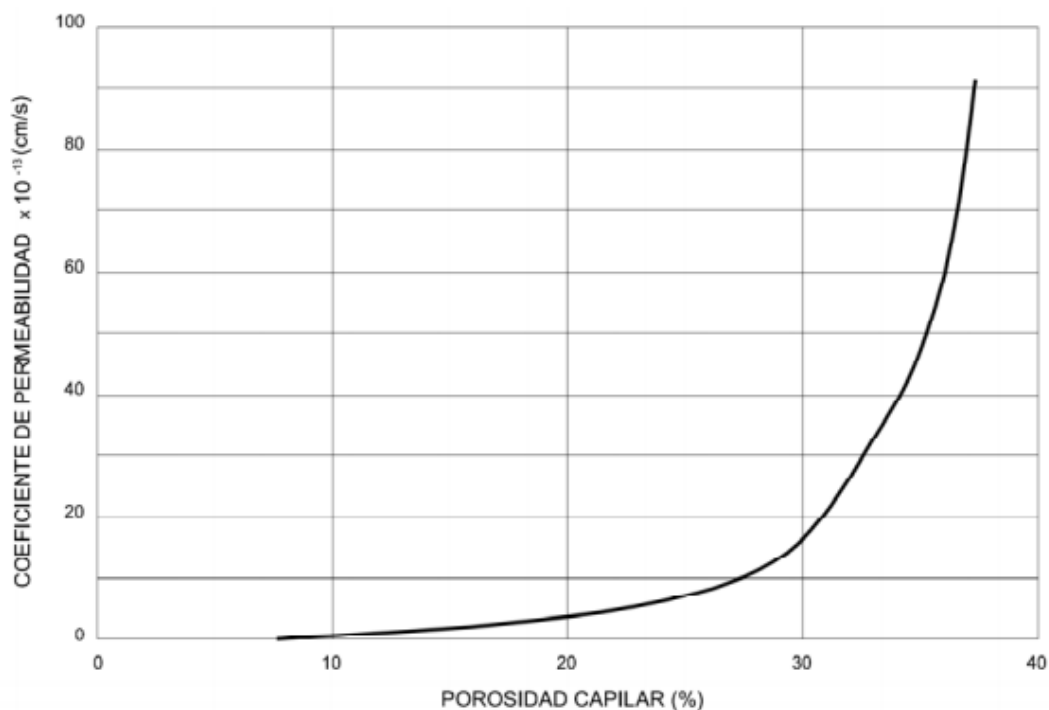
Fuente: Boletín 32, MOPU (1989)

La forma de transporte de las partículas dentro del hormigón depende del tipo y tamaño de los poros, de este modo para tamaños pequeños de poros o microporos, el transporte se realiza por difusión con la necesidad de existencia de un gradiente de presiones, mientras que en el caso de poros grandes o macroporos, este se realiza como flujo sin necesidad de presión.

La porosidad en el hormigón es la suma de los poros contenidos en la pasta de cemento y en los áridos. Generalmente, la cantidad de poros en el hormigón oscila entre 1% y 10% del volumen total. En relación a la distribución de los tipos de poros en la pasta de cemento, se dividen en poros de gel muy finos que constituyen aproximadamente el 18% del volumen de la pasta y los poros capilares más gruesos en una proporción de 0% a 40% en función de la relación agua/cemento y de la velocidad de hidratación.

Un estudio muestra la relación entre porosidad capilar y permeabilidad del hormigón, deduciendo un crecimiento exponencial de la permeabilidad en valores de porosidad superiores al 30%

FIGURA 2.8: RELACIÓN ENTRE POROSIDAD CAPILAR Y PERMEABILIDAD EN EL HORMIGÓN.



Fuente: Neville, A. 1999

La porosidad y la permeabilidad no están únicamente ligadas entre sí, si no que a su vez la estructura interna del hormigón la que en función de la disposición de los poros dentro del mismo, influye en su mayor o menor permeabilidad.

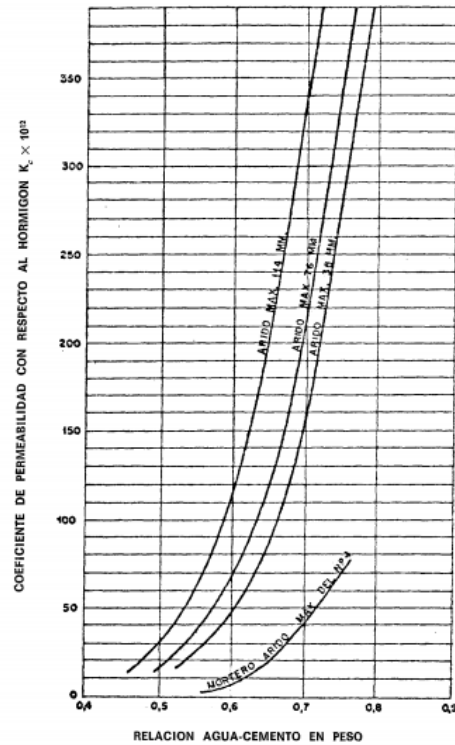
2.5.2.2. Relación agua/cemento

La relación agua/cemento (a/c) no solo afecta a la resistencia del hormigón, sino también a su permeabilidad. Pequeños cambios en la relación agua/cemento pueden representar apreciables cambios en su permeabilidad.

La relación agua/cemento se define como el peso de agua presente por unidad de peso de cemento, es decir, a menor relación agua/cemento mayor es la concentración del hormigón, lo que se traduce en una disminución de los huecos entre partículas existentes.

Inicialmente, el espacio entre los granos de cemento forma una red continua llena de agua, formada por los poros capilares. A medida que los granos de cemento se van hidratando, generan cristales que bloquean los poros, disminuyendo consecuentemente la permeabilidad. De este modo, cuanto mayor es el número de granos de cemento, es decir, la relación agua/cemento es menor, el bloqueo de los poros aumenta y por lo tanto la permeabilidad disminuye.

FIGURA 2.9: INFLUENCIA DE LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO SOBRE LA PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN.



Fuente: Impermeabilización del hormigón -Informes de la construcción, 1977

2.5.2.3. Curado

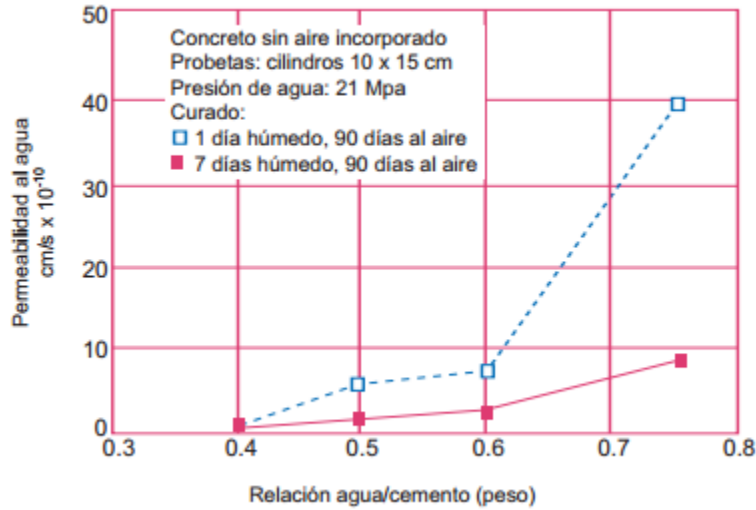
El término curado se utiliza para describir las acciones tomadas para permitir la hidratación del cemento, que consiste en prevenir la pérdida de humedad del hormigón, y en su caso, suministrar humedad adicional así como mantener una temperatura del hormigón favorable en sus primeras edades.

Con el fin de obtener un eficiente bloqueo de los poros capilares, los granos de cemento deben hidratarse. Para esto, es indispensable proceder al curado del hormigón, que permite controlar su humedad y temperatura, después de su vertido y compactación.

Dado que la hidratación solo se produce en un espacio casi saturado de agua, será necesario añadir agua de curado para mantener los poros capilares de la pasta. De esta manera el cemento continuara hidratándose hasta que todo el espacio disponible se haya llenado.

El curado no sólo influye en la resistencia final del concreto, sino que disminuye la permeabilidad. La permeabilidad al agua y la absorción capilar del concreto se ven reducidas de manera importante a medida que se prolonga el curado húmedo.

FIGURA 2.10: INFLUENCIA DEL CURADO EN LA PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN.



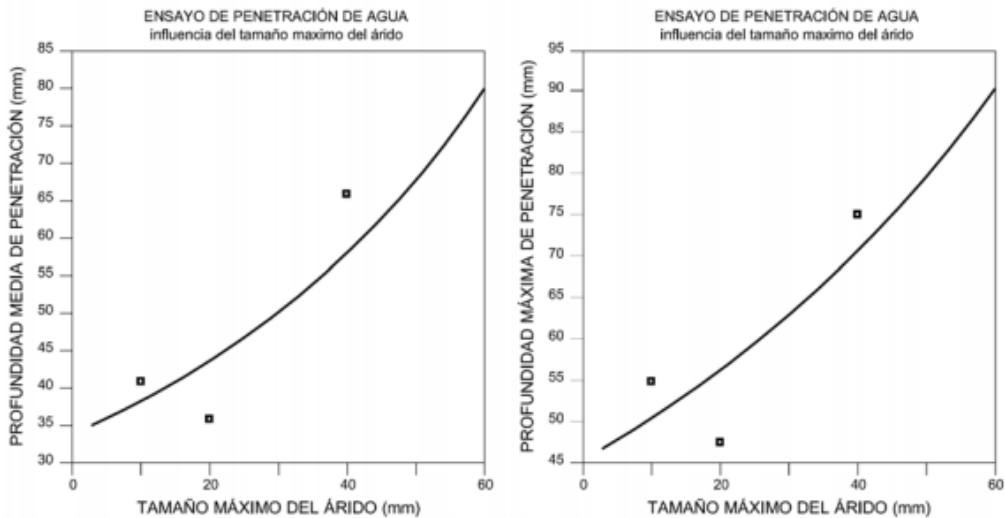
Fuente: Curado del concreto – Informaciones técnicas, SIKA.

2.5.2.4. Áridos

Si los áridos tienen una permeabilidad baja, su presencia reduce el área efectiva para la formación de flujo interior de partículas. Además puesto que la trayectoria de flujo tiene que bordear los áridos, el trayecto efectivo se hace considerablemente más largo, de tal manera que el efecto ejercido por el árido puede ser importante.

La permeabilidad se incrementa en la medida que aumenta el tamaño del árido, si bien este efecto es prácticamente insignificante para tamaños máximos del árido de hasta 20 mm.

FIGURA 2.11: INFLUENCIA DEL TAMAÑO MÁXIMO DEL ÁRIDO EN LA PERMEABILIDAD.



Fuente: Galigo y Rodríguez (1990)

Otro gran efecto en la permeabilidad motivado por los áridos, se debe a la naturaleza de los mismos. La naturaleza de los áridos determina el grado de micro fisuras en la interfase pasta-árido, lo cual se traduce en una de las principales causas que producen un aumento de la permeabilidad. La presencia de estas micro-fisuras facilita la entrada de partículas por la red capilar de poros en la pasta de cemento.

2.5.3. Impermeabilización

2.5.3.1. Definición

Tratamiento que se da al hormigón o mortero para retrasar la filtración del agua o vapor de agua, con la aplicación de un revestimiento impermeable o un aditivo adecuado. También llamada hidrofugación.

2.5.3.2. Tipos de impermeabilización

Los sistemas básicos a considerar en la disminución de la penetración del agua en los hormigones:

1) Empleando aditivos o tratamientos que mejoren la calidad de los mismos en dicho aspecto, intentando conseguir las condiciones óptimas para su impermeabilidad.

2) Mediante la utilización de productos o sistemas que eviten la penetración del agua en el interior de la masa del hormigón, sin alterar o mejorando las condiciones fundamentales de los mismos (durabilidad, resistencia, etc.).

En base a la procedencia y efectos de la penetración de agua en los hormigones, se puede hacer una clasificación de los sistemas de impermeabilización:

1. Impermeabilizantes de masa

Son para hormigones sometidos a presión o contacto permanente con el agua.

Dentro de este grupo cabe distinguir:

- Los productos aditivos que, al mejorar las cualidades de los hormigones, afectan, indirectamente, a su impermeabilidad o higroscopicidad.
- Los productos de adición a la masa del hormigón o a sus capas superficiales de protección (bien en la misma masa o bien en revoques de mortero) cuya función es evitar la penetración de agua en aquélla.

2. Impermeabilizantes hidrófugos de superficie

Son para acciones externas, accidentales, atmosféricas, con poca presión de agua.

Dentro de este grupo podemos distinguir:

- Productos de adición a la masa de mortero de los revoques de protección de las superficies de la obra.

- Productos aplicados directamente sobre la superficie a impermeabilizar. Se trata de pinturas o impregnaciones de protección de las superficies de las obras, en general, y de los morteros y hormigones, en particular contra la penetración del agua, sin presión.

3. Impermeabilizantes de junta

Son para rellenos de grietas, fisuras, juntas, obturación de fugas de agua, y para fabricación de barras de contracción o dilatación.

Dentro de este grupo se incluyen aquellas masillas o productos taponantes, cuya misión es la de cerrar el paso franco del agua al interior de la masa del hormigón, a través de los correspondientes pasos o conductos. Dos tipos principales podemos detallar:

- Los que tienen por finalidad la obturación de fugas accidentales de agua, en obras en explotación.
- Aquellos complementarios a las obras de hormigón, para cerrar el paso del agua a través de las juntas de contracción, o las grietas y fisuras que los procesos de hormigonado pudieran haber acarreado.

4. Impermeabilizaciones estancas

Son a base de láminas y revestimientos continuos.

Se trata de elementos que, aplicados en la superficie exterior del hormigón, en contacto con agua a presión, consiguen una impermeabilización estanca.

2.5.3.3. Aditivos para impermeabilizar

A. Aditivos que modifican las propiedades del hormigón fresco

Plastificantes.

- Cohesionantes: materiales inertes en polvo, como cenizas volantes, bentonitas, etcétera, empleados para aumentar la proporción de finos en el hormigón y mejorar su trabajabilidad.

El incremento de la cohesión de la masa de mortero por la formación de un entramado químico, minimizando el riesgo de exudación y disgregación de la masa, sobretodo en hormigones de elevada fluidez y con deficiencia de finos.

- Fluidificantes: actúan por un mecanismo fisicomecánico de adsorción, con una reducción de la relación A/C," aumento de la resistencia de los hormigones, etc.

Mejoran, en general, las cualidades del hormigón, con aumento de las resistencias mecánicas en cualquier edad, debido a la acción beneficiosa sobre la cristalización del cemento durante el fraguado, con mejor aprovechamiento del cemento y reducción de la relación A/C.

Aumentan la cohesión del hormigón fresco, dificultando la segregación prematura del agua y el lavado, del hormigón recién colocado, por el agua. La incorporación de aire es nula o muy limitada aun en el caso de sobredosificación. En consecuencia, producen una disminución de la higroscopicidad y la impermeabilidad de los hormigones.

Aireantes-plastificantes.

Por una parte, actúan como fluidificantes -aumentando la docilidad y la trabajabilidad-, y por otra, como aireantes -introduciendo un cierto porcentaje de aire en el hormigón-.

Permiten reducir la relación A/C y conseguir mejoras en las resistencias mecánicas. Al introducir aire en una proporción del 2 al 3 %, mejoran la higroscopicidad y permeabilidad y la capacidad de duración de los hormigones (resistencia al hielo y deshielo, a las aguas agresivas, etc.).

B. Aditivos que evitan la penetración de agua en el hormigón endurecido

Hidrófugos.

Son productos que, colmatando los capilares de la parte de cemento hidratada, modificando el potencial eléctrico de las construcciones, etc., reducen la absorción y la permeabilidad e higroscopicidad bajo presión o en contacto con el agua o humedades. Indirectamente, la mayoría de estos productos, mejoran la docilidad y trabajabilidad de la masa de hormigón —plastifican la misma— y, en consecuencia, mejoran la compacidad y otras cualidades del hormigón fresco o endurecido.

Actuando estos productos exclusivamente sobre la masa del hormigón, bien ejecutado —para mejorar las condiciones de impermeabilización de la misma—, se parte de suponer que estará exenta de grietas, fisuras, juntas, etc., por donde pudiera penetrar el agua, o bien que se efectuará el tratamiento o cierre adecuado.

2.5.4. Ensayos para determinar la permeabilidad

2.5.4.1. Método de absorción

Para determinar la absorción en laboratorio, el método de ensayo consiste en sumergir totalmente una probeta de hormigón en agua, durante 24 horas, cumpliendo ese plazo la probeta se retira del agua y se seca superficialmente con un paño e, inmediatamente, se determina su peso con aproximación a 1 gramo. Posteriormente, la probeta se coloca en un horno a 110 grados °C para secarla hasta peso constante, lo que se consigue aproximadamente a las 24 horas. Una vez seca la probeta, se procede a determinar su peso aproximado a 1 gramo. La diferencia entre los pesos saturados y secos al horno se toma como la absorción, expresándose normalmente en porcentaje referido al peso seco.

2.5.4.2. Profundidad de penetración de agua bajo presión

Es un ensayo para hormigón endurecido, normado por NCH 2262 Of 2009. Para ensayar las probetas se aplica agua a la superficie de la probeta de hormigón a ensayar y se somete a presión de $0,5 \text{ [MPa]} \pm 0,05 \text{ [MPa]}$, durante $72 \text{ [hrs]} \pm 2 \text{ [hrs]}$; terminado este proceso se someten a rotura por hendimiento.

Se debe medir la máxima profundidad de penetración de agua en cada una de las probetas (mm). Por último la impermeabilización se expresa como el promedio de las máximas profundidades de penetración de agua medida en las 3 probetas.

FIGURA 2.12: EQUIPO PARA ENSAYO DE PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN.

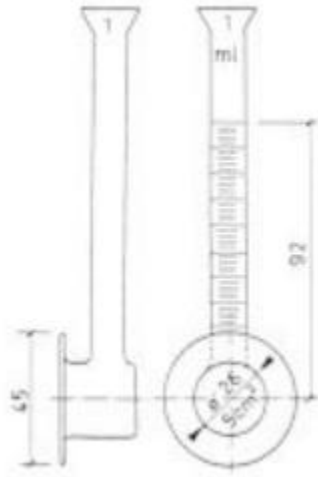


2.5.4.3. Método de Karsten

Es utilizado como control de infiltración de aguas en muros, su aplicación puede ser tanto en laboratorio como en la obra.

Consiste en un tubo graduado de vidrio transparente que posee una base circular de 2,5 cm de diámetro, de acuerdo a lo indicado en la figura.

FIGURA 2.13: PIPETA KARSTEN.



El tubo está calibrado en ml, de modo que 1 ml corresponde a 1 cm de altura de columna de agua. La base circular del tubo Karsten se fija a la superficie del hormigón a evaluar por medio de una masilla plástica. Una vez instalado, se vierte agua en él empleando, por ejemplo, una pipeta, hasta alcanzar el nivel deseado. Según sea la altura de la columna de agua existente dentro del tubo, se ejercerá sobre la superficie del substrato una presión que equivale al efecto de una lluvia acompañada de vientos.

La cantidad de agua absorbida por unidad de tiempo por parte de un hormigón poroso se mide directamente, efectuando la lectura en la escala que posee el tubo Karsten. Si la absorción es alta, se recomienda rellenar el tubo una vez que la columna de agua ha descendido 1 cm, con el fin de mantener una presión más o menos constante.

2.6. Asentamiento

2.6.1. Definición

El asentamiento es la medida que da la facilidad de trabajo o consistencia del hormigón. En otras palabras, mide la facilidad del hormigón para empujar, moldear y alisar. En consecuencia, la calificación de asentamiento indica qué aplicación de hormigón es buena para la construcción. Cuanto mayor sea el asentamiento, lo más viable es el hormigón. Si el asentamiento del hormigón es demasiado bajo, no se formará con mucha facilidad. Si es demasiado alto, se corre el riesgo de tener la grava, arena y cemento asentados fuera de la mezcla, por lo que es inutilizable.

2.6.2. Consistencia y asentamiento del hormigón

La consistencia es la mayor o menor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse y consiguientemente para ocupar todos los huecos del molde o encofrado. Influyen en ella distintos factores, especialmente la cantidad de agua de amasado, pero también el tamaño máximo del árido, la forma de los áridos y su granulometría. La consistencia se fija antes de la puesta en obra, analizando cual es la más adecuada para la colocación según los medios que se dispone de compactación. Los hormigones se clasifican por su consistencia en secos, plásticos, blandos y fluidos tal como se indica en la tabla siguiente:

Tabla 2.3: Límites de asentamiento según consistencia del hormigón fresco.

CONSISTENCIA	ASENTAMIENTO CONO (cm)	EQUIPOS
SECA	< 2	MECANICOS DE ALTA POTENCIA
PLÁSTICA	3 – 5	MECANICOS CORRIENTES, ESPECIALES O SUS COMBINACIONES
BLANDA	6 – 9	MANUALES, MECANICOS CORRIENTES, ESPECIALES O SUS COMBINACIONES
FLUIDA	> 10	MANUALES O ESPECIALES

Fuente: NCH 170 Of 85 - INN

2.6.3. Ensayos para determinar el asentamiento

A. Método del asentamiento del cono de Abrams

Este método está normado por NCH 1019. Este método no es aplicable al hormigón fresco cuyo asentamiento es inferior a 2 cm o mayor a 18 cm.

Primero se toma la muestra de hormigón no inferior a 30 litros y se prepara el equipo a utilizar, estos se deben humedecer previamente con agua para evitar que le resten humedad al hormigón. Luego se coloca el molde sobre la placa de apoyo horizontal y el operador se para sobre las pisaderas evitando el movimiento del molde durante el llenado. El molde se llena en tres capas del mismo volumen, apisonadas con 25 golpes distribuidos uniformemente. Terminada la compactación de la capa superior, se enrasa la superficie y se limpia el hormigón derramado alrededor del molde. Por último se quita el molde y se mide el asentamiento, colocando horizontalmente el pisón sobre el molde invertido, de modo que se extienda sobre el hormigón asentado. Se mide la distancia entre la barra y el centro de la cara superficial del hormigón, aproximando a 0,5 cm. Esta distancia es el asentamiento.

FIGURA 2.14: PROCEDIMIENTO CONO DE ABRAMS.



2.7. Resistencia a compresión

2.7.1. Definición

La resistencia a compresión es la característica mecánica principal del hormigón. Se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm², MPa y con alguna frecuencia en libras por pulgada cuadrada (psi) a una edad de 28 días.

2.7.2. Ensayos para determinar la resistencia a compresión

EL ensayo de compresión de probetas cubicas y cilíndricas está normado por NCH 1037.

Se debe poner la probeta con la cara de llenado en un plano vertical frente al operador. En el caso de probetas cubicas se debe medir los anchos de las cuatro caras laterales de la probeta en el eje horizontal, en el centro de cada cara; además se debe medir las alturas de las cuatro caras laterales en el eje vertical, en el centro de cada cara. Para probetas cilíndricas se debe medir dos diámetros perpendiculares entre sí; además medir la altura de la probeta en dos generatrices opuestas.

Se debe determinar la masa de la probeta en kilogramos (Kg). Luego colocar la probeta en la placa inferior de la prensa, si es probeta cubica se debe poner la cara de llenado en contacto con la placa inferior, en el caso de probeta cilíndrica se coloca una de las dos caras, refrentada, en contacto con la placa inferior.

Por último, se aplica una carga en forma continua y sin golpes, a una velocidad de 0,25 MPa/s \pm 0,05 MPa/s, hasta alcanzar la rotura de la probeta. Se debe registrar la carga máxima de cada una de las probetas.

FIGURA 2.15: ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN.



2.8. Densidad aparente en hormigón endurecido

2.8.1. Definición

Es el cociente entre la masa de la materia seca de un cuerpo y su volumen aparente, expresado en gramos por centímetros cúbicos o en kilogramos por metro cubico.

Considera el volumen real de la mezcla más su volumen total de aire (arrastrado y/o incorporado). Este volumen corresponde al de la medida que lo contiene

2.8.2. Ensayo para determinar la densidad aparente en hormigón endurecido.

Este ensayo esta normado por NCH 1037.

Primero se debe calcular el volumen de la probeta, el cual corresponde al área de la sección por la altura de la probeta.

La probeta debe ser pesada inmediatamente antes del ensayo de resistencia a compresión. El resultado debe ser expresado en kilogramos por metro cubico (Kg/m³)

CAPITULO III: METODOLOGIA DE TRABAJO

3.1. Programa experimental

Para determinar la influencia en la permeabilidad del hormigón al remplazar cemento por una combinación de ceniza de madera de aramo y microsílíce, se realizó un programa experimental, el cual permite estudiar la influencia de esta incorporación combinada en la permeabilidad y resistencias mecánicas del hormigón, siendo estas comparadas con los tres hormigones patrones, correspondiente a uno sin sustitución, uno con sustitución solo de cenizas de madera y por último uno con sustitución solo de microsílíce.

Se confeccionará el hormigón patrón sin sustituciones, una vez obtenida su dosificación, luego se dosificarán los otros hormigones patrones y los hormigones con sustitución. Estas sustituciones serán directas, es decir, kilos de cemento por kilos de sustitución.

Cabe destacar que las sustituciones solo modifican la cantidad de cemento en la dosificación del hormigón, manteniendo constante la relación agua/cemento y la proporción de los áridos que entregue la respectiva banda granulométrica de árido combinado.

3.2. Diseño de la experiencia.

Para evaluar la influencia de las sustituciones antes mencionadas y lograr la reducción de la permeabilidad del hormigón, se diseñó la experiencia considerando lo siguiente:

➤ **Probetas**

Las probetas a utilizar para ensayos de resistencia a compresión, serán confeccionadas a partir de las normas chilenas NCH 1017 Of 2009 y NCH 1037 Of 2009, estas serán realizadas con moldes cúbicos de 150 mm de arista.

Se ocupará el mismo tipo de probeta para los ensayos de permeabilidad, densidad aparente del hormigón endurecido.

Para el ensayo de absorción se utilizarán probetas de 150 mm de altura y 75 mm de diámetro.

Se realizarán un total de 54 probetas, 18 probetas estarán destinadas a ensayos de permeabilidad a los 28 días, 18 probetas a ensayos de resistencia a compresión a los 28 días y 18 probetas a ensayos de porosidad.

➤ **Hormigones patrones**

- Hormigón patrón sin sustitución: Es aquel hormigón sin ningún tipo de sustitución. Se realizará primero su dosificación para mantener constante los parámetros de diseño, cantidad de agua y relación agua/cemento, para solo variar la cantidad de cemento a remplazar.
- Hormigón patrón con inclusión del 20% de cenizas de madera: Este hormigón se diseñará a partir del hormigón patrón sin sustitución. Se incluirá un 20% del peso del cemento por cenizas de madera de aramo.
- Hormigón patrón con inclusión del 4% de microsílíce: Este hormigón se diseñará a partir del hormigón patrón sin sustitución. Se incluirá un 4% del peso del cemento por microsílíce.

➤ **Hormigón con sustituciones**

Se realizarán tres tipos de hormigones con sustitución de cemento por puzolanas artificiales, los cuales se diseñarán a partir del hormigón patrón sin sustitución. Estos hormigones tendrán sustitución de 10% de ceniza de madera, 20% de ceniza de madera y 30% de cenizas de madera; incluirán un 4% de microsílíce cada uno.

➤ **Resistencia**

El hormigón patrón tendrá una resistencia a la compresión de 35 MPa o 350 Kg/cm², con respecto a su resistencia a compresión.

➤ **Medición de la permeabilidad**

La medición de la permeabilidad del hormigón se realizará a través del ensayo de penetración de agua bajo presión, normado NCH 2262 Of 97. El equipo a utilizar será el ubicado en el laboratorio de hormigón de la Universidad de Valparaíso.

3.3. Selección y caracterización de los materiales.

Cada material a utilizar se debe conocer suficientemente, por lo que deberán ser caracterizados, para así diseñar los hormigones a utilizar.

Para la realización de la experiencia se han seleccionado los siguientes materiales:

3.3.1. Cemento

Se utilizará cemento Melón Portland Puzolánico, grado corriente, según norma chilena NCh148 Of 68, en su composición el contenido de puzolana no debe ser superior a un 30% del peso del producto terminado.

3.3.2. Agua

Se utilizará agua potable de la red de abastecimiento. Según la norma chilena NCH 1498 Of 82 el agua potable puede emplearse como agua de amasado, siempre que no se contamine antes de utilizarla.

3.3.3. Cenizas de madera aroma

Se utilizarán cenizas de madera de aroma, provenientes de la combustión de madera utilizada en un horno de panadería.

3.3.4. Microsílice

Se utilizará microsílice TamCem SF, subproducto de la producción de silicio, debe cumplir con la norma ASTM C-1240.

3.3.5. Aditivo hiperplastificante

El aditivo a utilizar es TamCem 67C, el aditivo será incorporado para la reducción de agua.

3.3.6. Áridos

Los áridos utilizados en la investigación proceden desde la empresa “Transportes Alegre”. Según la norma chilena NCH 163 Of. 2013 los áridos son partículas duras, de forma y tamaño estable y deben estar libres de impurezas.

Los áridos se clasifican según su tamaño en grava cuyas partículas tienen tamaños comprendidos entre 20 y 40 mm, en gravilla cuyas partículas tienen tamaños comprendidos entre 5 y 20 mm y arenas, cuyas partículas tienen tamaños comprendidos entre 0,16 y 5 mm.

3.4. Granulometría

La granulometría es uno de los ensayos más importantes que se realizan a los áridos, con este ensayo se conoce la distribución de tamaños de los áridos y se determina la proporción de cada uno de ellos para fabricar los hormigones.

Para realizar el ensayo en el laboratorio, se procede a mezclar las proporciones extraídas hasta homogeneizar, luego se debe reducir el tamaño de las muestras, extendiendo el material hasta formar una “torta” de espesor uniforme, esta se divide en cuatro partes, se separan dos partes opuestas de la mezcla y se repite el proceso hasta obtener la cantidad requerida. Es la NCH 165 Of 79 la que indica el tamaño de la muestra según el tamaño máximo del árido. Las muestras deben ser colocadas en recipientes para evitar toda contaminación.

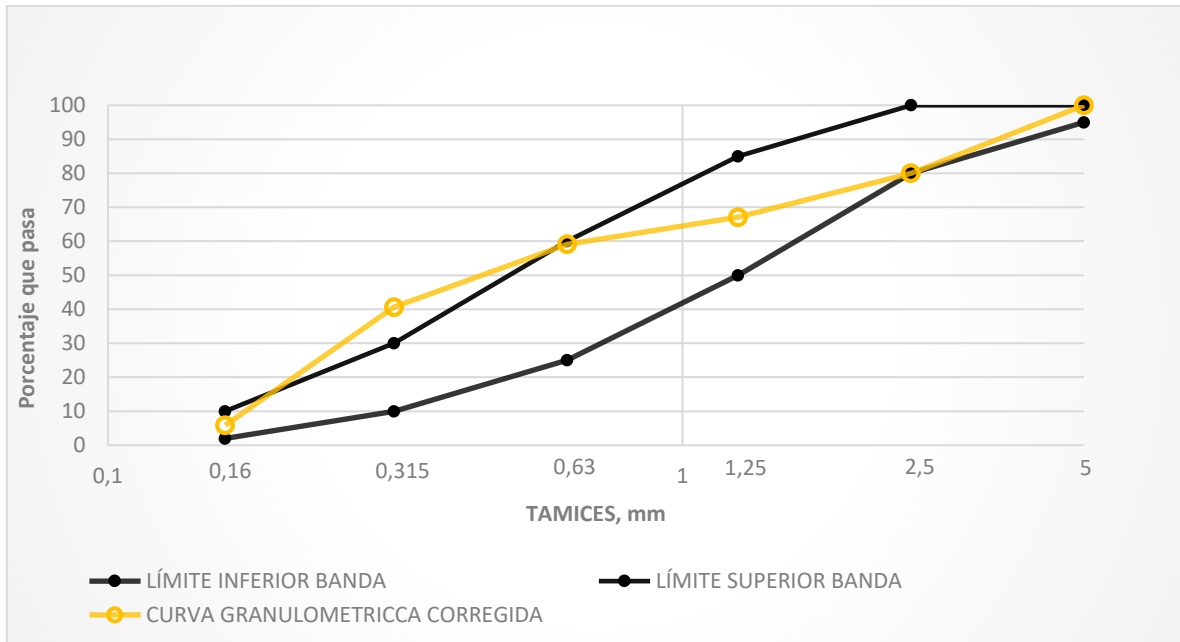
3.4.1. Arena

La granulometría de la arena se realizó siguiendo las recomendaciones de la norma NCH 165 Of 79. Para el cálculo del módulo de finura se consideró la recomendación de la NCH 165 Of 79. Se efectuaron tres ensayos granulométricos, de los cuales se obtuvo un promedio, resultados que se presentan en la siguiente tabla.

TABLA 3.4. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO PROMEDIO DE LA ARENA

TAMIZ		%	%	BANDA GRANULOMETRICA NCH163OF79	
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 79	QUE PASA	QUE PASA CORREGIDO	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
3/8	10	100		100	100
4	5	83	100	95	100
8	2,5	66	80	80	100
16	1,25	56	67	50	85
30	0,63	49	59	25	60
50	0,315	34	41	10	30
100	0,16	5	6	2	10
BAJO 100		0			
MÓDULO DE FINURA		3,07	2,47		

Fuente: Elaboración propia (2016)

GRÁFICO 3.1: GRANULOMETRÍA PROMEDIO DE LA ARENA.

Fuente: Elaboración propia (2016)

3.4.2. Gravilla

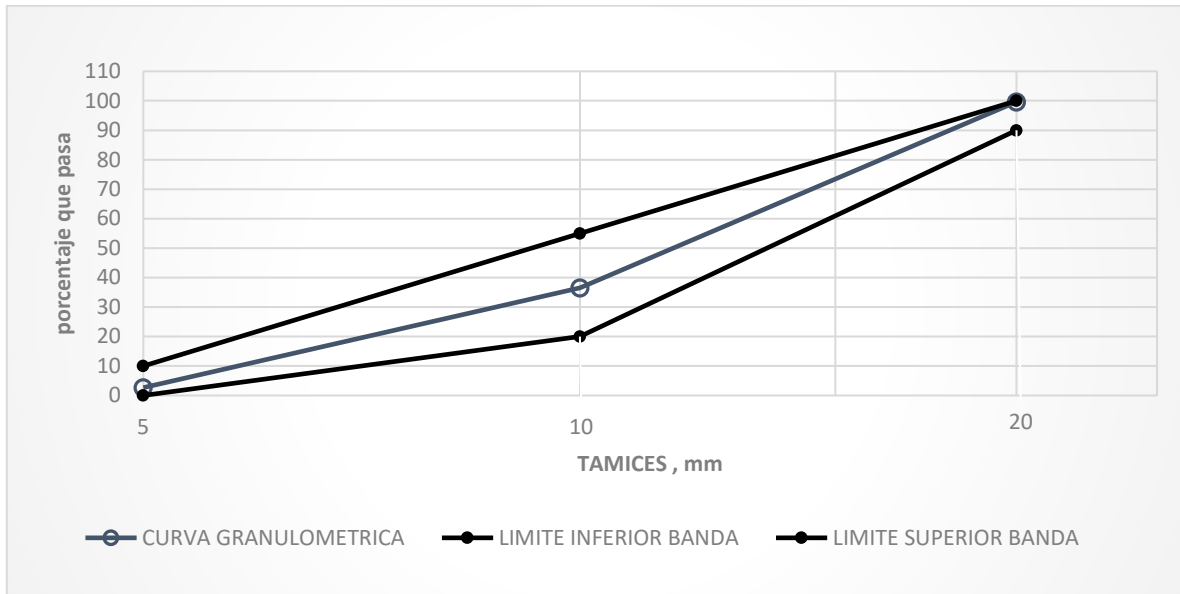
Debido al tamaño del árido grueso adquirido, este se analizó en una sola parte, siendo tamaño máximo nominal 20 mm, correspondiente a gravilla. Según la recomendación de la NCH 163 Of 79, la banda utilizada fue 19 – 4,75. Para el cálculo del módulo de finura se consideró la recomendación de la NCH 165 Of 79. Se efectuaron tres ensayos, de los cuales se obtuvo un promedio que se presenta en la siguiente tabla.

TABLA 3.5. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO PROMEDIO DE LA GRAVILLA.

TAMIZ		%	BANDA GRANULOMÉTRICA - NCH163 Of 79	
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 Of 79		LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
1"	25	100	100	100
3/4"	20	100	90	100
3/8"	10	37	20	55
4"	5	3	0	10
BAJO 4		0	0	5
MÓDULO DE FINURA		6,6		

Fuente: Elaboración propia (2016)

GRÁFICO 3.2. GRANULOMETRÍA PROMEDIO DE LA GRAVILLA.



Fuente: Elaboración propia (2016)

3.4.3. Combinación árido grueso y árido fino

Las bandas de combinación de árido grueso y árido fino fueron consideradas según la norma NCH 163 Of 79, y para el cálculo del módulo de finura se consideró la recomendación de la NCH 165 Of 79.

Para combinar el árido se elige el tamiz de abertura 5 mm y se le impone que pase un 42% del árido.

Considerando lo anterior, se tiene:

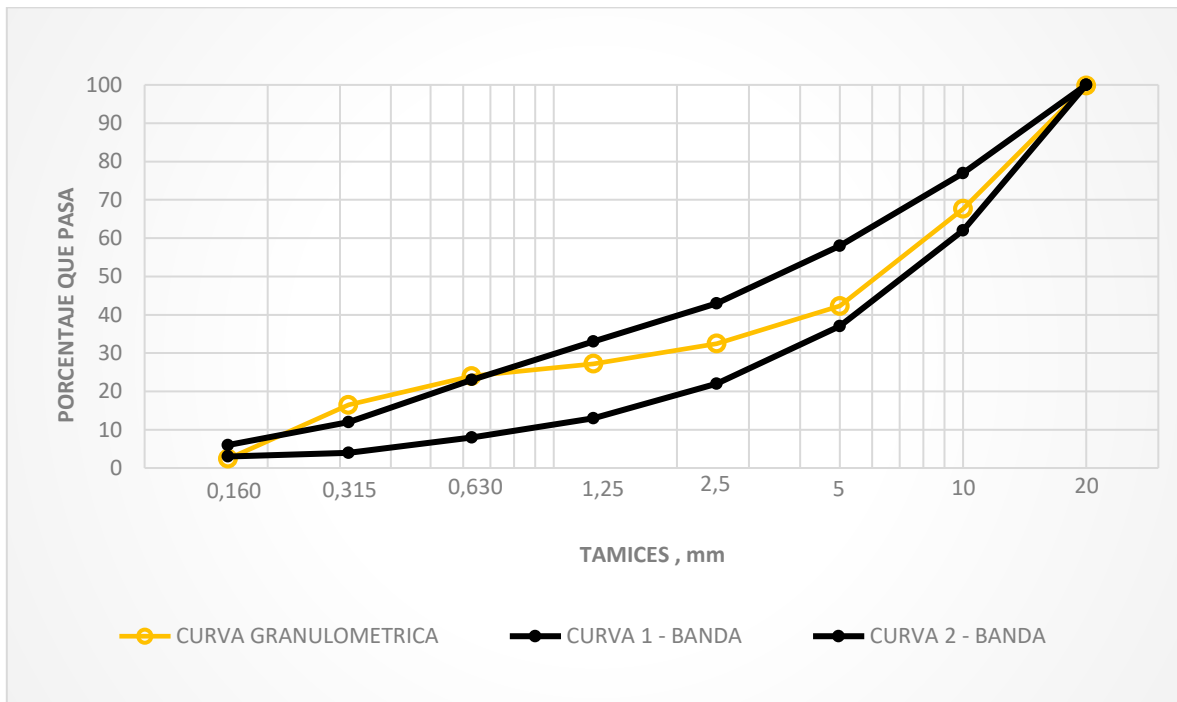
$$\begin{aligned}
 3G + 83A &= 42(G + A) \\
 0 &= 39G - 41A \\
 G &= \frac{41}{39 + 41} \\
 G &= 0,51 \\
 A &= 0,49
 \end{aligned}$$

TABLA 3.6. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO COMBINACIÓN ÁRIDO GRUESO/ÁRIDO FINO.

TAMIZ		% QUE PASA		51%	49%	% QUE PASA	% QUE PASA ACUM. Dmax 20 mm (NCH163 OF 79)	
ASTM	TAMIZ (mm) - NCH163 OF 79	GRAVILLA	ARENA	ÁRIDO GRUESO (AG)	ÁRIDO FINO (AF)	(AG + AF)	CURVA 1	CURVA 2
3/4	20	100	100	51	49	100	100	100
3/8	10	37	100	19	49	68	62	77
4	5	3	83	2	41	43	37	58
8	2,5		66	0	32	32	22	43
16	1,25		56		27	27	13	33
30	0,630		49		24	24	8	23
50	0,315		34		17	17	4	12
100	0,160		5		2	2	3	6
MÓDULO DE FINURA						4,87		

Fuente: Elaboración propia (2016)

GRÁFICO 3.3. GRANULOMETRÍA ÁRIDO COMBINADO.



Fuente: Elaboración propia (2016)

3.5. Características de los áridos

Para obtener las densidades y absorción de los áridos se realizaron los ensayos recomendados por las normas. Los resultados se expresan en la siguiente tabla:

TABLA 7: CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRIDOS.

CARACTERISTICA	ARENA	NORMA	GRAVILLA	NORMA
ρ NETA (Kg/m ³)	2682	NCH 1239 Of 77	2732	NCH 1117 Of 2010
ρ REAL SECA (Kg/m ³)	2606	NCH 1239 Of 77	2639	NCH 1117 Of 2010
ρ REAL SSS (Kg/m ³)	2634	NCH 1239 Of 77	2673	NCH 1117 Of 2010
ρ Ap. SUELTA (Kg/m ³)	1762	NCH 1116 Of 2008	1582	NCH 1116 Of 2008
ρ . Ap. COMPACTADA (Kg/m ³)	1892	NCH 1116 Of 2008	1634	NCH 1116 Of 2008
% ABSORCIÓN	1,1	NCH 1239 Of 77	1,3	NCH 1117 Of 2010

Fuente: Elaboración propia (2016)

3.6. Tamaño máximo de la ceniza.

Para conocer el tamaño máximo de la ceniza de madera, se consideraron los tamices de granulometría de la arena.

Se obtuvo que el tamiz de N° 16 (ASTM), abertura 1,25 mm, fue el primer tamiz en retener ceniza, por lo que este se considera como el tamaño máximo de la ceniza.

FIGURA 3.16: TAMAÑO MÁXIMO CENIZA



Fuente: Elaboración propia (2016)

3.7. Dosificaciones

3.7.1. Dosificación del hormigón patrón.

El hormigón patrón a dosificar corresponde al hormigón sin sustitución, con el cual se obtendrán las dosificaciones de los otros hormigones. La dosificación se realizará en base a resistencias.

3.7.1.1. Resistencia (f_c):

El hormigón patrón tendrá una resistencia mínima especificada de 35 [MPa] o 350 [Kg/cm²].

3.7.1.2. Resistencia media requerida (f_r):

Se determina en base a la resistencia mínima especificada, para 28 días, el nivel de confianza esperado y la desviación estándar.

Sean:

- f_c : resistencia a compresión a 28 días, expresada en kg/cm².
- t : factor estadístico asociado al nivel de confianza.
- s : desviación estándar, expresada en kg/cm².

Entonces:

$$f_r = f_c + t \cdot s$$

Para la dosificación del hormigón patrón se utilizaron los siguientes datos:

- Nivel de confianza 90%, lo que se traduce en un factor estadístico $t = 1,282$.
- Desviación estándar (s) = 35 [Kg/cm²]

Se obtuvo que la resistencia media requerida es de 395 [Kg/cm²]

3.7.1.3. Cantidad de agua (A):

Volumen estimado de agua de amasado, según el tamaño máximo nominal de partícula (Dn), y la docilidad especificada según descenso de cono, se estima que se debe utilizar 200 litros agua por metro cubico de hormigón, equivalentes a 200 [Kg/m³]

3.7.1.4. Cantidad de cemento (C):

Suponiendo una razón agua/cemento (A/C) = 0,42, se calcula la cantidad de cemento según la siguiente formula, expresado en [Kg].

$$C = \frac{A}{A/C}$$

Obteniendo que se debe utilizar 476 Kg de cemento por metro cubico de hormigón.

3.7.1.5. Cantidad de áridos:

A partir de la siguiente tabla se obtiene una estimación del peso del metro cubico de hormigón.

Tipo de hormigón	Tamaño máximo del árido (mm)	Peso estimado del hormigón (Kg/m ³)
Simple, cemento $\leq 200 \text{ kg/m}^3$	40 – 50	2.300
Simple, cemento $\geq 200 \text{ kg/m}^3$	40 – 50	2.400
Aceras	20	2.420
Armado en general	40 – 50	2.450
Armado en general	10 – 20	2.430
Calzadas	40	2.450

Fuente: Juan Egaña Ramos

El peso del árido está dado de la siguiente manera:

Peso árido total = Peso m³ de hormigón – Peso de cemento – Peso del agua [Kg]

Peso árido total = 2.430 – 476 – 200 [Kg]

Peso árido total = 1754 [Kg]

La cantidad de áridos se obtuvo de acuerdo a los porcentajes de áridos combinados en la granulometría, siendo un 51% de gravilla y un 49% de arena.

Por lo tanto se tiene que la cantidad de gravilla es 895 [Kg/m³] y la cantidad de arena es 860 [Kg/m³].

3.7.1.6. Resumen dosificación de hormigón patrón.

Las cantidades de cada uno de los materiales para el hormigón patrón se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 3.8. RESUMEN DOSIFICACIÓN HORMIGÓN PATRÓN

Material	Unidad	Cantidad
Cemento	Kg	476
Agua	Kg	200
Gravilla	Kg	895
Arena	Kg	860

Fuente: Elaboración propia (2016)

3.7.2. Dosificación de hormigones.

Para realizar las dosificaciones de los hormigones con sustitución se tendrá en cuenta la dosificación del hormigón patrón sin sustitución, presentada anteriormente.

Los materiales a sustituir son cenizas de madera, las cuales serán sustituidos por peso de cemento [Kg]

Los materiales que se incluirán son la microsílíce y el aditivo hiperplastificante.

En la siguiente tabla se presentaran las cantidades en peso a sustituir por peso de cemento.

TABLA 3.9. RESUMEN DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES.

Materiales	P	PCM	PMS	10%CM	20%CM	30%CM
Cemento [Kg]	476	476	476	428,4	380,8	333,2
Agua [Kg]	200	200	200	200	200	200
Gravilla [Kg]	895	895	895	895	895	895
Arena [Kg]	860	860	860	860	860	860
Microsílíce [Kg]	---	---	19,04	17,1	15,2	13,3
Cenizas [Kg]	---	95,2	---	47,6	95,2	142,8
Aditivo - 0,6% [Kg]	---	2,9	2,9	2,6	2,3	2,0

Fuente: Elaboración propia (2016)

Donde:

P: Hormigón patrón sin sustitución.

PCM: Hormigón patrón con inclusión del 20% de ceniza de madera.

PMS: Hormigón patrón con inclusión del 4% de microsílíce.

10%CM: Hormigón con inclusión del 4% de microsílíce y sustitución 10% de ceniza de madera.

20%CM: Hormigón con inclusión del 4% de microsílíce y sustitución 20% de ceniza de madera.

30%CM: Hormigón con inclusión del 4% de microsílíce y sustitución 30% de ceniza de madera.

CAPÍTULO IV: DESARROLLO EXPERIMENTAL.

4.1. Fabricación del hormigón

La confección de los hormigones se llevará a cabo en los laboratorios de hormigón de la Universidad de Valparaíso, ubicados en Playa Ancha, y considerando lo establecido en la NCH 1017 Of 2009.

4.1.1. Materiales y herramientas

A) Aparatos:

- Recipientes: Se utilizaron recipientes de variados volúmenes para medir, secar y transportar materiales, entre otros usos.
- Balanza: Se utiliza una balanza digital, de precisión a 0,1 gr.
- Mezcladora: Se utilizó una betonera eléctrica.
- Pala: Se utilizó pala metálica, tamaño estándar.
- Poruña: Utensilio utilizado para medición de los materiales.
- Moldes: Se utilizaron moldes cúbicos metálicos, de dimensiones 150x150x150mm, según NCH 1017 Of 2009.
- Vibrador mecánico: Se utilizó una sonda vibradora sumergible, de acuerdo a NCH 1017 OF 2009.

B) Materiales:

- Cemento: Se utilizó cemento Melón Portland Puzolánico grado corriente, el cual se almacenó dentro del laboratorio.
- Áridos: Gravilla y arena, comprados a la empresa “Transportes alegre”, almacenados al exterior del laboratorio.
- Cenizas de madera: Provenientes de horno de la Panadería “El Porvenir”, ubicada en Placilla – Sexta Región. Almacenadas dentro del laboratorio.
- Microsílice: Se utilizó TamCem SF, almacenada dentro del laboratorio.

4.1.2. Proceso de mezclado

El proceso de mezclado en la betonera se resume en lo siguiente:

- Se vierte un 75% de la cantidad de agua a utilizar.
- Se agregan los áridos y el cemento, en las mezclas que incluyan cenizas de madera y microsíllice, son agregados en este paso.
- Se agrega el porcentaje restante de agua, mezclando hasta tener una masa homogénea.

FIGURA 4.17: PROCESO DE MEZCLADO



Fuente: Elaboración propia (2016)

4.1.3. Preparación de los moldes

Según la norma NCh1017 - Confección y curado en obra de probetas para ensayo de compresión y tracción establece los requerimientos básicos para los moldes a utilizar. Los moldes son acondicionados de la siguiente manera:

- Se limpian de manera de eliminar cualquier resto de un uso anterior, o cualquier agente contaminante.
- Se lubrica el interior de cada molde con aceite mineral para prevenir la adherencia con la mezcla

4.1.4. Determinación de la docilidad.

Previo al llenado de los moldes se realiza la determinación de la docilidad de la mezcla, con el método del asentamiento del cono de Abrams, procedimiento que se detalla en la norma NCh1019Of 2009 – Hormigón – Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams.

FIGURA 4.18: DETERMINACIÓN DE DOCILIDAD



Fuente: Elaboración propia (2016)

4.1.5. Llenado y vibrado de los moldes.

El llenado de los moldes se realiza, posterior a la determinación del asentamiento del cono, en una sola capa. Para el vibrado se utilizará una sonda vibradora, en forma vertical sin tocar los bordes, la cual se introduce en el centro una sola vez, hasta que la mezcla suelta la lechada. Posterior a esto se retira lentamente la sonda, dándole una terminación superficial lo más parejo posible.

FIGURA 4.19: LLENADO Y VIBRADO DE MOLDES



Fuente: Elaboración propia (2016)

4.1.6. Desmolde y curado.

Transcurridas 24 horas, se procede a desmoldar las probetas, marcándolas de manera definitiva, y se sumergen en una tina con agua para su curado hasta completar los 28 días.

FIGURA 4.20: PROBETAS RECIÉN DESMOLDADAS Y MARCADAS



Fuente: Elaboración propia (2016)

FIGURA 4.21: CURADO DE PROBETAS



Fuente: Elaboración propia (2016)

4.2. Dosificaciones experimentales

4.2.1. Corrección por humedad

La corrección por humedad se realiza de acuerdo a la norma NCH 1018.

Se debe medir la humedad de los áridos, antes de ser pesados, con el objeto de corregir el agua de amasado en cada mezcla. La medición de la humedad se realiza de acuerdo a la norma NCH 1515.

Sea:

- %H: Humedad
- mh: masa húmeda
- ms: Masa seca

$$\%H = \left(\frac{mh - ms}{ms} \right) * 100$$

Ya obtenida la humedad de los áridos se calcula la humedad corregida (hf)

Sea:

- hf: Humedad corregida
- %H: Humedad
- %abs: Absorción del árido, arena o gravilla.
- P. árido: Peso del árido, arena o gravilla. [Kg]

$$hf = P. \text{árido} * (\%H - \%abs)$$

Los resultados se expresan en las siguientes tablas, las correcciones se realizaron a 0,035 m³, cantidad por colada.

TABLA 4.10: DOSIFICACIÓN HORMIGÓN P CORREGIDA POR HUMEDAD

HP	CANTIDAD	APORTE HUMEDAD	CANTIDAD CORREGIDA
CEMENTO [Kg]	16,66	0	16,66
AGUA [Kg]	7,0	-0,21	6,79
GRAVILLA [Kg]	31,33	-0,22	31,33
ARENA [Kg]	30,10	0,43	30,53

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 4.11: DOSIFICACIÓN HORMIGÓN PCM CORREGIDA POR HUMEDAD

HPCM	CANTIDAD	APORTE HUMEDAD	CANTIDAD CORREGIDA
CEMENTO [Kg]	16,66	0	16,66
AGUA [Kg]	7,00	0,21	6,79
GRAVILLA [Kg]	31,33	-0,19	31,33
ARENA [Kg]	30,10	0,40	30,50
CENIZAS [Kg]	3,332	0	3,33
ADITIVO [Kg]	0,100	0	0,10

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 4.12: DOSIFICACIÓN HORMIGÓN PMS CORREGIDA POR HUMEDAD

HPMS	CANTIDAD	APORTE HUMEDAD	CANTIDAD CORREGIDA
CEMENTO [Kg]	16,66	0	16,66
AGUA [Kg]	7,00	0,25	6,75
GRAVILLA [Kg]	31,33	-0,24	31,33
ARENA [Kg]	30,10	0,48	30,58
MICROSILICE [Kg]	3,332	0	3,33
ADITIVO [Kg]	0,100	0	0,10

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 4.13: DOSIFICACIÓN HORMIGÓN 10%CM CORREGIDA POR HUMEDAD

H 10%CM	CANTIDAD	APORTE HUMEDAD	CANTIDAD CORREGIDA
CEMENTO [Kg]	14,99	0	14,99
AGUA [Kg]	7,00	0,35	6,65
GRAVILLA [Kg]	31,33	-0,24	31,33
ARENA [Kg]	30,10	0,59	30,69
MICROSILICE [Kg]	0,60	0	0,60
CENIZA [Kg]	1,67	0	1,67
ADITIVO [Kg]	0,09	0	0,09

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 4.14: DOSIFICACIÓN HORMIGÓN 20%CM CORREGIDA POR HUMEDAD

H 20%CM	CANTIDAD	APORTE HUMEDAD	CANTIDAD CORREGIDA
CEMENTO [Kg]	13,33	0	13,33
AGUA [Kg]	7,00	0,21	6,79
GRAVILLA [Kg]	31,33	-0,24	31,33
ARENA [Kg]	30,10	0,45	30,55
MICROSILICE [Kg]	0,53	0	0,53
CENIZA [Kg]	3,33	0	3,33
ADITIVO [Kg]	0,08	0	0,08

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 4.15: DOSIFICACIÓN HORMIGÓN 30% CM CORREGIDA POR HUMEDAD

H 30%CM	CANTIDAD	APORTE HUMEDAD	CANTIDAD CORREGIDA
CEMENTO [Kg]	11,66	0	11,66
AGUA [Kg]	6,93	0,08	6,85
GRAVILLA [Kg]	31,33	-0,23	31,33
ARENA [Kg]	30,41	0,31	30,71
MICROSILICE [Kg]	0,47	0	0,47
CENIZA [Kg]	5,00	0	5,00
ADITIVO [Kg]	0,07	0	0,07

Fuente: Elaboración propia (2016)

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Ensayo de asentamiento

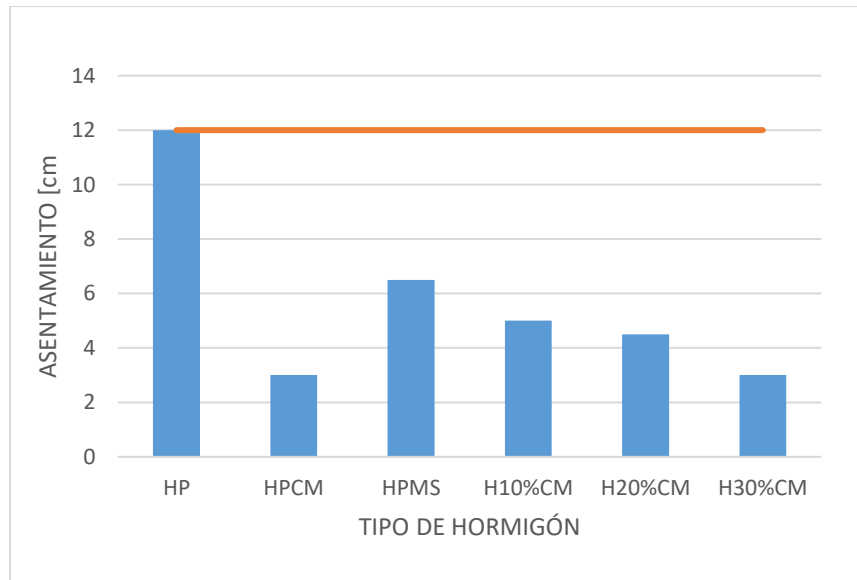
El ensayo de asentamiento fue realizado a cada una de las mezclas hechas en el laboratorio, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 5.16: VARIACIÓN DE ASENTAMIENTO PARA HORMIGONES

TIPO DE HORMIGÓN	DESCENSO DE CONO (cm)	VARIACIÓN (%)
HP	12	100
HPCM	3	25
HPMS	6,5	54
H10%CM	5	42
H20%CM	4,5	38
H30%CM	3	25

Fuente: Elaboración propia (2016)

GRÁFICO 5.4: VARIACIÓN DE ASENTAMIENTO PARA LOS DIFERENTES HORMIGONES.



Fuente: Elaboración propia (2016)

Al comparar los resultados de asentamiento, se puede observar que en todas las mezclas realizadas con las distintas adiciones, el asentamiento fue menor. La variación del descenso varía entre 3 [cm] y 6,5 [cm] lo que demuestra que la mezcla paso de ser fluida a plástica o blanda, según la tabla anteriormente expuesta, pág. 48.

5.2. Ensayo de densidad aparente del hormigón endurecido.

Para realizar el ensayo las probetas deben ser medidas y pesadas según lo especificado en la norma NCH 1037.

Las mediciones se realizan de acuerdo al siguiente esquema:

FIGURA 5.22: MEDICIÓN DE CARAS LATERALES, PROBETA CÚBICA

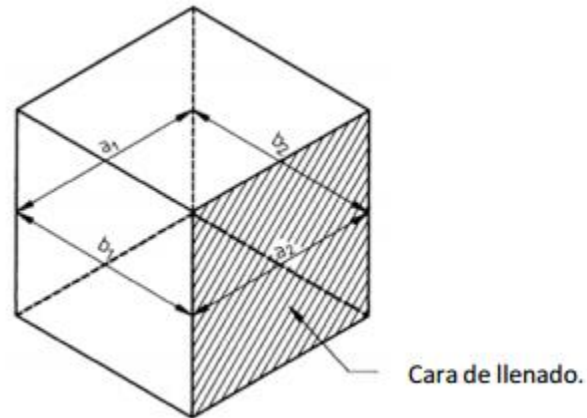
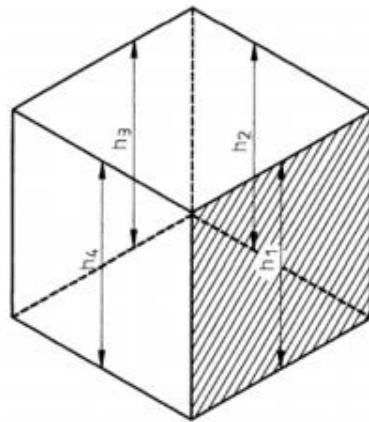


FIGURA 5.23: MEDICIÓN DE ALTURAS PROBETA CÚBICA



A continuación, se presentarán los datos obtenidos de cada uno de los ensayos realizados en laboratorio a cada una de las mezclas.

Los valores de a, b, h representan el promedio de las mediciones realizadas en el laboratorio.

TABLA 5.17: RESULTADOS ENSAYO DENSIDAD APARENTE, HORMIGÓN HP

MUESTRA HP	a [m]	b [m]	h [m]	VOLUMEN [m3]	MASA [Kg]	DENSIDAD [Kg/m3]
1	0,1510	0,1505	0,1500	0,0034	7,9210	2324
2	0,1500	0,1500	0,1500	0,0034	7,8840	2336
3	0,1500	0,1495	0,1503	0,0034	7,9270	2353
PROMEDIO	0,1503	0,1500	0,1501	0,0034	7,9107	2337

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 5.18: RESULTADOS ENSAYO DENSIDAD APARENTE, HORMIGÓN HPCM

HORMIGÓN HPCM	a [m]	b [m]	h [m]	VOLUMEN [m3]	MASA [Kg]	DENSIDAD [Kg/m3]
1	0,1500	0,1495	0,1500	0,0034	7,7541	2305
2	0,1505	0,1500	0,1500	0,0034	7,8045	2305
3	0,1495	0,1500	0,1500	0,0034	7,8616	2337
PROMEDIO	0,1500	0,1498	0,1500	0,0034	7,8067	2316

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 5.19: RESULTADOS ENSAYO DENSIDAD APARENTE, HORMIGÓN HPMS

MUESTRA HPMS	a [m]	b [m]	h [m]	VOLUMEN [m3]	MASA [Kg]	DENSIDAD [Kg/m3]
1	0,1505	0,1505	0,1503	0,0034	8,0012	2351
2	0,1500	0,1510	0,1500	0,0034	8,0006	2355
3	0,1505	0,1500	0,1513	0,0034	8,0002	2343
PROMEDIO	0,1503	0,1505	0,1505	0,0034	8,0007	2350

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 5.20: RESULTADOS ENSAYO DENSIDAD APARENTE, HORMIGÓN H10%CM

HORMIGÓN H10%CM	a [m]	b [m]	h [m]	VOLUMEN [m3]	MASA [Kg]	DENSIDAD [Kg/m3]
1	0,1500	0,1495	0,1505	0,0034	7,7728	2303
2	0,1510	0,1505	0,1500	0,0034	7,7849	2284
3	0,1505	0,1505	0,1500	0,0034	7,7810	2290
PROMEDIO	0,1505	0,1502	0,1502	0,0034	7,7796	2292

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 5.21: RESULTADOS ENSAYO DENSIDAD APARENTE, HORMIGÓN H20%CM

HORMIGÓN H20%CM	a [m]	b [m]	h [m]	VOLUMEN [m3]	MASA [Kg]	DENSIDAD [Kg/m3]
1	0,1498	0,1500	0,1495	0,0034	7,5952	2262
2	0,1500	0,1510	0,1500	0,0034	7,6654	2256
3	0,1500	0,1500	0,1500	0,0034	7,5613	2240
PROMEDIO	0,1499	0,1503	0,1498	0,0034	7,6073	2253

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 5.22: RESULTADOS ENSAYO DENSIDAD APARENTE, HORMIGÓN H30%CM

HORMIGÓN H30%CM	a [m]	b [m]	h [m]	VOLUMEN [m3]	MASA [Kg]	DENSIDAD [Kg/m3]
1	0,1505	0,1500	0,1503	0,0034	7,6709	2262
2	0,1495	0,1500	0,1500	0,0034	7,6172	2264
3	0,1500	0,1495	0,1500	0,0034	7,5819	2254
PROMEDIO	0,1500	0,1498	0,1501	0,0034	7,6233	2260

Fuente: Elaboración propia (2016)

Una vez obtenidos todos los resultados de los ensayos de densidad aparente se procede a realizar un análisis comparativo entre ellos, para esto se presenta la tabla resumen de los resultados de laboratorio.

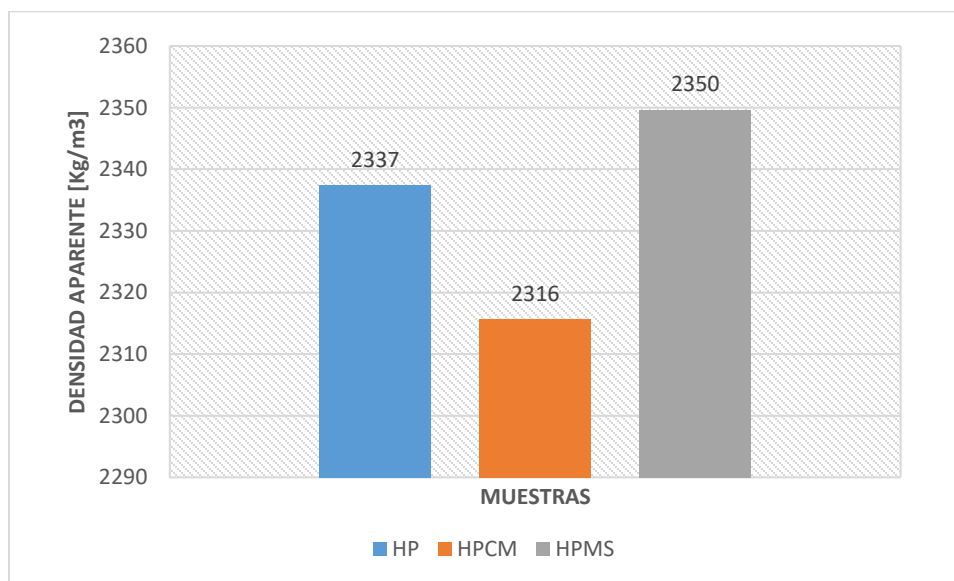
TABLA 5.23: RESUMEN RESULTADOS ENSAYO DENSIDAD APARENTE

MUESTRA	HP	HPCM	HPMS	H10%CM	H20%CM	H30%CM
MUESTRA 1 [kg/m ³]	2324	2305	2351	2303	2262	2262
MUESTRA 2 [kg/m ³]	2336	2305	2355	2284	2256	2264
MUESTRA 3 [kg/m ³]	2353	2337	2343	2290	2240	2254
PROMEDIO [kg/m³]	2337	2316	2350	2292	2253	2260

Fuente: Elaboración propia (2016)

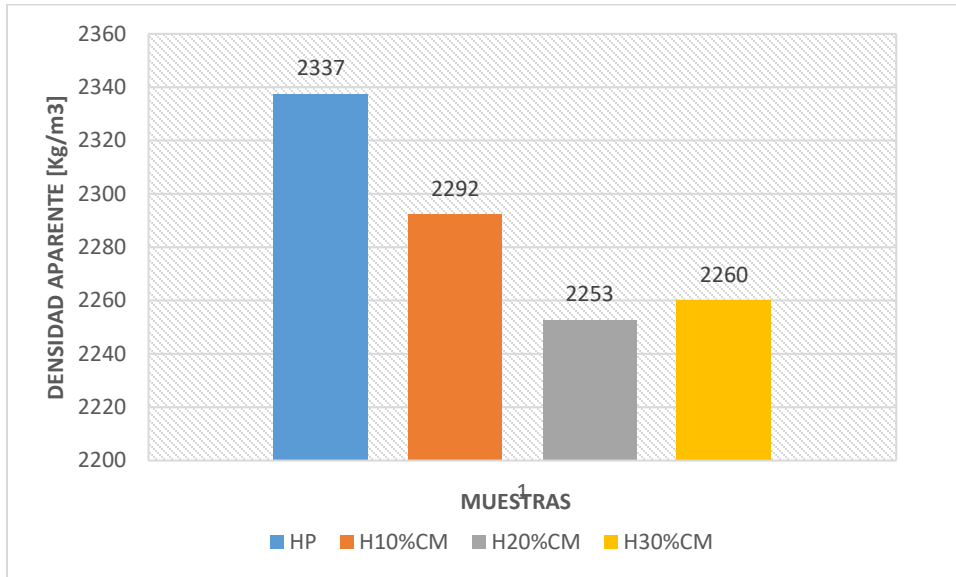
A continuación, se presenta el análisis de los datos obtenidos en laboratorio, realizado a partir de la tabla anterior. Este análisis se muestra a través de los siguientes gráficos.

GRÁFICO 5.5: COMPARACIÓN DENSIDAD APARENTE, HORMIGONES PATRONES



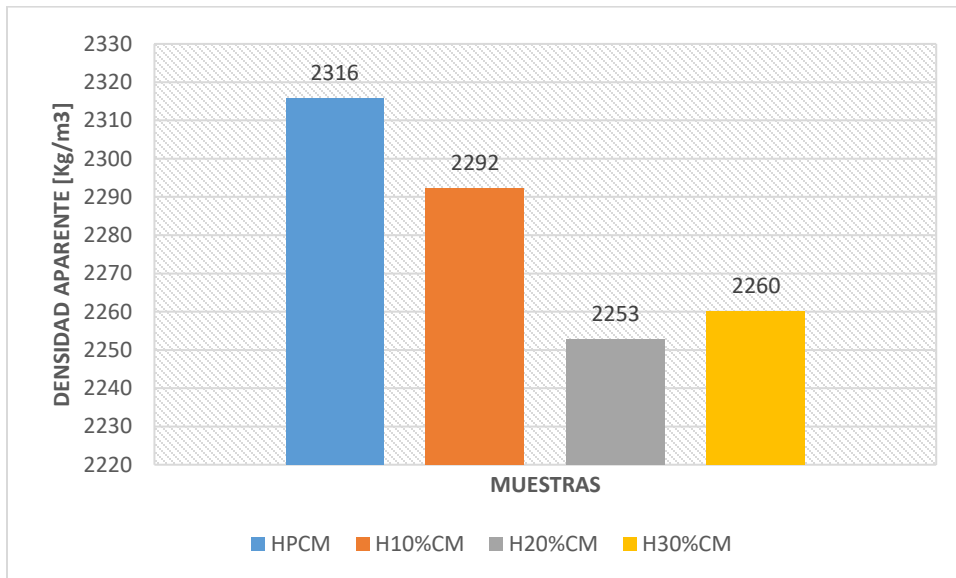
Fuente: Elaboración propia (2016)

GRÁFICO 5.6: COMPARACIÓN DENSIDAD APARENTE: HP, H10%CM, H20%CM Y H30%CM



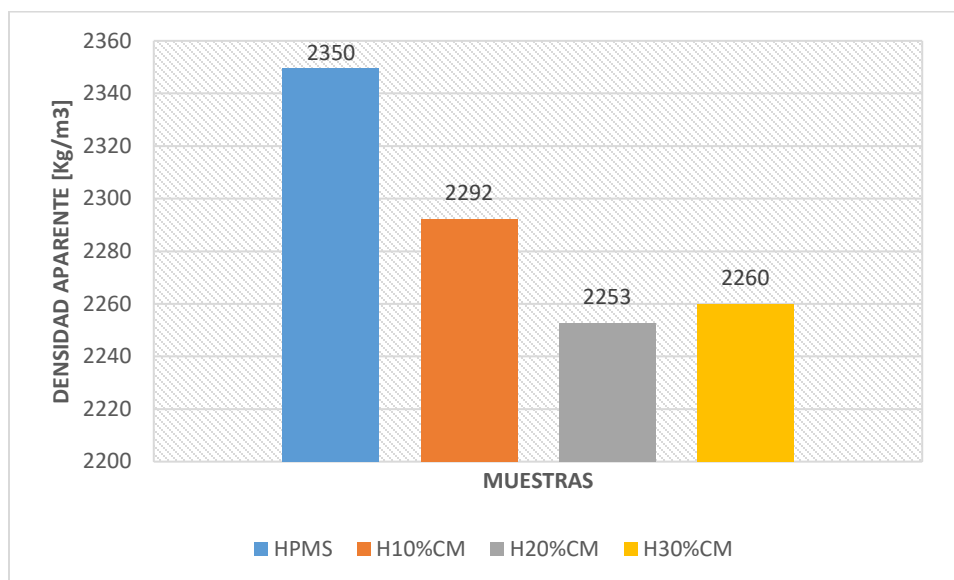
Fuente: Elaboración propia (2016)

GRÁFICO 5.7: COMPARACIÓN DENSIDAD APARENTE: HPCM, H10%CM, H20%CM Y H30%CM



Fuente: Elaboración propia (2016)

GRÁFICO 5.8: COMPARACIÓN DENSIDAD APARENTE: HPMS, H10%CM, H20%CM Y H30%CM



Fuente: Elaboración propia (2016)

A continuación, se presenta la variación de los resultados del ensayo de densidad aparente de los distintos hormigones respecto al hormigón patrón (HP)

TABLA 5.24: VARIACIÓN DE RESULTADOS DE DENSIDAD APARENTE

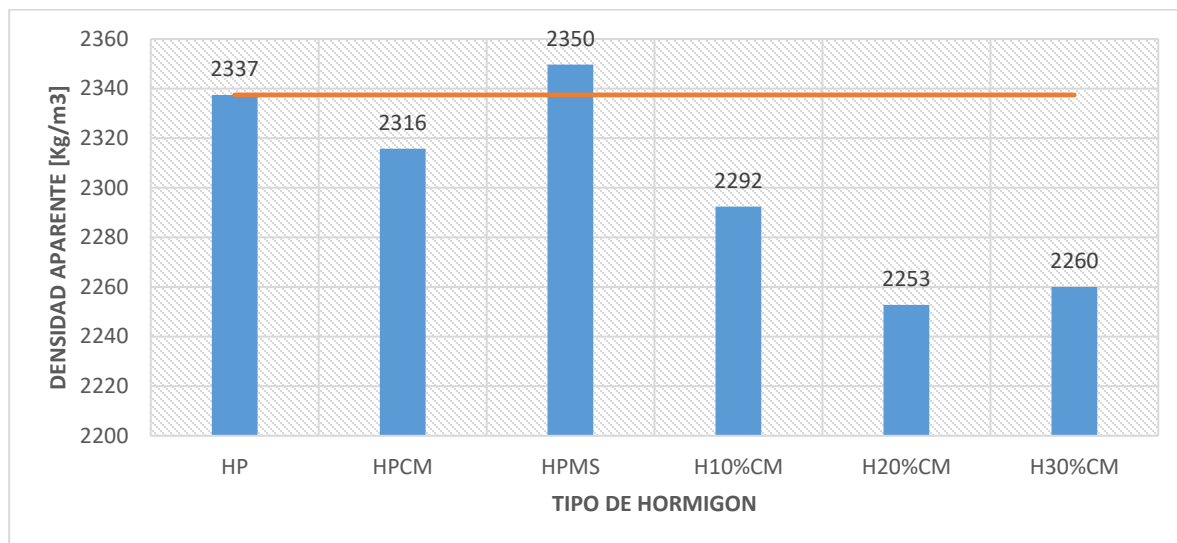
TIPO DE HORMIGÓN	DENSIDAD APARENTE	
	[Kg/m3]	%
HP	2337	100
HPCM	2316	99
HPMS	2350	101
H10%CM	2292	98
H20%CM	2253	96
H30%CM	2260	97

Fuente: Elaboración propia (2016)

Si bien se observa ciertas diferencias entre las densidades aparentes de los hormigones dosificados, esas diferencias son de baja relevancia.

De la tabla de variación de densidad aparente se desprende el siguiente gráfico, en donde se aprecia de mejor forma las diferencias de los distintos hormigones, respecto al hormigón patrón.

GRÁFICO 5.9: VARIACIÓN DENSIDAD APARENTE



Fuente: Elaboración propia (2016)

5.3. Ensayo de absorción

Para realizar el ensayo se obtuvo el peso saturado superficialmente seco de las probetas, las cuales fueron secadas al horno para obtener el peso seco de cada una de ellas.

La absorción se calculó de la siguiente manera:

$$A = 100 * \frac{P_{sss} - P_s}{P_s} \quad [\%]$$

Donde:

- A: absorción del hormigón, en %
- P_{sss}: peso saturado superficie seca, en gramos.
- P_s: peso seco al horno, en gramos.

A continuación, se presentarán los datos obtenidos de cada uno de los ensayos realizados en laboratorio a cada uno de los tipos de hormigón.

TABLA 5.25: RESULTADOS ENSAYO DE ABSORCIÓN, HORMIGÓN HP

HORMIGÓN HP	MASA HUMEDA [gr]	MASA SECA [gr]	ABSORCIÓN
1	1430,4	1328,3	7,687%
2	1391,2	1290,7	7,786%
3	1417,1	1317,4	7,568%
PROMEDIO	1412,9	1312,1	7,680%

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 5.26: RESULTADOS ENSAYO DE ABSORCIÓN, HORMIGÓN HPCM

HORMIGÓN HPCM	MASA HUMEDA [gr]	MASA SECA [gr]	ABSORCIÓN
1	1380,3	1294,6	6,620%
2	1371,5	1288,1	6,475%
3	1374	1295,1	6,092%
PROMEDIO	1375,3	1292,6	6,396%

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 5.27: RESULTADOS ENSAYO DE ABSORCIÓN, HORMIGÓN HPMS

HORMIGÓN HPMS	MASA HUMEDA [gr]	MASA SECA [gr]	ABSORCIÓN
1	1407,6	1375,3	2,349%
2	1401,2	1364,6	2,682%
3	1403,5	1367,2	2,655%
PROMEDIO	1404,1	1369,0	2,562%

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 5.28: RESULTADOS ENSAYO DE ABSORCIÓN, HORMIGÓN H10%CM

HORMIGÓN H10%CM	MASA HUMEDA [gr]	MASA SECA [gr]	ABSORCIÓN
1	1361,0	1306,4	4,179%
2	1358,1	1307,4	3,878%
3	1387,6	1334,6	3,971%
PROMEDIO	1368,9	1316,1	4,010%

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 5.29: RESULTADOS ENSAYO DE ABSORCIÓN, HORMIGÓN H20%CM

HORMIGÓN H20%CM	MASA HUMEDA [gr]	MASA SECA [gr]	ABSORCIÓN
1	1321,2	1259,0	4,940%
2	1322,2	1262,3	4,745%
3	1335,5	1277,4	4,548%
PROMEDIO	1326,3	1266,2	4,745%

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 5.30: RESULTADOS ENSAYO DE ABSORCIÓN, HORMIGÓN H30%CM

HORMIGÓN H30%CM	MASA HUMEDA [gr]	MASA SECA [gr]	ABSORCIÓN
1	1374,3	1289,7	6,560%
2	1353,8	1266,5	6,893%
3	1377,9	1291,9	6,657%
PROMEDIO	1368,7	1282,7	6,702%

Fuente: Elaboración propia (2016)

Una vez obtenidos todos los resultados de los ensayos de absorción se procede a realizar un análisis comparativo entre ellos, para esto se presenta la tabla resumen de los resultados de laboratorio.

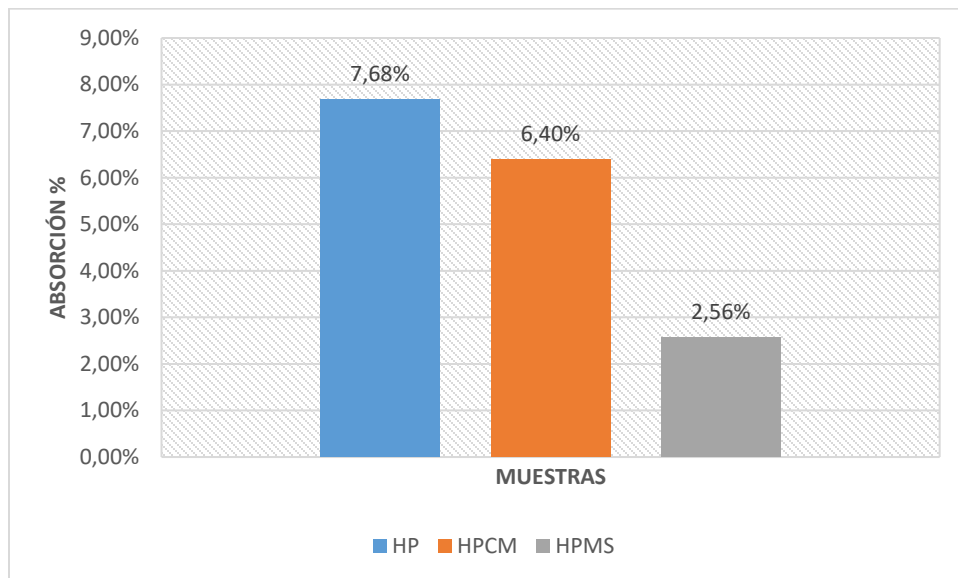
TABLA 5.31: RESUMEN RESULTADOS ENSAYO DE ABSORCIÓN

MUESTRA	HP	HPCM	HPMS	H10%CM	H20%CM	H30%CM
MUESTRA 1	7,69%	6,62%	2,35%	4,18%	4,94%	6,56%
MUESTRA 2	7,79%	6,47%	2,68%	3,88%	4,75%	6,89%
MUESTRA 3	7,57%	6,09%	2,66%	3,97%	4,55%	6,66%
PROMEDIO	7,68%	6,40%	2,56%	4,01%	4,74%	6,70%

Fuente: Elaboración propia (2016)

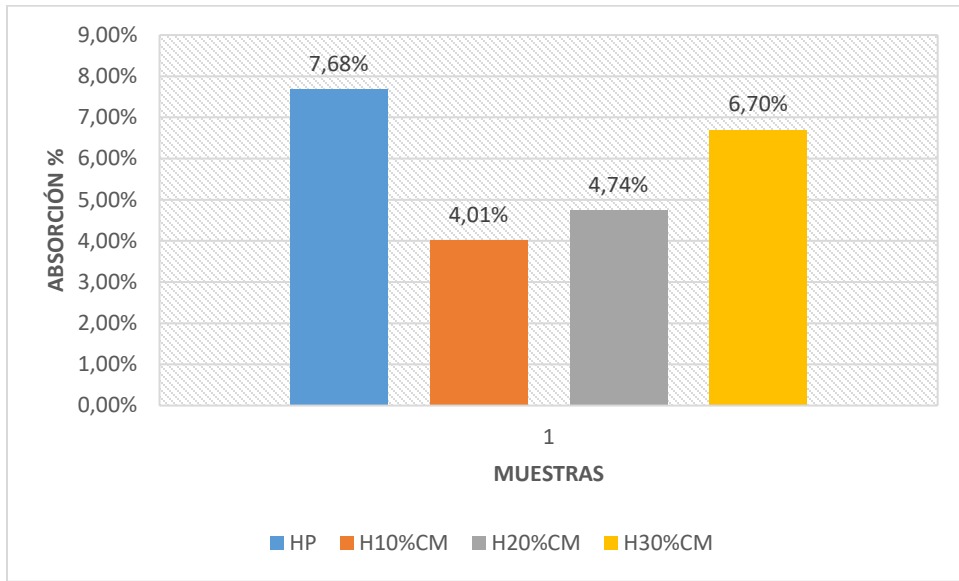
A continuación, se presenta el análisis de los datos obtenidos en laboratorio, realizado a partir de la tabla anterior. Este análisis se muestra a través de los siguientes gráficos.

GRÁFICO 5.10: COMPARACIÓN ABSORCIÓN, HORMIGONES PATRONES



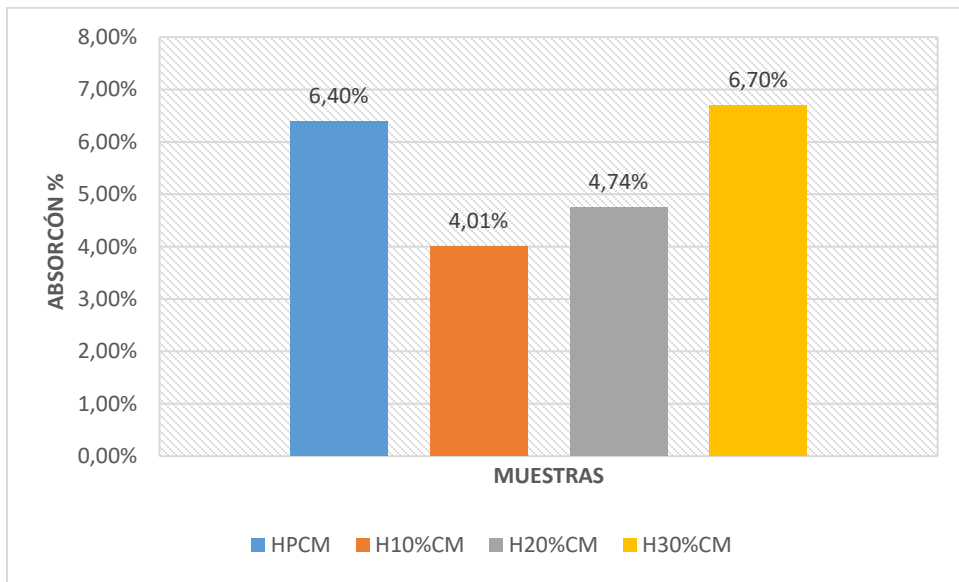
Fuente: Elaboración propia (2016)

GRÁFICO 5.11: COMPARACIÓN ABSORCIÓN: HP, H10%CM, H20%CM Y H30%CM



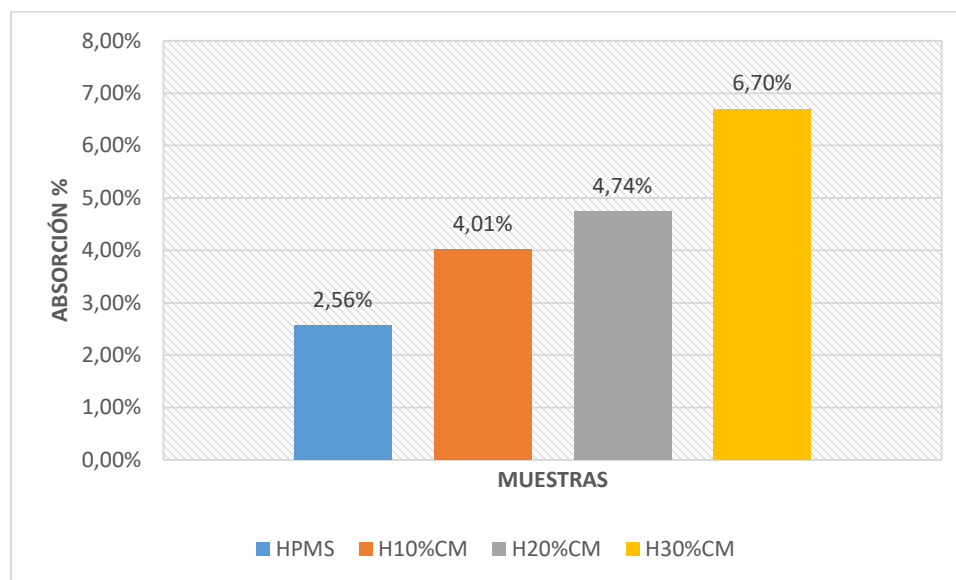
Fuente: Elaboración propia (2016)

GRÁFICO 5.12: COMPARACIÓN ABSORCIÓN: HPCM, H10%CM, H20%CM Y H30%CM



Fuente: Elaboración propia (2016)

GRÁFICO 5.13: COMPARACIÓN ABSORCIÓN: HPMS, H10%CM, H20%CM Y H30%CM



Fuente: Elaboración propia (2016)

A continuación, se presenta la variación de los resultados del ensayo de absorción de los distintos hormigones respecto al hormigón patrón (HP)

TABLA 5.32: VARIACIÓN RESULTADOS DE ABSORCIÓN

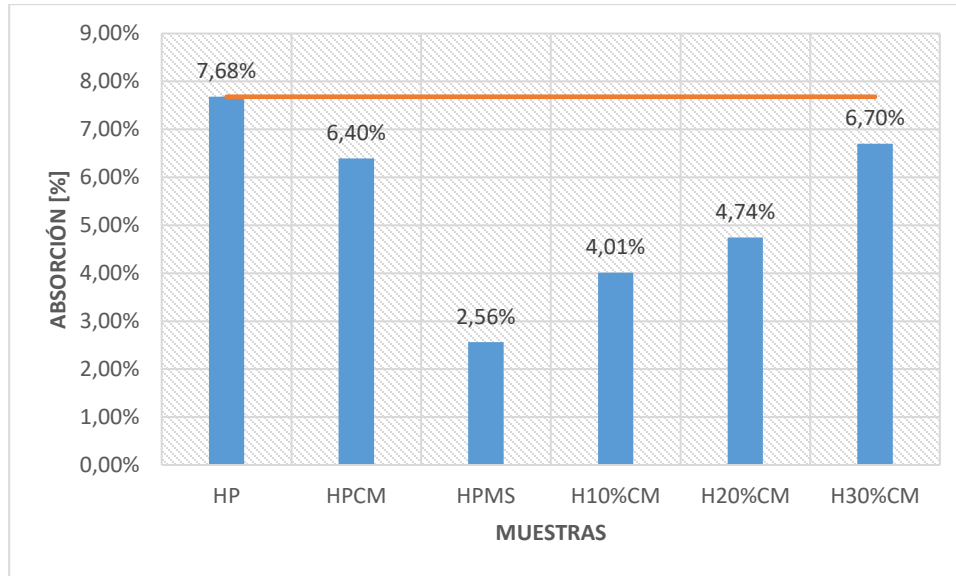
TIPO DE HORMIGÓN	ABSORCIÓN	
	EFFECTIVA, %	RELATIVA, %
HP	7,68	100
HPCM	6,40	83
HPMS	2,56	33
H10%CM	4,01	52
H20%CM	4,74	61
H30%CM	6,70	87

Fuente: Elaboración propia (2016)

En general las mezclas que contienen alguna adición – microsílíce o cenizas de madera – presentan menor absorción que la mezcla patrón. A ello contribuye la mayor finura de las adiciones que colmata los poros; la menor porosidad se tiene en la mezcla HPMS, que contiene microsílíce, de elevada finura, mayor que las de ceniza de madera.

De la tabla de variación de absorción se desprende el siguiente gráfico, en donde se aprecia de mejor forma las diferencias de los distintos hormigones, respecto al hormigón patrón.

GRÁFICO 5.14: VARIACIÓN DE ABSORCIÓN



Fuente: Elaboración propia (2016)

5.4. Ensayo de resistencia a compresión

A continuación, se presentarán los datos obtenidos de cada uno de los ensayos realizados en laboratorio a cada una de las mezclas.

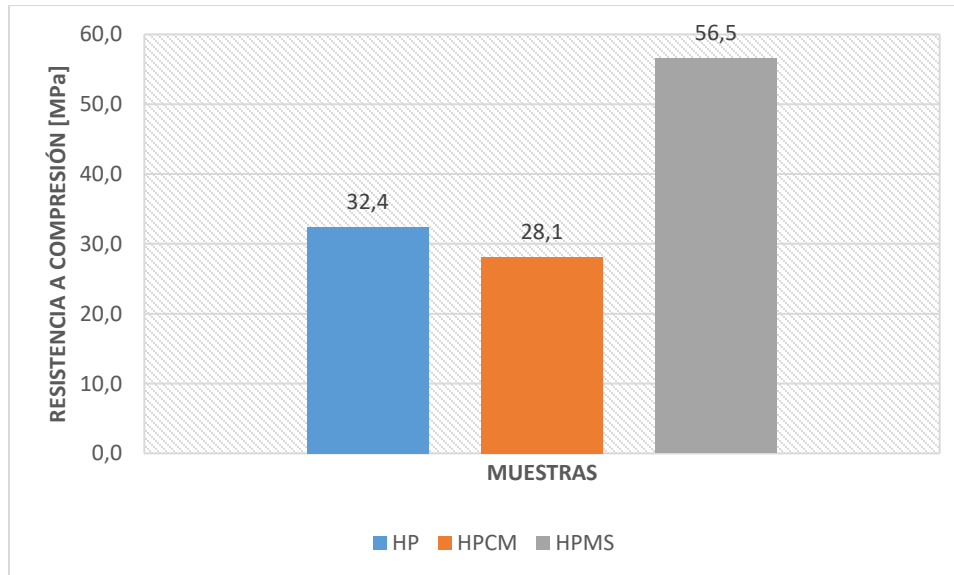
TABLA 5.33: RESULTADOS ENSAYO RESISTENCIA A COMPRESIÓN

MUESTRA	HP	HPCM	HPMS	H10%CM	H20%CM	H30%CM
MUESTRA 1 [MPa]	31,89	27,6	56,71	33,0	22,6	19,6
MUESTRA 2 [MPa]	32,95	28,2	56,67	31,6	22,7	18,6
MUESTRA 3 [MPa]	32,40	28,4	56,22	33,4	22,9	19,4
PROMEDIO [MPa]	32,4	28,1	56,5	32,7	22,7	19,2

Fuente: Elaboración propia (2016)

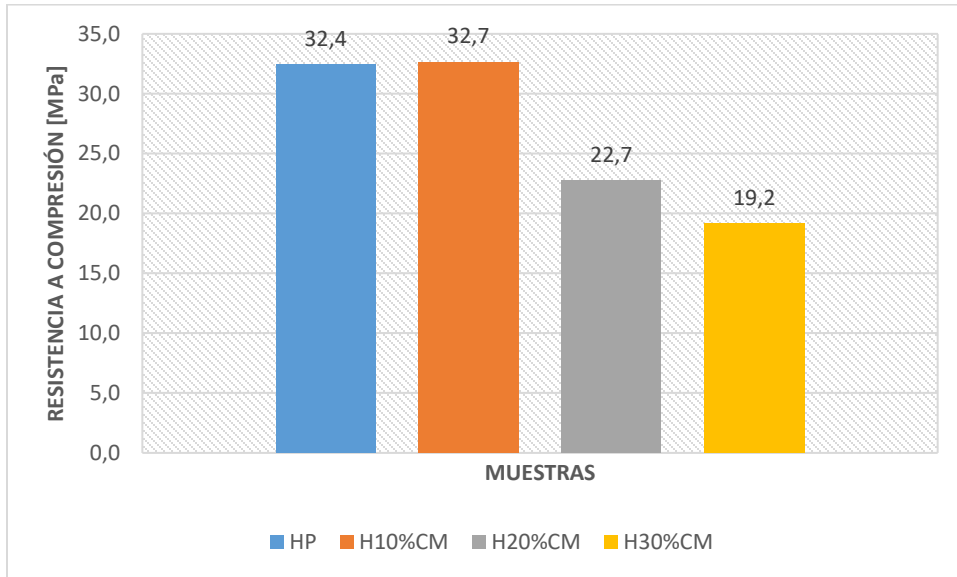
A continuación, se presenta el análisis de los datos obtenidos en laboratorio, realizado a partir de la tabla anterior. Este análisis se muestra a través de los siguientes gráficos.

GRÁFICO 5.15: COMPARACIÓN RESISTENCIA A COMPRESIÓN, HORMIGONES PATRONES



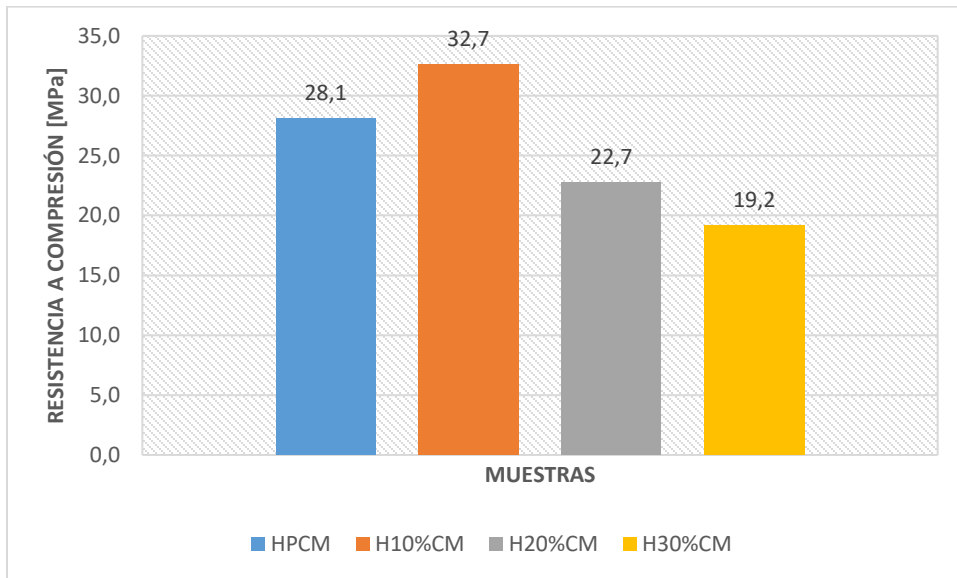
Fuente: Elaboración propia (2016)

GRÁFICO 5.16: COMPARACIÓN RESISTENCIA A COMPRESIÓN: HP, H10%CM, H20%CM Y H30%CM



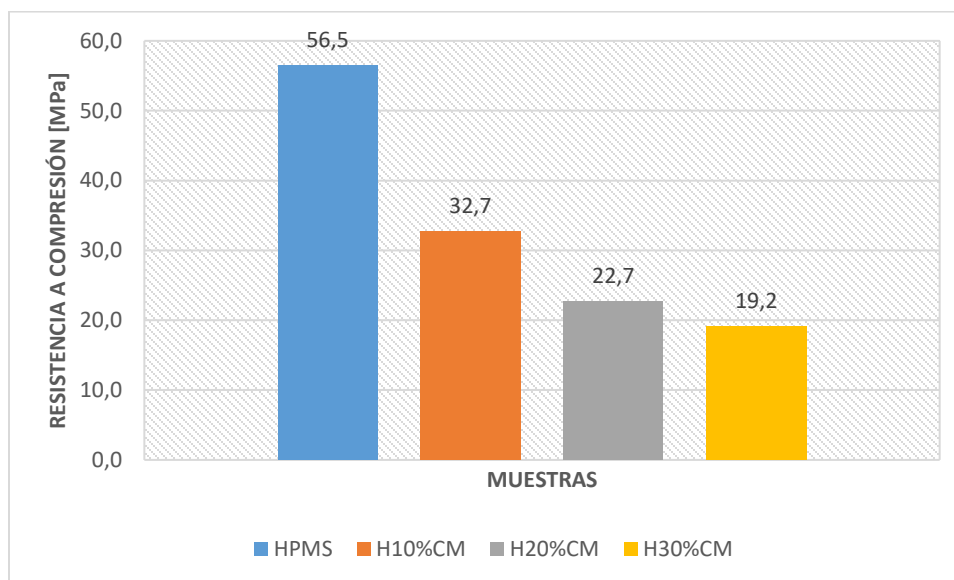
Fuente: Elaboración propia (2016)

GRÁFICO 5.17: COMPARACIÓN RESISTENCIA A COMPRESIÓN: HPCM, H10%CM, H20%CM Y H30%



Fuente: Elaboración propia (2016)

GRÁFICO 5.18: COMPARACIÓN RESISTENCIA A COMPRESIÓN: HPMS, H10%CM, H20%CM Y H30%CM



Fuente: Elaboración propia (2016)

A continuación, se presenta la variación de los resultados del ensayo de absorción de los distintos hormigones respecto al hormigón patrón (HP)

TABLA 5.34: VARIACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

TIPO DE HORMIGÓN	RESISTENCIA A COMPRESIÓN	
	[MPa]	%
HP	32,4	100
HPCM	28,1	87
HPMS	56,5	174
H10%CM	32,7	101
H20%CM	22,7	70
H30%CM	19,2	59

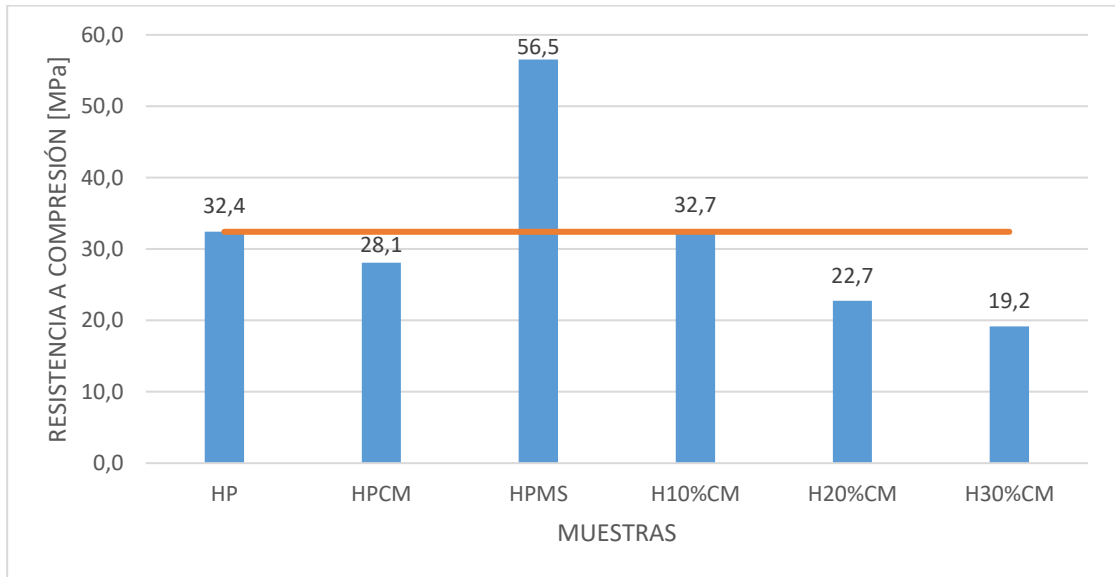
Fuente: Elaboración propia (2016)

Los resultados de resistencia a compresión a los 28 días presentan diferencias que pueden atribuirse a diferentes factores. La mezcla HPCM, con inclusión de 20% de cenizas de madera, presenta una disminución de un 13%; sin embargo, se estima que, dado el carácter puzolánico de esta adición, a mayor edad podría contribuir a aumentar la resistencia. La mezcla HPMS presenta un incremento de resistencia de 74%, esto se debe a la adición conglomerante de la suma de cemento más microsílíce que, por ser muy fina, reacciona en forma más rápida.

En las mezclas con adiciones de microsílice y cenizas de madera se verifica una disminución de la resistencia, que es tanto mayor cuanto mayor es el contenido de cenizas de madera, que se rempazan por cemento.

A continuación, se presenta en forma gráfica la variación de la resistencia a compresión que presentan los distintos tipos de hormigones con respecto al hormigón patrón (HP)

GRÁFICO 5.19: VARIACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN



Fuente: Elaboración propia (2016)

5.5. Ensayo de permeabilidad.

El ensayo de permeabilidad se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones de la norma NCH 2262 Of 2009. Las probetas fueron cubicas de arista 200 mm.

A continuación, se presentan los resultados de cada uno de los ensayos realizados a las distintas muestras de hormigón.

TABLA 5.35: RESULTADOS ENSAYO DE PERMEABILIDAD, HORMIGÓN HP

HORMIGÓN HP	PENETRACION 1 [cm]	PENETRACION 2 [cm]	PENETRACION PROMEDIO [cm]
1	2,3	2,2	2,25
2	2,1	2,2	2,15
3	2,3	2,4	2,35
PROMEDIO	2,23	2,27	2,25

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 5.36: RESULTADOS ENSAYO DE PERMEABILIDAD, HORMIGÓN HPCM

HORMIGÓN HPCM	PENETRACION 1 [cm]	PENETRACION 2 [cm]	PENETRACION PROMEDIO [cm]
1	1,1	1,0	1,05
2	1,0	1,1	1,05
3	1,1	1,1	1,10
PROMEDIO	1,07	1,07	1,07

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 5.37: RESULTADOS ENSAYO DE PERMEABILIDAD, HORMIGÓN HPMS

HORMIGÓN HPMS	PENETRACION 1 [cm]	PENETRACION 2 [cm]	PENETRACION PROMEDIO [cm]
1	1,1	1,2	1,15
2	1,3	1,2	1,25
3	1,2	1,3	1,25
PROMEDIO	1,20	1,23	1,22

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 5.38: RESULTADOS ENSAYO DE PERMEABILIDAD, HORMIGÓN H10%CM

HORMIGÓN H10%CM	PENETRACION 1 [cm]	PENETRACION 2 [cm]	PENETRACION PROMEDIO [cm]
1	1,6	1,5	1,55
2	1,5	1,5	1,50
3	1,5	1,6	1,55
PROMEDIO	1,53	1,53	1,53

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 5.39: RESULTADOS ENSAYO DE PERMEABILIDAD, HORMIGÓN H20%CM

HORMIGÓN H20%CM	PENETRACION 1 [cm]	PENETRACION 2 [cm]	PENETRACION PROMEDIO [cm]
1	3,3	3,4	3,35
2	3,4	3,5	3,45
3	3,2	3,3	3,25
PROMEDIO	3,30	3,40	3,35

Fuente: Elaboración propia (2016)

TABLA 5.40: RESULTADOS ENSAYO DE PERMEABILIDAD, HORMIGÓN H30%CM

HORMIGÓN H30%CM	PENETRACION 1 [cm]	PENETRACION 2 [cm]	PENETRACION PROMEDIO [cm]
1	3,0	3,0	3,00
2	2,9	2,8	2,85
3	2,9	3,0	2,95
PROMEDIO	2,93	2,93	2,93

Fuente: Elaboración propia (2016)

Una vez obtenidos todos los resultados de los ensayos de permeabilidad se procede a realizar un análisis comparativo entre ellos, para esto se presenta la tabla resumen de los resultados de laboratorio.

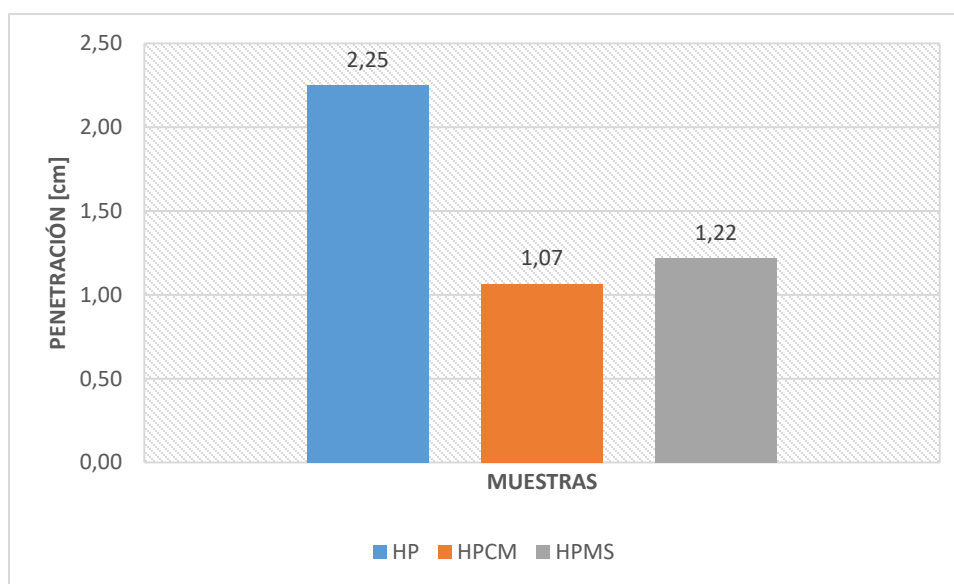
TABLA 5.41: RESUMEN RESULTADOS ENSAYO DE PERMEABILIDAD

MUESTRA	HP	HPCM	HPMS	H10%CM	H20%CM	H30%CM
MUESTRA 1 [cm]	2,25	1,05	1,15	1,55	3,35	3,00
MUESTRA 2 [cm]	2,15	1,05	1,25	1,50	3,45	2,85
MUESTRA 3 [cm]	2,35	1,10	1,25	1,55	3,25	2,95
PROMEDIO [cm]	2,25	1,07	1,22	1,53	3,35	2,93

Fuente: Elaboración propia (2016)

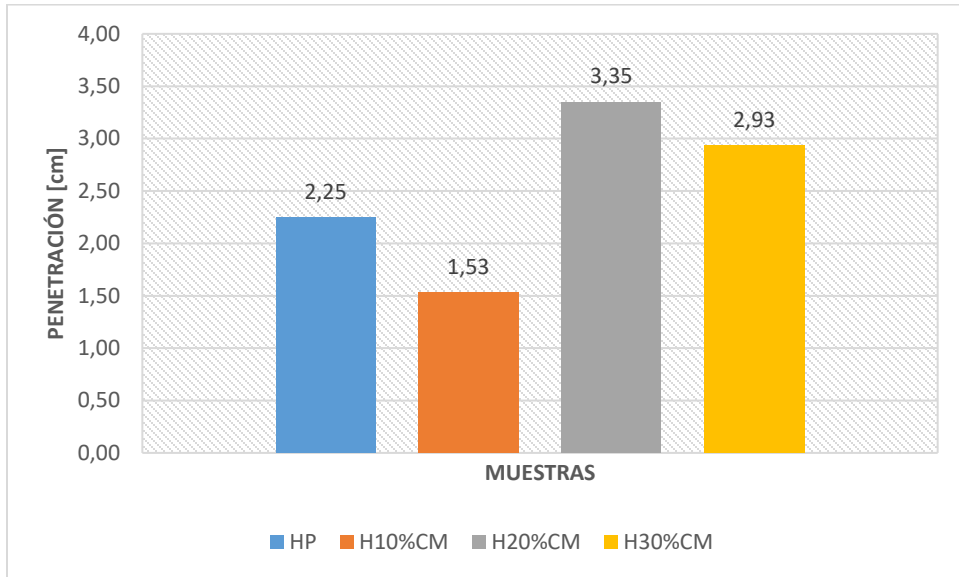
A continuación, se presenta el análisis de los datos obtenidos en laboratorio, realizado a partir de la tabla anterior. Este análisis se muestra a través de los siguientes gráficos.

GRÁFICO 5.20: COMPARACIÓN DE PERMEABILIDAD: HORMIGONES PATRONES



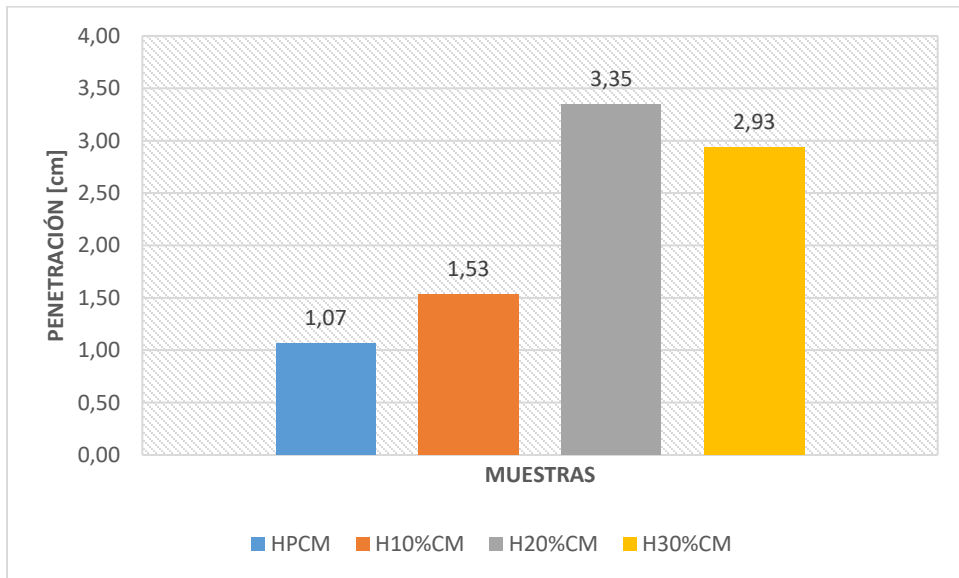
Fuente: Elaboración propia (2016)

GRÁFICO 5.21: COMPARACIÓN DE PERMEABILIDAD: HP, H10%CM, H20%CM Y H30%CM



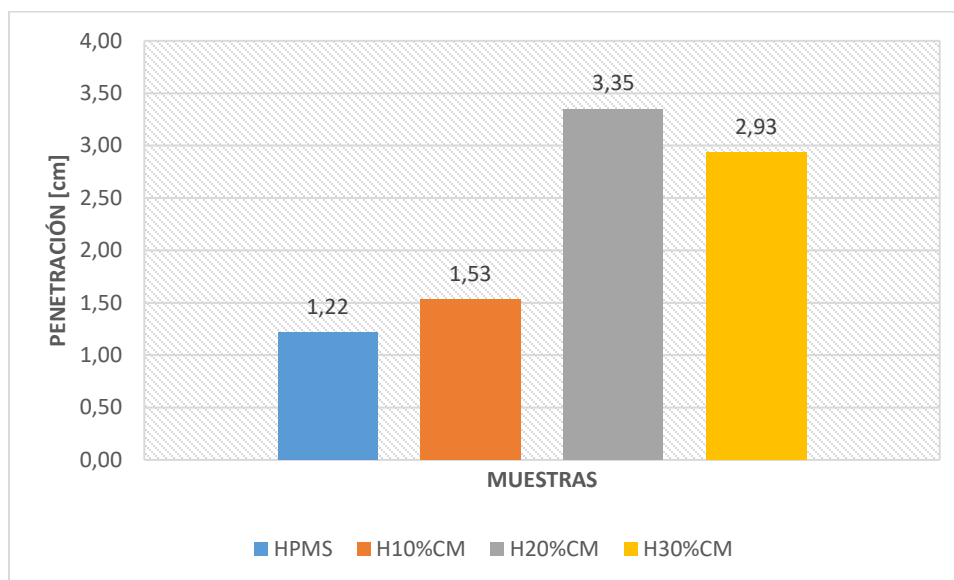
Fuente: Elaboración propia (2016)

GRÁFICO 5.22: COMPARACIÓN DE PERMEABILIDAD: HPCM, H10%CM, H20%CM Y H30%CM



Fuente: Elaboración propia (2016)

GRÁFICO 5.23: COMPARACIÓN DE PERMEABILIDAD: HPMS, H10%CM, H20%CM Y H30%CM



Fuente: Elaboración propia (2016)

A continuación, se presenta la variación de los resultados del ensayo de permeabilidad de los distintos hormigones respecto al hormigón patrón (HP)

TABLA 5.42: VARIACIÓN DE PERMEABILIDAD

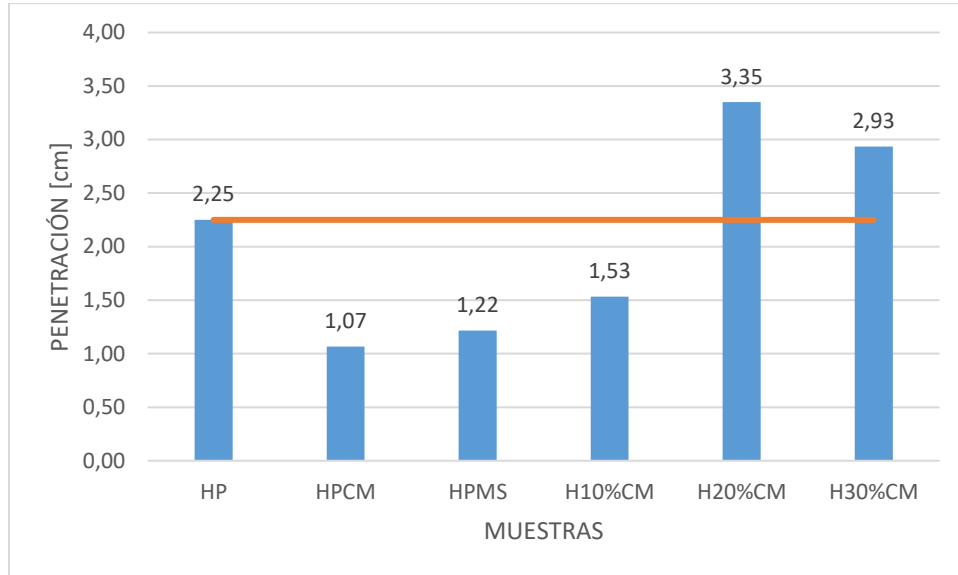
TIPOS DE HORMIGÓN	PERMEABILIDAD	
	cm	%
HP	2,3	100
HPCM	1,1	47
HPMS	1,2	54
H10%CM	1,5	68
H20%CM	3,4	149
H30%CM	2,9	130

Fuente: Elaboración propia (2016)

Las mezclas con inclusión de microsílíce y cenizas de madera presentaron una disminución en la permeabilidad. Por otro lado las mezclas con sustitución de cenizas de madera por cemento, solo presento una disminución en la permeabilidad la mezcla H10%CM, siendo esta disminución de un 53%.

A continuación, se presenta de manera gráfica la variación de la permeabilidad en cada uno de los tipos de hormigones con respecto al hormigón patrón (HP)

GRÁFICO 5.24: VARIACIÓN DE PERMEABILIDAD



Fuente: Elaboración propia (2016)

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

6.1. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos y al objetivo de esta investigación, la cual pretende determinar la influencia que ejercen las incorporaciones de microsílíce y cenizas de madera sobre la permeabilidad del hormigón, y además evaluar los efectos colaterales que presenta la adición de ceniza de madera en la resistencia a compresión, asentamiento, demanda de agua para mantener el asentamiento constante, porosidad y densidad aparente; es posible concluir lo siguiente:

a) **Permeabilidad:**

La mezcla del hormigón patrón con inclusión de microsílíce y del hormigón patrón con inclusión ceniza de madera presentan una disminución en la permeabilidad del hormigón. Por otro lado, de las mezclas con sustitución de ceniza de madera solo una, H10%CM, presenta una disminución en la permeabilidad.

b) **Asentamiento:**

A medida que se incorporaba cenizas en los hormigones el asentamiento disminuyó, comparado con el hormigón patrón. Lo que provocó que la mezcla fluida pasara a ser una mezcla plástica o blanda, lo que se representa en una mezcla con menos trabajabilidad.

c) **Demanda de agua para mantener el asentamiento constante:**

Para poder mantener el asentamiento constante se debe incluir más agua de la que se calculó en la dosificación, lo que provocaría que la razón agua/cemento varíe, aumente, lo que daría como resultado una disminución en la resistencia del hormigón.

d) Resistencia a compresión:

La resistencia a compresión varió dependiendo de la cantidad de adición de cenizas de madera. Al comparar el hormigón patrón [HP] con el hormigón patrón con inclusión de 20% de cenizas de madera [HPCM] se presenta una disminución del 13% en el hormigón HPCM, sin embargo, se estima que a mayor edad podría aumentar su resistencia, debido al carácter puzolánico de la ceniza. Por otro lado, el hormigón patrón con inclusión de microsílíce [HPMS] presenta un gran aumento, 74%, debido a sus características. Por último, el hormigón H10%CM presenta un mínimo aumento, del 1%, en la resistencia a compresión.

e) Porosidad:

Todos los hormigones disminuyeron su absorción en comparación con el hormigón patrón [HP], esto se debe a que las adiciones son de menor finura, por lo que colmatan los poros existentes en el hormigón.

f) Densidad aparente:

Se observan pequeñas diferencias en la densidad aparente de los distintos hormigones, las cuales son de poca relevancia, ya que varían entre un 1% y un 3%.

6.2. Futuras investigaciones

- A) Estudio para determinar la actividad puzolánica de cenizas procedentes de distintas variedades de madera.
- B) Estudio comparativo de las propiedades mecánicas de hormigones con cenizas de distintas variedades de madera, por ejemplo: eucaliptus, espino, parra, etc.
- C) Estudio para determinar las propiedades mecánicas del hormigón con cenizas de madera a distintas edades; 7, 14, 28, 60 y 90 días

BIBLIOGRAFÍA

- Akeem Ayinde Raheem et al, 2013 – Wood ash from bread bakery as partial replacement for cement in concrete.
- Antonio Gete-Alonso De Ylera, 1977 – Impermeabilización del hormigón.
- Chee Ban Cheah and Mahyuddin Ramli, 2011, The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview
- Chee Ban Cheah and Mahyuddin Ramli, 2014, The implementation of wood waste ash.
- CEMENTOS BIO – Cementos, fabricación y clasificación.
- Diana V. Vidal V et al, 2012 - Ceniza de bagazo de caña como aditivo al cemento Portland para la fabricación de elementos de construcción.
- Ficha técnica, 2011 - Coal fly ash and bottom ash. Disponible en: <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/B01FDCCB-AC8E-4089-9699-FA6413FBEE7C/119905/CENIZASVOLANTESDECARBONCENIZASDEHOGAR.pdf>
- FICEM – Informe estadístico 2013. Disponible en: http://www.ficem.org/estadisticas/informe_estadistico_2013.pdf
- Fly ash facts for highway engineers, American coal ash association, Inc US departamento of transportation, federal highway administration.
- Freitas,2013 – Estudio de la resistencia a compresión del concreto sustituyendo el 10% en peso de cemento por cenizas de hojas secas de la palma chaguaramo como material puzolanico.
- GIBBONS, PAT; 1997. Puzzolans for lime mortars. Aticles from building conservation. The conservation and repair of Ecclesiastical buildings,
- Harlem Brundtland, 1987 – Informe Brundtland.

- Historias y biografía/temas científicos – Procesos de fabricación del cemento portland, Clinker, propiedades y características.
- IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, 2015 - WOOD ASH AS AN EFFECTIVE RAW MATERIAL FOR CONCRETE BLOCKS.
- INN - NCH 148 of 86 - Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales.
- INN – NCH 163 of 2013 – áridos para morteros y hormigones.
- INN – NCH 1019 – Construcción – Hormigón – Determinación de docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams.
- INN – NCH 1037 – Hormigón – Ensayo de compresión en probetas cúbicas y cilíndricas.
- INN – NCH 1498 of 2012 – Hormigón y mortero – Agua de amasado – Clasificación y requisitos.
- International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology, 2013 - WOOD ASH FROM BREAD BAKERY AS PARTIAL REPLACEMENT FOR CEMENT IN CONCRETE.
- Jorge Barrios Corpa, 2014 – Estudio de la permeabilidad y resistencia a tracción en hormigones pre-comprimidos.
- K. Ganesan, K. Rajagopal, K. Thangavel, 2007, "Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material".
- Koprino S.A, 2005 – Beneficios del uso de microsílíce en cemento.
- MELON - Cemento - Hormigón durable a ciclos de Hielo y Deshielo. Disponible en: <http://www.melon.cl/documents/10157/cbd12ff9-66b8-45f4-9b7f-97e842a86c99>
- Metha, P.K and Monteiro, P.J; 2006 – Concrete: Microestructure, propieties and materials
- Miguel Angel Corona Zazueta, 1997, Concretos dosificados con cemento portland y ceniza volante.

- Neville Adams – Tecnología del concreto.
- Pablo Portugal Barriga, 2004, “Tecnología del Concreto de Alto Desempeño”
- Raúl Morales, 2008, Tendencias de la ingeniería – artículo: crean hormigón ecológico a partir de cenizas.
- Roberto J. Gomez, 2011 – Composición de las cenizas volcánicas y gases asociados.
- Shruthi H R et all, 2014 - A STUDY ON BAGASSE ASH REPLACED PLAIN CEMENT CONCRETE. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/280132446_A_STUDY_ON_BAGASSE_ASH_REPLACED_PLAIN_CEMENT_CONCRETE
- Silica fume association, 2005 – silica fume user’s manual. Disponible en:
<http://www.silicafume.org/pdf/silicafume-users-manual.pdf>
- Sika informaciones técnicas – Curado del concreto.
- Swaptik Chowdhury, 2014 - The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: An overview.
- Tarun R. Naik, 2003 - Use of wood ash in cement-based materials
- Qing Y et all, 2007 – Uso de sílice en hormigones de alto desempeño.