

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingeniería**

**Propiedades Mecánicas y de filtración en hormigones  
permeables con cemento portland e hidráulicos**

**Proyecto de Investigación**

**Harold Alberto Cardona Maldonado**

**Ingeniería Civil**

Trabajo de titulación presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Civil

Quito, 18 de mayo de 2017

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍA

HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Propiedades Mecánicas y de filtración en hormigones permeables con  
cemento portland e hidráulicos

**Harold Alberto Cardona Maldonado**

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Fabrizio Yépez , PhD.

Firma del profesor

---

Quito, 18 de mayo de 2017

## Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante:	_____
Nombres y apellidos:	Harold Alberto Cardona Maldonado
Código:	00107075
Cédula de Identidad:	1714085683
Lugar y fecha:	Quito, 18 de mayo de 2017

## RESUMEN

Las múltiples aplicaciones del concreto permeable otorgadas por sus propiedades de infiltración han impulsado un importante incremento en su utilización y desarrollo a nivel mundial. Si bien en los últimos años se ha logrado un mayor entendimiento sobre la influencia de los agregados, aditivos y métodos constructivos en las propiedades mecánicas y de filtración del concreto permeable, poca o ninguna investigación se ha realizado sobre el impacto que tiene la utilización de distintos tipos de cementos en las características de este tipo de hormigón. La siguiente investigación buscó encontrar las diferencias en las características mecánicas y de filtración de especímenes similares de hormigón permeable realizados con diferentes tipos de cementos presentes en el mercado ecuatoriano y precisar si alguno de los cementos presenta un mejor comportamiento para este tipo de hormigones.

Palabras clave: Hormigón Permeable, Cemento Hidráulico tipo GU, Cemento Portland Puzolánico tipo IP, Cemento Portland, Coeficiente de Permeabilidad, Resistencia a Compresión, Módulo de Ruptura.

## ABSTRACT

The multiple applications of permeable concrete provided by their infiltration properties have led to a significant increase in their use and development worldwide. Although in recent years a greater understanding of the influence of aggregates, additives and construction methods on the mechanical and filtration properties of permeable concrete has been achieved, little or no research has been done on the impact of the use of different Types of cements in the characteristics of permeable concrete. The following research sought to find the differences in the mechanical and filtration characteristics of similar permeable concrete specimens made with different types of cements present in the Ecuadorian market and to determine if any of the cements present a better behavior for this type of concrete.

Keywords: Permeable Concrete, GU Type Hydraulic Cement, Puzolanic Portland Cement Type IP, Portland Cement, Permeability Coefficient, Compression Resistance, Rupture Modulus.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción.....	19
a.	Antecedentes.....	19
i.	Definición.....	19
ii.	Historia.....	21
iii.	Aplicaciones.....	24
iv.	Beneficios Medioambientales.....	25
b.	Justificación.....	29
i.	Hormigón Permeable en Ecuador.....	29
ii.	Aplicaciones y Oportunidades.....	30
c.	Objetivos.....	33
i.	Objetivos Generales.....	33
ii.	Objetivos Específicos.....	33
2.	Desarrollo.....	35
a.	Caracterización de materiales.....	35
i.	Agregado.....	35
ii.	Densidad y Porcentaje de absorción.....	38
iii.	Granulometría.....	43
b.	Cemento.....	46

i.	Cemento Portland.....	46
ii.	Cemento Portland Puzolánico IP.....	49
iii.	Cemento Hidráulico.....	51
j.	Otros.....	53
i.	Microsílica.....	53
ii.	MasterRheobuild 1000.....	55
iii.	Agua.....	56
k.	Propiedades mecánicas Hormigón Permeable.....	57
i.	Resistencia a Compresión.....	58
i.	Resistencia a Flexión.....	73
b.	Permeabilidad.....	78
i.	Permeabilidad en concreto permeable.....	78
ii.	Coefficiente de Permeabilidad.....	83
iii.	Permeómetro.....	84
iv.	Dosificación.....	86
v.	Elaboración de especímenes.....	87
3.	Análisis de Resultados.....	97
a.	Observaciones sobre modo de falla de los especímenes.....	97
b.	Desarrollo de resistencia a compresión en tiempo de curado.....	99
c.	Relación entre porcentaje de vacíos y resistencia a compresión...	101

d.	Relación entre densidad y resistencia a compresión .....	103
e.	Relación entre constante de permeabilidad y resistencia a compresión 104	
f.	Evolución de la constante de permeabilidad en el tiempo de curado de los especímenes .....	107
g.	Relación entre constante de Permeabilidad y porcentaje de vacíos 109	
h.	Efecto del porcentaje de vacíos en la resistencia a flexión.....	109
i.	Relación entre resistencia a flexión y permeabilidad a los 28 días de curado	110
j.	Relación entre densidad y resistencia a flexión .....	111
k.	Relación entre resistencia a compresión y flexión .....	112
4.	Conclusiones y Recomendaciones .....	114
5.	Referencias .....	117
6.	Anexos .....	124

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE AGUA QUE PASA POR CONCRETO PERMEABLE (WINNER, 2000) .....	27
Tabla 2.1 REQUERIMIENTOS PARA AGREGADO GRUESO ASTM C33/33M-13.....	36
Tabla 2.2 PESOS DE AGREGADO GRUESO PARA OBTENCIÓN DE DENSIDAD.....	41
Tabla 2.3 ABSORCIÓN DE AGREGADO GRUESO .....	41
Tabla 2.4 DENSIDADES DE AGREGADO GRUESO.....	41
Tabla 2.5 PESOS DE AGREGADO FINO PARA OBTENCIÓN DE DENSIDAD.....	41
Tabla 2.6 ABSORCIÓN AGREGADO FINO .....	42
Tabla 2.7 DENSIDADES DE AGREGADO FINO.....	42
Tabla 2.8 REQUERIMIENTOS DE GRANULOMETRÍA PARA AGREGADO FINO ASTM C33-13.....	44
Tabla 2.9 GRANULOMETRÍA ESCOGIDA PARA LA ELABORACIÓN DE CILINDROS Y VIGAS DE HORMIGÓN PERMEABLE.....	44
Tabla 2.10 REQUERIMIENTOS DE COMPOSICIÓN PARA CEMENTO PORTLAND. ASTM C150M-12 .....	47
Tabla 2.11 REQUERIMIENTOS FÍSICOS PARA CEMENTOS HIDRÁULICOS. ASTM C1157M-11 .....	52

Tabla 2.12 COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO DE MEZCLAS SIN MICROSÍLICA Y CON 2% DE MASA DE CEMENTO (BASF, S.F) .....	55
Tabla 2.13 PROPIEDADES CONCRETO PERMEABLE (MEININGER,1988) .....	79
Tabla 2.14 CARACTERÍSTICAS DE ESPECÍMENES DE HORMIGÓN PERMEABLE (MULLIGAN, 2005).....	82
Tabla 2.15 DOSIFICACIÓN UTILIZADA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES .....	86
Tabla 2.16 Relación Agua-Cemento Final para Mezclas de Cemento Hidráulico .....	88
Tabla 2.17 Relación Agua/Cemento Finales para Mezclas con Cemento Puzolánico.....	89
Tabla 2.18 Relación Agua/Cemento Finales para Mezclas con Cemento Portland.....	89
Tabla 2.19 Porcentaje de vacíos de especímenes probados a los 28 días de curado .....	95
Tabla 2.20 Temperatura de mezclas con diferentes cementos.....	96

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 FOTOGRAFÍA HORMIGÓN PERMEABLE.....	21
Figura 1.2 CASA DE HORMIGÓN PERMEABLE .....	23
Figura 1.3 SUPERFICIE DE HORMIGÓN PERMEABLE EN BEIJING (PARA LOS JUEGOS OLÍMPICOS DE 2008 SE COLOCARON MÁS DE 250 MIL METROS CUADRADOS DE HORMIGÓN PERMEABLE EN LA CIUDAD) .....	25
Figura 1.4 ÁRBOLES RODEADOS DE CAMINERÍAS DE HORMIGÓN PERMEABLE .....	28
Figura 2.1 GRANULOMETRÍA DE PIEDRA 8 DE ACUERDO CON ASTM C33/33M-13.....	36
Figura 2.2 GRANULOMETRÍA DE PIEDRA 57 DE ACUERDO CON ASTM C33/33M-13.....	37
Figura 2.3 MÉTODO DE REDUCCIÓN DE MUESTRAS SEGÚN ASTM C702-11 .....	39
Figura 2.4 PESO SUMERGIDO SEGÚN ASTM C127-12.....	40
Figura 2.5 PESO SECO SEGÚN ASTM C127-12 .....	40
Figura 2.6 AGREGADO DESPUÉS DE SER SOMETIDO A LA PRUEBA DE ABRASIÓN EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.....	43
Figura 2.7 GRANULOMETRÍA AGREGADO GRUESO.....	45
Figura 2.8 GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO .....	45

Figura 2.9 GRANULOMETRÍA COMPLETA PARA CONCRETO PERMEABLE .....	45
Figura 2.10 CEMENTO PORTLAND BLANCO .....	48
Figura 2.11 CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO TIPO IP MARCA SELVALEGRE.....	50
Figura 2.12 RESISTENCIA DE CEMENTO SELVALEGRE VS ESTÁNDARES INEN 490.....	50
Figura 2.13: ReFigura 2.13 REQUERIMIENTOS FÍSICOS PARA CEMENTOS HIDRÁULICOS. ASTM C1157M-11 .....	53
Figura 2.14 RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON DIFERENTES TIPOS DE AGREGADO, (CROUCH,2006).....	59
Figura 2.15 RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON DIFERENTES TAMAÑO DE AGREGADO. (SCHAEFER,2006).....	60
Figura 2.16 RELACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON CANTIDAD DE CEMENTO. (ZOUAGHI ET AL, 2000).....	61
Figura 2.17 RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA DIFERENTES RELACIONES AGREGADO/CEMENTANTE) (AJAMU,2012) .....	61
Figura 2.18 RELACIÓN TÍPICA DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN VS RELACIÓN AGUA CEMENTO. (NEVILLE,2011) .....	62
Figura 2.19 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y RELACIÓN AGUA CEMENTO. (MEININGER,1988) .....	63

Figura 2.20 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y RELACIÓN AGUA/CEMENTO PARA DISTINTOS TIEMPOS DE CURADO. (MEININGER 1988).....	63
Figura 2.21 RELACIÓN ENTRE CANTIDAD DE AGREGADO FINO Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CONCRETO PERMEABLE. (MEININGER,1988).....	64
Figura 2.22 RELACIÓN ENTRE ENERGÍA DE COMPACTACIÓN Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN. (AOKI,2009).....	65
Figura 2.23 PESO UNITARIO PARA DISTINTOS MÉTODOS DE COMPACTACIÓN (AOKI,2009) .....	66
Figura 2.24 RELACIÓN ENTRE PORCENTAJE DE VACÍOS Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN (SCHAEFER,2006).....	67
Figura 2.25 RELACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS Y PESO UNITARIO. (MEININGER,1988) .....	67
Figura 2.26 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y DENSIDAD DE ACUERDO CON DIFERENTES AUTORES. (AOKI,2009) .....	68
Figura 2.27 DESARROLLO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CONCRETO PERMEABLE EN RELACIÓN A CONCRETO TRADICIONAL (AOKI,2009) .....	69
Figura 2.28 DESARROLLO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA MEZCLAS CON DIFERENTES PORCENTAJES DE VACÍOS. (AAMER,2012) .....	70

Figura 2.29 DESARROLLO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON TIEMPO DE CURADO. EL CURADO FUE ÚNICAMENTE COLOCANDO PLÁSTICO ALREDEDOR DE LOS ESPECÍMENES. (MULLIGAN, 2005).....	71
Figura 2.30 EFECTO DE LA ADICIÓN DE MICROSÍLICA EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS, BASADO EN SCHAEFER ET AL 2006. (YOUNG,2008) .....	72
Figura 2.31 RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA DOSIFICACIÓN CON DISTINTAS MEZCLAS DE CEMENTANTES (YOUNG,2008) .....	72
Figura 2.32 RESISTENCIA A FLEXIÓN VS TAMAÑO DE AGREGADO. (NEITHENALATH,2004).....	73
Figura 2.33 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y TRACCIÓN INDIRECTA CON DOS NIVELES DE COMPACTACIÓN (SULEIMAN, S.F).....	74
Figura 2.34 RELACIÓN ENTRE CANTIDAD DE AGREGADO FINO Y RESISTENCIA A FLEXIÓN PARA ESPECÍMENES DE HORMIGÓN PERMEABLE. (NEITHENALATH,2004).....	75
Figura 2.35 RELACIÓN ENTRE % DE VACÍOS Y RESISTENCIA A FLEXIÓN (JOUNG,2008) .....	76
Figura 2.36 INFLUENCIA ENTRE RESISTENCIA A FLEXIÓN Y % DE VACÍOS (NEITHENALATH,2004) .....	76
Figura 2.37 RESISTENCIA A FLEXIÓN PARA DISTINTOS TIPOS DE CEMENTANTE. (JOUNG,2008).....	77

Figura 2.38 INFLUENCIA DE LA UTILIZACIÓN DE MICROSÍLICA EN LA RESISTENCIA A FLEXIÓN (NEITHENALATH,2004) .....	78
Figura 2.39 RELACIÓN ENTRE COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD Y PORCENTAJE DE VACÍOS. (JOUNG,2008).....	78
Figura 2.40 RELACIÓN ENTRE PERMEABILIDAD Y PORCENTAJE DE POROSIDAD EN HORMIGÓN PERMEABLE (NEITHENALATH,2004) .....	79
Figura 2.41 RELACIÓN AGUA/CEMENTO CON COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD, BASADO EN MEININGER (1988).....	80
Figura 2.42 RELACIÓN ENTRE PERMEABILIDAD Y RELACIÓN AGREGADO/CEMENTO PARA DOS MÉTODOS DE COMPACTACIÓN (CHOPRA ET AL, 2007).....	80
Figura 2.43 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (CHOPRA ET AL, 2007).....	81
Figura 2.44 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (JOUNG,2008) .....	81
Figura 2.45 RELACIÓN ENTRE DENSIDAD, PERMEABILIDAD Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN. (NEPTUNE, 2010) .....	82
Figura 2.46 PERMEÓMETRO DE NEITHENALATH (NEITHENALATH, 2004) .....	84
Figura 2.47 Permeómetro utilizado para las obtener la constante de permeabilidad de los cilindros .....	85

Figura 2.48 MATERIAL UTILIZADO PARA ELABORACIÓN DE VIGUETAS DE HORMIGÓN PERMEABLE UTILIZANDO CEMENTO PORTLAND .....	86
Figura 2.49 Hormigón permeable fresco con cemento Portland .....	87
Figura 2.50 Concretera y dosificación para cilindros .....	87
Figura 2.51 Hormigón permeable con cemento Portland en concretera.....	88
Figura 2.52 Encofrados cilíndricos de 4"*8" .....	89
Figura 2.53 Especímenes encofrados de hormigón permeable .....	90
Figura 2.54 Cilindro de concreto permeable con cemento Hidráulico .....	91
Figura 2.55 Especímenes en Piscina de Curado a 21° C .....	91
Figura 2.56 Cilindros etiquetados de concreto permeable con cemento Puzolánico tipo IP.....	91
Figura 2.57 Revenimiento de mezcla de prueba con Cemento Portland ....	92
Figura 2.58 Obtención de porcentaje de vacíos por Norma ASTM C231M-14 .....	93
Figura 2.59 Obtención de porcentaje de vacíos de mezclas de prueba .....	93
Figura 2.60 Temperatura de mezcla de cemento hidráulico .....	96
Figura 2.61 Temperatura de mezcla de cemento Portland .....	96
Figura 3.1 Plano de falla de viga de hormigón permeable con cemento Portland .....	98
Figura 3.2 Falla de cilindro por rotura de agregado grueso .....	98

Figura 3.3 Agregado 3/8" con forma laminar .....	99
Figura 3.4 Desarrollo de resistencia a compresión con tiempo de curado	100
Figura 3.5 Relación entre porcentaje de vacíos y resistencia a compresión a los 28 días .....	102
Figura 3.6 Relación entre densidad de los especímenes y resistencia a compresión.....	103
Figura 3.7 Relación entre constante de permeabilidad y resistencia a compresión.....	104
Figura 3.8 Relación entre constante de permeabilidad y resistencia a compresión independiente del tiempo de curado .....	105
Figura 3.9 Aproximación lineal entre constante de permeabilidad y resistencia a compresión.....	106
Figura 3.10 Evolución de la constante de permeabilidad con el tiempo de curado .....	107
Figura 3.11 Aproximaciones lineales entre constante de permeabilidad y tiempo de curado.....	108
Figura 3.12 Efecto del porcentaje de vacíos en la constante de permabilidad .....	109
Figura 3.13 Relación entre porcentaje de vacíos y módulo de rotura a los 28 días .....	110

Figura 3.14 Relación entre resistencia a flexión y constante de permeabilidad a los 28 días .....	111
Figura 3.15 Relación entre densidad y módulo de rotura a los 28 días ....	111
Figura 3.16 Relación entre resistencia a compresión y flexión a los 28 días .....	112
Figura 3.17 Aproximación lineal entre resistencia a compresión y módulo de rotura a los 28 días.....	113

# 1. Introducción

## a. Antecedentes

### i. Definición.

De acuerdo con el Reporte sobre Concreto Permeable del Comité 522 del Instituto Americano del Concreto (ACI 522R-10) se describe al concreto permeable como un hormigón de altas prestaciones en el ámbito de permeabilidad. Este tipo de concreto se caracteriza por la ausencia o baja cantidad de agregados finos en su estructura, lo que permite un alto contenido de poros por los que puede circular un fluido. La elaboración de hormigón permeable cuenta con los mismos materiales que el hormigón tradicional: Cemento Portland, agregado pétreo natural o artificial, agua, y en algunos casos aditivos y/o cementantes adicionales, la diferencia radica en la granulometría del agregado, la cual suele ser discontinua y en su mayoría de casos no cumple los porcentajes límites establecidos por la norma ASTM C33-13 (Especificación Normalizada para Agregados para Concreto).

Las propiedades mecánicas más relevantes en el hormigón permeable son al igual que en concretos tradicionales: la resistencia a compresión, resistencia a flexión, con la adición de la constante de permeabilidad. Debido a su naturaleza con altos porcentajes de vacíos, el concreto permeable desarrolla resistencias a compresión y flexión muy inferiores a las de hormigones tradicionales; en compresión se suele obtener valores entre 3.5 y 28 MPa con valores típicos bordeando los 15 MPa, en flexión se esperan valores entre 1 y 3.8 MPa) (Tennis

et al., 2004). Con respecto a la permeabilidad, los valores de permeabilidad suelen variar entre 0.14 y 1.22 cm/s (ACI 522R-10,2010).

En el concreto permeable el porcentaje de vacíos suele variar entre 15 y 40 % dependiendo del empleo que se le dé al hormigón (Chopra et al., 2007). En este tipo de concreto la relación entre permeabilidad y resistencias a compresión y flexión suele ser inversa y causadas por la cantidad de espacios vacíos en la matriz del concreto; entre mayor porcentaje de vacíos, la permeabilidad de la muestra será mayor debido al tamaño y cantidad de canales formados por los poros, a su vez la resistencia a compresión y flexión disminuirá debido a que el área efectiva que resiste los esfuerzos disminuirá conforme aumenten los vacíos en la mezcla. Por este motivo, quizá el principal desafío al momento de desarrollar este tipo de hormigones yace en encontrar un balance entre las resistencias a compresión y flexión y la permeabilidad para cumplir las necesidades de cada proyecto. El sesgo hacia una mayor fortaleza en resistencia o permeabilidad dependerá de la aplicación del hormigón (ej: una vía necesitará mayores prestaciones en resistencia a compresión y flexión que una vereda, y el suelo de un invernadero o parque requerirá de mayor permeabilidad que un parqueadero).



*Figura 1.1 FOTOGRAFÍA HORMIGÓN PERMEABLE*

De la misma manera, la relación agua/cemento, nivel de compactación, relación agregado/cemento afectarán las propiedades mecánicas finales de la mezcla de hormigón permeable.

## **ii. Historia.**

El hormigón permeable ha sido utilizado para la construcción de edificaciones desde hace más de 150 años. En sus orígenes fue utilizado principalmente en Europa para casas de hasta dos pisos, las cuáles se realizaban únicamente con cemento Portland, agregado grueso y agua (Francis, 1965). Hasta principios del siglo XX la utilización de hormigón permeable continuó con moderado éxito, principalmente en Escocia e Inglaterra donde se realizaron varios proyectos inmobiliarios construidos en su totalidad o parcialmente con hormigón permeable.

El verdadero auge en la construcción de infraestructura con concreto permeable se dio a principios y mediados del siglo XX en Europa a causa de la Primera y Segunda Guerra Mundial, que devastaron al continente y lo dejaron en necesidad de una reconstrucción total. Durante este tiempo la utilización de este tipo de concreto se popularizó aún más en el Reino Unido y se expandió hacia Alemania, Holanda, Bélgica, Francia, España y otros países que fueron asolados por la guerra. Durante esta época se experimentó mucho con este concreto y se llegó a realizar edificios de hasta 10 pisos con hormigón permeable. Los motivos principales por los que se popularizó la utilización del concreto permeable en Europa son: en primer lugar debido a la alta relación agregado/cemento que se puede lograr con el hormigón permeable (se llega fácilmente a relaciones sobre 1:4) lo que se traduce en menor cantidad de material cementante por metro cúbico de concreto, y por lo tanto un menor costo. El uso de este concreto también aumentó debido al nuevo problema que enfrentaban algunas naciones europeas, principalmente Alemania con la cantidad de material de desecho (ladrillos, bloques rotos y escombros pétreos en general) producto de la destrucción de las ciudades. Se utilizó mucho de estos escombros para la realización de concreto permeable para edificación de estructuras en Europa continental y Reino Unido. (ACI 522-10R,2010)

El gran éxito que tuvo el concreto sin finos en Reino Unido se debió también a la gran cantidad de agregado grueso disponible y la falta de bloques de construcción de calidad. El mayor exponente de construcción en concreto

permeable en Reino Unido fue George Wimpey & Co quién desde 1940 ha construido más de 300 mil estructuras de baja altura. (The Concrete Society, s.f)



*Figura 1.2 CASA DE HORMIGÓN PERMEABLE*

Desde mediados del siglo XX la construcción con concreto sin finos se ha expandido desde Europa hacia Australia, Venezuela, Africa del Este y Medio Oriente (ACI 522-10R ,2010)

A partir de 1970 la utilización de concreto permeable se introdujo en el mercado estadounidense y a partir de esa época se ha popularizado en algunos estados de Estados Unidos, en Europa y Australia la utilización de hormigón permeable como sub base, base y superficie para vías de bajo tráfico, parqueaderos, parques, etc. En la actualidad este es la principal aplicación que se le da al concreto permeable.

### **iii. Aplicaciones.**

Hoy en día la utilización de hormigón permeable se ha expandido a nivel mundial, principalmente en naciones desarrolladas que se encuentran en la vanguardia de innovación en materiales para la construcción. En los últimos años se ha dado impulso a la utilización de concreto permeable como superficie para pavimentos, parqueaderos, veredas etc. Esto se debe a las propiedades de permeabilidad de este tipo de concreto que permite la filtración del agua de lluvia hacia el suelo, permitiendo la recarga de aguas subterráneas, control sobre agua de escorrentías en zonas de lluvias fuertes, control de inundaciones, reducción del efecto de “aqua-planning” al evitar la acumulación de agua en la superficie de rodadura, etc. Además, tiene mejores propiedades aislantes de calor y sonido frente al concreto tradicional por lo que disminuye el sonido por el paso de los vehículos y se calienta menos que el concreto tradicional y el asfalto que generalmente se utilizan para la pavimentación de vías.

Las aplicaciones más frecuentes de este tipo de hormigón son:

- Vías de bajo tráfico
- Parqueaderos
- Veredas
- Caminos de parques
- Drenes
- Suelos de invernaderos
- Estructuras costeras y paredes marítimas

- Sistemas de tratamiento de aguas negras
- Lechos de decantación de lodos
- Paredes para pozos de aguas subterráneas
- Arrecifes artificiales
- Muros de casas
- Canchas deportivas
- Paredes aislantes (acústico y térmico)



*Figura 1.3 SUPERFICIE DE HORMIGÓN PERMEABLE EN BEIJING (PARA LOS JUEGOS OLÍMPICOS DE 2008 SE COLOCARON MÁS DE 250 MIL METROS CUADRADOS DE HORMIGÓN PERMEABLE EN LA CIUDAD)*

#### **iv. Beneficios Medioambientales**

La utilización de concretos sin finos o permeables también ha experimentado un auge debido a las crecientes demandas de parte de organismos protectores del medioambiente sobre la introducción de materiales y métodos constructivos

amigables con el medio ambiente. La Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos promueve la utilización de hormigones permeables dentro de sus políticas de “Best Management Practice” (Mejores Prácticas Administrativas), de igual manera la utilización de este material es parte importante dentro del “Water Sensitive Urban Design” (Diseño Urbano Sensible con el Agua) australiano que busca generar una mejor calidad y cantidad de agua en el ambiente urbano. (Aoki, 2009).

Dentro de los primordiales beneficios al medioambiente de la elaboración de hormigón permeable se encuentra las altas relaciones agregado/cemento a las que se pueden llegar, lo que se traduce en menor cantidad de cemento por metro cúbico de hormigón fundido, esta disminución significa un ahorro importante en la cantidad de contaminación (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y NO) al medioambiente. “El sector del cemento es la tercera fuente de contaminación industrial a nivel mundial, emitiendo más de 500 mil toneladas de dióxido de azufre, óxido de nitrógeno y monóxido de carbono” (EPA, S.F). Esta industria aporta del 5 al 7 por ciento de los gases de invernadero producidos por el ser humano.

Otro beneficio medioambiental de la utilización de hormigones permeables es la disminución del efecto de “Islas Calientes” que se da por el bajo albedo que existe en las zonas urbanas, sobre todo en los pavimentos de asfalto que calientan las zonas aledañas, es por este motivo que las zonas urbanas son por lo general más calientes que las zonas rurales próximas.

Los pavimentos de concreto permeable sirven además de superficie de rodadura para vehículos, como sistema de tratamiento de aguas. Esto se da

debido a la de percolación del agua al atravesar la estructura porosa del hormigón. Al filtrarse por el hormigón, el agua se va “purificando”, perdiendo sólidos u otros fluidos contaminantes con los que pudo estar en contacto (ejemplo aceite de automotores, caucho de llantas quemado, etc). En Estados Unidos, existen normativas sobre la calidad del agua que ingresa a los sistemas fluviales, el hormigón permeable trata el agua de escorrentía de lluvia y la deja en un estado aceptable según las normas de la Agencia de Protección del Medio Ambiente.

**Table 7.1—Pollutant removal of porous pavement (Winer 2000)**

Pollutant	Pollutant removal, %*
TSS	95
TP	65
TN	82
NOx	NA
Metals	98 to 99
Bacteria	NA

\*Data based on fewer than five data points.

*Tabla 1.1 REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE AGUA QUE PASA POR CONCRETO PERMEABLE (WINNER, 2000)*

De igual manera, los pavimentos de hormigón permeable contribuyen de manera importante a la recarga de aguas subterráneas, y por lo tanto a un ecosistema saludable en la zona. Además, debido a la percolación del agua a través de este tipo de hormigones, el agua que ingresa al suelo es limpia y no contamina el suelo.

Debido a la filtración de agua que se da en el concreto sin finos, se evita el empozamiento de agua debido a lluvia, inundaciones, etc. Lo cual es una ventaja desde el punto de vista de salubridad; en muchos lugares, sobre todo tropicales

y subtropicales, los charcos de agua empozada se convierten en un caldo de cultivo de enfermedades, criadero de mosquitos, etc. las cuales se transmiten hacia los seres humanos, causando miles de enfermedades y muertes a nivel mundial.

Otra ventaja medioambiental que nos brinda la utilización de hormigones permeables es la posibilidad de sembrar una mayor cantidad de árboles en las zonas urbanas. Ya que el hormigón permite que el agua se filtre hacia las raíces de los árboles, permitiéndoles desarrollarse. La implantación de hormigones permeables para veredas y aceras podría catapultar la cantidad de árboles en zonas urbanas.



*Figura 1.4 ÁRBOLES RODEADOS DE CAMINERÍAS DE HORMIGÓN PERMEABLE*

## **b. Justificación**

### **i. Hormigón Permeable en Ecuador.**

En la actualidad no existe una industria de hormigón sin finos o permeable en el país. A pesar de que en el país el concreto es el material más utilizado dentro de la industria de la construcción, históricamente no se ha impulsado la investigación e implementación de hormigones con prestaciones no tradicionales (hormigones de alta resistencia a la compresión, abrasión, hormigones permeables, hormigones livianos, etc). Debido a esta falta de iniciativa existe un retraso en el país en lo referente a la tecnología del hormigón.

Esta falta de oferta de hormigones con prestaciones especiales también se traduce como un nicho en el mercado que espera por ser cubierto. Existe una gran oportunidad de negocios en la elaboración y desarrollo de hormigones no tradicionales, entre ellos el hormigón sin finos o permeable.

Esta ausencia de oferta de concreto permeable también se ha dado por la escasez de ingenieros civiles en el país dedicados a la rama de ciencia de materiales. Esta debilidad se ha visto acentuada por la falta de mano de obra calificada y de calidad en el país, que es un requisito fundamental en la elaboración de hormigones permeables, ya que la relación agua/cemento, la calidad de los materiales y el esfuerzo de compactación deben ser controlados muy estrictamente ya que una pequeña variación en estos se traduce en

diferencias importantes en las propiedades mecánicas de la mezcla (ACI 522-10R,2010)

## **ii. Aplicaciones y Oportunidades.**

Debido a la diversa geografía del país existen muchas aplicaciones posibles y oportunidades para utilizar este tipo de concreto en cada una de las zonas del país. Las principales aplicaciones en las que se podría utilizar este tipo hormigón en el país son:

Vías de tráfico liviano: Durante la última década, el gobierno ha dado un fuerte impulso a la expansión del sistema vial del país. El hormigón permeable se puede utilizar para la construcción de vías de tráfico liviano, como por ejemplo vías de segundo orden que comuniquen pueblos. También se puede utilizar como pavimento para zonas urbanas periféricas donde no exista tráfico pesado (circulación de buses, volquetas, etc.), También se puede utilizar como pavimento para las vías principales en pueblos.

La utilización de hormigón permeable como pavimento para vías puede cobrar principal importancia en zonas de la costa y oriente ecuatoriano donde existen inundaciones periódicas causadas por temporales como el fenómeno del niño o desbordamiento de ríos. Las propiedades de permeabilidad del pavimento de hormigón permeable pueden ayudar a mitigar el impacto de las inundaciones en las zonas donde son utilizados. A su misma manera evitarán la acumulación de agua en charcos, que por lo general se convierten en criaderos de mosquitos que transmiten enfermedades como Dengue y Malaria, que afectan a miles de

ecuatorianos cada año. La utilización de este tipo de pavimentos ayudaría a disminuir la cantidad de casos de estas enfermedades en la nación.

Una de las principales aplicaciones que se les da a los pavimentos de hormigón permeable a nivel mundial es como superficie de rodadura en parqueaderos, en Ecuador se podría utilizar de la misma manera para parqueaderos públicos, canchas y complejos deportivo, caminos en parques, veredas circundantes a piscinas e incluso como suelo para parques de camiones de comida, que en los últimos años han tomado fuerza en el país.

Ecuador es un país altamente agrícola, en 2014 la agricultura aportó con el 9.5 % del Producto Interno Bruto del país (Banco Mundial, 2015). Esta multibillonaria industria podría utilizar hormigones permeables para mejorar sus prácticas. Dentro de esta industria este tipo de concreto se podría utilizar para:

- Zonas de lavado de productos agrícolas
- Establos y zonas donde circulan animales de granja
- Zonas de secado, por ejemplo, se podría utilizar suelos de hormigón permeable para secar cacao, café, etc. este proveería una mejor ventilación a los productos agrícolas, disminuyendo la posibilidad de que se dañen.

También se podría utilizar suelos de concreto permeable en mercados para promover ambientes más salubres.

El hormigón permeable también se podría utilizar como método de tratamiento de aguas negras en zonas rurales, la utilización de este material

permitiría la filtración de agua limpia a los suelos y permitiría utilizar los restos sólidos como abono. Esto disminuiría la contaminación por aguas negras en zonas rurales y evitaría la llegada de estos contaminantes a cuerpos de agua, lo que es muy común en la actualidad.

Probablemente una de las maneras en las que se podría introducir el concreto permeable en el mercado ecuatoriano para tener mayor impacto sería a través del desarrollo e introducción de adoquines de hormigón permeable para su implementación en vías de conjuntos, pueblos, parques, etc. En el país existe la utilización de adoquines sigue siendo muy popular para vías de conjuntos privados, parques, vías principales y secundarias en pueblos y vías secundarias en ciudades. Al realizar adoquines prefabricados de hormigón permeable se logra superar la dificultad de una mano de obra poca calificada, ya que la colocación de adoquines es sencilla y común en el país. Además, al realizar módulos pequeños de este material se disminuye los esfuerzos a flexión a los que está sujeto el concreto, que es una de las principales dificultades en su implementación.

## **c. Objetivos**

### **i. Objetivos Generales.**

1- Analizar las propiedades de los agregados escogidos de la zona del distrito de Quito para la elaboración de hormigón permeable

2- Analizar los resultados de las propiedades mecánicas (compresión y flexión), así como la permeabilidad en el tiempo de los especímenes con diferentes tipos de cementos.

3-Comparar las propiedades mecánicas y su relación con la permeabilidad para cada uno de los cementos propuestos.

### **ii. Objetivos Específicos.**

- Elaborar 15 cilindros y 3 vigas con una dosificación predeterminada para 3 tipos de cementos presentes en el mercado ecuatoriano.
- Encontrar las principales propiedades de los agregados escogidos para la elaboración de los especímenes:
  - Densidad
  - Porcentaje de absorción
  - Resistencia a abrasión
- Realizar pruebas de compresión y permeabilidad de los especímenes a los 3, 7, 14 y 28 días y de flexión a los 28 días
- Encontrar cuál de los cementos propuestos presenta mejores propiedades para la realización de hormigón permeable

- Encontrar qué cemento provee de una mejor relación costo-propiedades mecánicas en concreto permeable

## **2. Desarrollo**

Las propiedades mecánicas de un espécimen de hormigón permeable, al igual que de un espécimen de concreto tradicional depende de varios factores (relación agua/cemento, esfuerzo de compactación, granulometría y calidad del agregado, relación agregado cemento, tiempo de curado, etc.). Estos elementos deben conocerse de antemano para poder realizar un análisis adecuado de los resultados obtenidos al probar los especímenes.

Por este motivo se realizó un análisis del agregado a utilizarse para realizar los cilindros y vigas, adicionalmente se realizó una revisión de literatura sobre los materiales a ser utilizados, las normas ASTM que se usarán para verificar la calidad de los materiales y para realizar y ensayar los especímenes. Además, se estudió publicaciones previas que se han realizado acerca de concreto permeable con el fin de sustentar la investigación y tener un punto de referencia sobre los resultados obtenidos.

### **a. Caracterización de materiales**

#### **i. Agregado.**

El agregado que se escogió para la elaboración de los especímenes de concreto permeable era el disponible en el laboratorio. El agregado utilizado era de origen ígneo y provenía una cantera ubicada en el sector de Pifo, aproximadamente a 20 kilómetros de la ciudad de Quito. Para la obtención del

material de los tamaños nominales preestablecidos se tamizó agregados de lotes de piedra con número 57 Y 8 según la norma ASTM C33/33M-13 (Especificación Estándar para Agregados para Concreto)

TABLE 3 Grading Requirements for Coarse Aggregates

Size Number	Nominal Size (Sieves with Square Openings)	Amounts Finer than Each Laboratory Sieve (Square-Openings), Mass Percent													
		100 mm (4 in.)	90 mm (3 1/2 in.)	75 mm (3 in.)	63 mm (2 1/2 in.)	50 mm (2 in.)	37.5 mm (1 1/2 in.)	25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (3/4 in.)	12.5 mm (1/2 in.)	9.5 mm (3/8 in.)	4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)	300 µm (No.50)
1	90 to 37.5 mm (3 1/2 to 1 1/2 in.)	100	90 to 100	...	25 to 60	...	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...	
2	63 to 37.5 mm (2 1/2 to 1 1/2 in.)	...	...	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...	
3	50 to 25.0 mm (2 to 1 in.)	...	...	...	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	
357	50 to 4.75 mm (2 in. to No. 4)	...	...	...	100	95 to 100	...	35 to 70	...	10 to 30	...	0 to 5	...	...	
4	37.5 to 19.0 mm (1 1/2 to 3/4 in.)	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	
467	37.5 to 4.75 mm (1 1/2 in. to No. 4)	...	...	...	...	100	95 to 100	...	35 to 70	...	10 to 30	0 to 5	...	...	
5	25.0 to 12.5 mm (1 to 1/2 in.)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 10	0 to 5	...	...	...	
56	25.0 to 9.5 mm (1 to 3/8 in.)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	40 to 85	10 to 40	0 to 15	0 to 5	...	...	
57	25.0 to 4.75 mm (1 in. to No. 4)	...	...	...	...	...	100	95 to 100	...	25 to 60	...	0 to 10	0 to 5	...	
6	19.0 to 9.5 mm (3/4 to 3/8 in.)	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 15	0 to 5	...	...	
67	19.0 to 4.75 mm (3/4 in. to No. 4)	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	...	20 to 55	0 to 10	0 to 5	...	
7	12.5 to 4.75 mm (1/2 in. to No. 4)	...	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	40 to 70	0 to 15	0 to 5	...	
8	9.5 to 2.36 mm (3/8 in. to No. 8)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 to 100	10 to 30	0 to 10	0 to 5	
89	9.5 to 1.18 mm (3/8 in. to No. 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	5 to 30	0 to 10	0 to 5
9 <sup>a</sup>	4.75 to 1.18 mm (No. 4 to No. 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 to 100	10 to 40	0 to 10	0 to 5

<sup>a</sup> Size number 9 aggregate is defined in Terminology C125 as a fine aggregate. It is included as a coarse aggregate when it is combined with a size number 8 material to create a size number 89, which is a coarse aggregate as defined by Terminology C125.

C33/C33M - 13

Tabla 2.1 REQUERIMIENTOS PARA AGREGADO GRUESO ASTM C33/33M-13

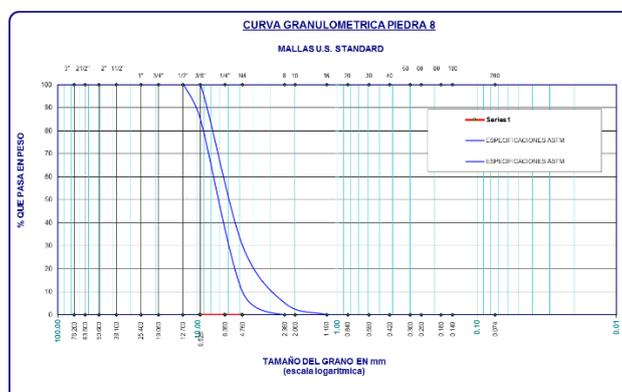


Figura 2.1 GRANULOMETRÍA DE PIEDRA 8 DE ACUERDO CON ASTM C33/33M-13



(Norma ASTM E11-09). Para la elaboración de los especímenes se utilizó agregado grueso de tamaño nominal de 3/8 de pulgada y 4 (3/16 de pulgada).

## **2. Agregado Fino.**

Se denomina a un agregado como fino, cuando su tamaño nominal es menor a 4.75 mm. Es decir que al realizar el análisis granulométrico de acuerdo a la norma ASTM C 136-06, todo el agregado debe pasar por el tamiz No 4. Para la elaboración de los especímenes se utilizó agregados finos de tamaños nominales: 8 (2.36 mm), y 30 (0.5 mm)

## **ii. Densidad y Porcentaje de absorción.**

Para realizar la dosificación de una mezcla se requiere conocer de antemano la densidad y el porcentaje de absorción de los agregados. Para encontrar estos valores se siguió los pasos establecidos por la norma ASTM C127-12 (Método de Ensayo Normalizado para Determinar la Densidad, la Densidad Relativa (Gravedad Específica), y la Absorción de Agregados Gruesos) y ASTM C 128-04 (Método de Ensayo Normalizado para Determinar la Densidad, la Densidad Relativa (Gravedad Específica), y la Absorción de Agregados Finos)

## **3. Agregado Grueso.**

Para encontrar la densidad y el porcentaje de absorción del agregado grueso se siguió el procedimiento establecido por la norma ASTM C127-12. En primer lugar, se tomó una muestra del lote de agregado disponible, de acuerdo a la

norma ASTM C702-11 (Práctica para la reducción de muestras de agregados a tamaños de ensayo.)

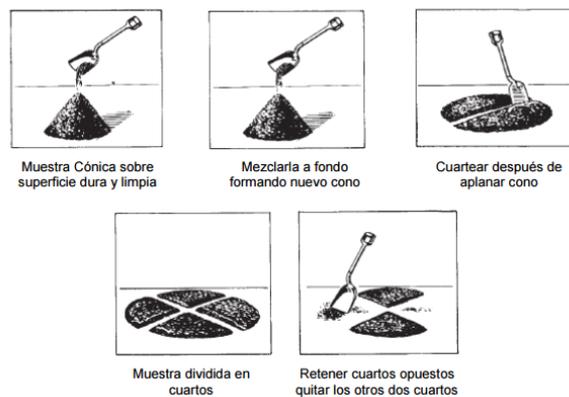


Figura 2.3 MÉTODO DE REDUCCIÓN DE MUESTRAS SEGÚN ASTM C702-11

Debido a que el tamaño nominal máximo utilizado era menor a 12.5 mm ó ½ de pulgada se tomó una muestra de 2 kilogramos de agregado grueso de tamaños nominales 3/8" y Número 4, lavados y secados previamente. A continuación, se colocó el material en agua durante 24 horas para que se sature. Luego se pasó el material a una bandeja donde se lo secó con toallas de papel hasta que la superficie de todo el agregado estuviese seca y se pesó el material con una balanza de con precisión de 0.5 g. A continuación, se pesó el material suspendido en un tanque con agua a 21.5° Celsius. Luego se colocó el material en una bandeja y se lo secó durante 24 horas a 110 +-5 °C. Finalmente se pesó el material seco.



Figura 2.4 PESO SUMERGIDO SEGÚN ASTM C127-12



Figura 2.5 PESO SECO SEGÚN ASTM C127-12

Para obtener los valores de las densidades y porcentaje de absorción se siguió la nomenclatura y fórmulas mostradas en la norma:

A= Masa de la muestra seca en horno

B= Masa Saturada Seca

C= Masa aparente sumergida en agua

$$OD = 997.5 * A / (B - C)$$

Densidad Sumergida:

$$SSD = 997.5 * B / (B - C)$$

Densidad Aparente

$$997.5 * A / (A - C)$$

$$\% \text{ Absorción} = ((B - A) / A) * 100$$

<b>ASTM C127 Agregado Grueso</b>			
A	MASA SECA	2000	gr
B	MASA SATURADA	2042	gr
C	MASA SUMERGIDA EN AGUA	1242	gr

Tabla 2.2 PESOS DE AGREGADO GRUESO PARA OBTENCIÓN DE DENSIDAD

<b>Absorción</b>	<b>2.10%</b>
------------------	--------------

Tabla 2.3 ABSORCIÓN DE AGREGADO GRUESO

OD	2487.5	gr/cm <sup>3</sup>
SSD	2539.7375	gr/cm <sup>3</sup>
AD	2625.3298	gr/cm <sup>3</sup>

Tabla 2.4 DENSIDADES DE AGREGADO GRUESO.

#### 4. Agregado Fino.

Para obtener la densidad y el porcentaje de absorción del agregado fino se siguió los procedimientos dictados en la norma ASTM C128-04. Esta norma sigue los mismos pasos que la norma ASTM C127-12, diferenciándose en la forma en la que se encuentra los pesos saturados superficialmente secos y peso aparente.

Los valores de densidad y porcentaje de absorción para el agregado fino se muestran en las tablas siguientes

<b>ASTM C128 Agregado Fino</b>			
A	MASA SECA	2000	gr
B	MASA SATURADA	2106	gr
C	MASA SUMERGIDA EN AGUA	1285	gr

Tabla 2.5 PESOS DE AGREGADO FINO PARA OBTENCIÓN DE DENSIDAD

<b>Absorción</b>	<b>5.30%</b>
------------------	--------------

*Tabla 2.6 ABSORCIÓN AGREGADO FINO*

OD	2423.8733
SSD	2552.3386
AD	2783.2168

*Tabla 2.7 DENSIDADES DE AGREGADO FINO*

### **5. Resistencia a Abrasión.**

Se obtuvo la resistencia a abrasión del agregado a través del procedimiento dictado en la norma ASTM C 131-06 (Método de prueba estándar para la resistencia a la degradación del agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles).

Siguiendo la norma, se escogió la granulometría tipo D (5 kilogramos de agregado retenido en el tamiz 8) y se lo colocó con 6 bolas de acero normadas durante 500 revoluciones, tras lo que a falta de tamiz 12 en el laboratorio se utilizó tamiz número 10 para separar el material degradado (pasante del tamiz) frente al material no degradado (material retenido en el tamiz). Esta prueba se utiliza para conocer la calidad del agregado y se mide a la degradación del material como el porcentaje perdido por degradación.



*Figura 2.6 AGREGADO DESPUÉS DE SER SOMETIDO A LA PRUEBA DE ABRASIÓN EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES*

Los resultados obtenidos se describen a continuación

- Peso material inicial 5000 gramos
- Peso material retenido en el tamiz #10 después de 500 revoluciones: 3748 gramos
- Peso material pasante del tamiz #10 después de 500 revoluciones en la máquina de Los Ángeles: 1252 gramos
- Porcentaje de abrasión del agregado: **25.04%**

### **iii. Granulometría.**

Debido a que el propósito de la investigación se enfocaba en el impacto que tiene la utilización de diferentes tipos de cemento disponibles en el mercado ecuatoriano para el desarrollo de concreto permeable, se mantuvieron las otras variables constantes, entre estas la granulometría. Se escogió una granulometría que constaba de agregado grueso y fino de 4 tamaños nominales diferentes

Los límites superiores e inferiores para las curvas granulométricas se tomaron de la norma ASTM C33-13. Esta provee los límites del porcentaje pasante de cada tamaño nominal de agregado para que puede utilizarse para la elaboración de concreto tradicional.

TABLA 1 REQUERIMIENTO DE GRANULOMETRÍA PARA AGREGADO FINO

TAMIZ (Especificación E11)		Porcentaje Pasante	
9.5mm	3/8 in		100
4.75mm	No.4		95-100
2.36mm	No.8		80-100
1.18mm	No.16		50-85
600µm	No.30		25-60
300µm	No.50		may-30
150µm	No.100		0-10
75µm	No.200		0-3

Tabla 2.8 REQUERIMIENTOS DE GRANULOMETRÍA PARA AGREGADO FINO ASTM C33-13

El tamaño nominal máximo para el agregado debe estar basado en el criterio del espesor del elemento de concreto y el espaciamiento entre el refuerzo de acero, el cual de acuerdo a la norma debe ser menor a la tercera parte de la dimensión menor del encofrado y también debe ser menor al espaciamiento entre los refuerzos para que el agregado pueda pasar libremente entre el refuerzo.

Granulometría escogida para Cilindros y Vigas				
Tamiz	Abertura (mm)	% Peso Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante
3/8	9.50	49.00%	49.00%	51.00%
4	4.75	36.00%	85.00%	15.00%
8	2.36	10.00%	95.00%	5.00%
30	0.60	5.00%	100.00%	0.00%

Tabla 2.9 GRANULOMETRÍA ESCOGIDA PARA LA ELABORACIÓN DE CILINDROS Y VIGAS DE HORMIGÓN PERMEABLE

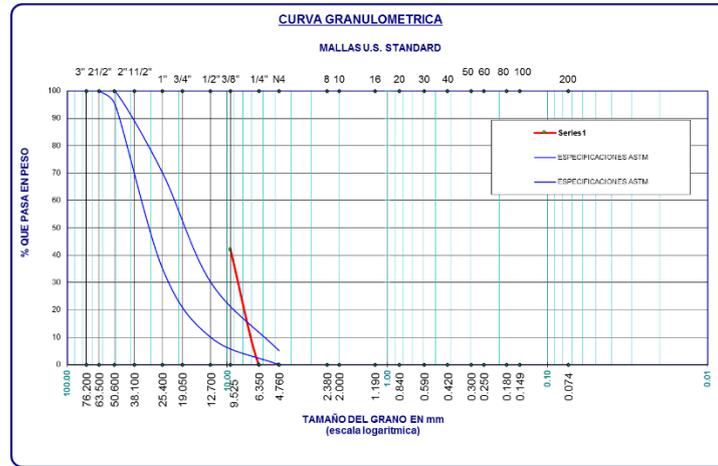


Figura 2.7 GRANULOMETRÍA AGREGADO GRUESO

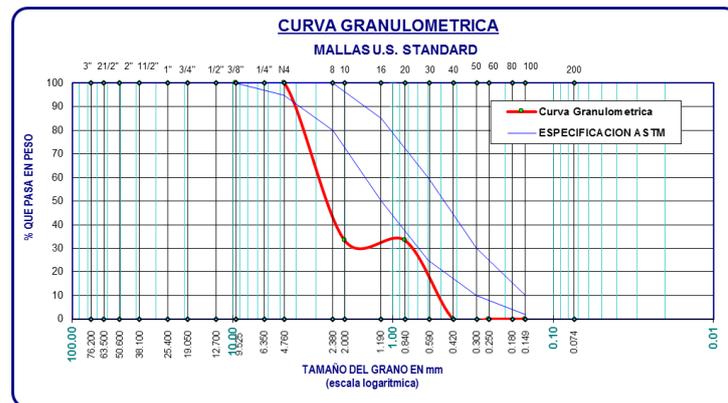


Figura 2.8 GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO

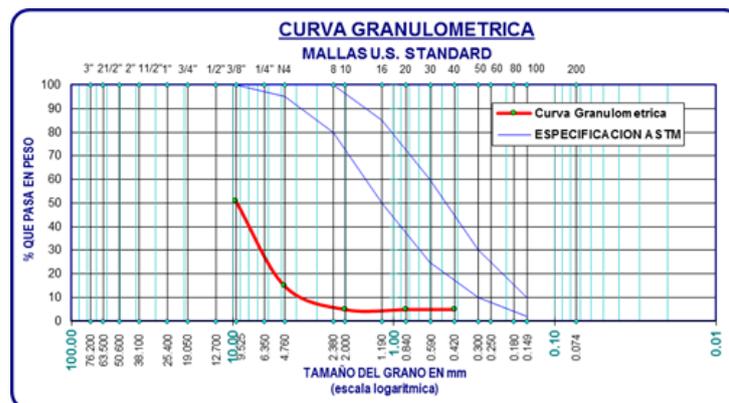


Figura 2.9 GRANULOMETRÍA COMPLETA PARA CONCRETO PERMEABLE

## **b. Cemento**

Dentro del ámbito de la construcción se define como cemento hidráulico a aquellos materiales constituidos principalmente por silicatos y aluminatos que al ser mezclados con agua, generan una reacción química exotérmica que resulta en el endurecimiento de la mezcla. (Neville, 2011) En la actualidad existen varios tipos de cementos hidráulicos; los principales son el cemento Portland y otros cementos compuestos, productos de la mezcla de cemento Portland con otros materiales cementantes.

La variable con la que se experimentó en este estudio fue el cemento. El mercado ecuatoriano tiene la peculiaridad de que, a diferencia de la mayoría de países, el cemento Portland no es el más utilizado. Los principales tipos de cementos producidos y utilizados en el país son cementos Portland Puzolánicos y cementos hidráulicos. Debido a la dificultad de encontrar cemento Portland producido en el país para la investigación se utilizó cemento Portland importado.

### **i. Cemento Portland.**

El cemento Portland es en la actualidad y ha sido a través de la historia el cemento más utilizado para construcción. El cemento Portland es el que se suele utilizar como cemento estándar para las investigaciones relacionadas con el desarrollo de concreto por la mayoría de autoridades sobre el hormigón, como el Instituto Americano del Concreto, etc.

El cemento Portland es el producto de la calcinación de piedras calcáreas a una temperatura cercana a los 1450° Celsius. Este proceso da como resultado

una especie de esferas denominadas Clinker, que están formadas por 4 materiales cementantes principales. La cantidad de cada uno de estos cementantes es lo que define al cemento Portland. Este cemento está normado bajo la ASTM C150M-12 “Especificación Estándar para Cemento Portland”. Esta pauta establece los límites y propiedades físicas y químicas que debe cumplir un cemento para poder llamarse cemento Portland. Por definición este cemento no debe contener más de un 5 % de materiales distintos a Clinker de cemento Portland.

TABLA 1 Requisitos estándares de la composición

Tipo de cemento <sup>a</sup>	Método de ensayo aplicable	I y	II y	III y	IV	V
Óxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), máx., %	C 114		6.0	III A		
Óxido férrico (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), máx., %	C 114		6.0 <sup>b</sup>		6.5	
Óxido de magnesio (MgO), máx., %						
Tríóxido de sulfuro (SO <sub>3</sub> ), <sup>d</sup> máx., %	C 114	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Cuando (C,A) <sup>e</sup> es 8 % o menos	C 114					
Cuando (C,A) <sup>e</sup> es más del 8 %		3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
Pérdida por ignición, máx., %		3.5	<sup>f</sup>	4.5	<sup>f</sup>	<sup>f</sup>
Residuo insoluble, máx., %	C 114	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0
Silicato tricálcico (C <sub>3</sub> S) <sup>g</sup> , máx., %	C 114	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Silicato dicálcico (C <sub>2</sub> S) <sup>g</sup> , min., %	Vea anexo A1				35 <sup>h</sup>	
Aluminato tricálcico (C <sub>3</sub> A) <sup>g</sup> , máx., %	Vea anexo A1				40 <sup>h</sup>	
Suma de C <sub>3</sub> S + 4.75C <sub>3</sub> A <sup>g</sup> , máx., %	Vea anexo A1		8	15	7 <sup>h</sup>	5 <sup>c</sup>
Aluminoferrato tetracálcico más dos veces aluminato tricálcico (C <sub>4</sub> AF + 2(C <sub>3</sub> A)), o solución sólida (C <sub>4</sub> AF + C <sub>3</sub> F), cuando sea aplicable, máx., %	Vea anexo A1		100 <sup>h</sup>			25

<sup>a</sup> Vea Nota 2.

<sup>b</sup> No se aplica cuando se especifica el límite de calor de hidratación en la Tabla 4.

<sup>c</sup> No se aplica cuando se especifica el límite de resistencia a sulfatos en la Tabla 4.

<sup>d</sup> Existen casos donde el óptimo SO<sub>3</sub> (usando el Método de ensayo C 563) para un cemento particular es cercano o excede el límite en esta especificación. En tales casos donde las propiedades de un cemento pueden ser mejoradas excediendo los límites de SO<sub>3</sub> establecidos en esta tabla, se permite exceder los valores de la tabla con la condición de que se demuestre con el Método de ensayo C 1038 que el cemento con aumento de SO<sub>3</sub> no desarrollará una expansión en el agua superior al 0.020% a los 14 días. Cuando el fabricante provea cemento bajo esta provisión, debe, según pedido, suministrar datos de respaldo al comprador.

<sup>e</sup> Vea Anexo A1 para cálculo.

<sup>f</sup> No es aplicable.

<sup>g</sup> Vea Nota 4.

<sup>h</sup> Además, debe ser realizado un ensayo de calor de hidratación a los 7 días por el Método de Ensayo C 186, como mínimo una vez cada seis meses. Tal ensayo no debe ser usado para aceptación o rechazo del cemento pero los resultados deben ser informados como información.

Tabla 2.10 REQUERIMIENTOS DE COMPOSICIÓN PARA CEMENTO PORTLAND. ASTM C150M-12

La norma cubre 10 tipos diferentes de cementos Portland, dependiendo de su composición química y su aplicación:

Tipo I: uso general

Tipo IA, Tipo I con propiedades de absorción de aire en el concreto

Tipo II, Cemento con resistencia moderada a sulfatos

Tipo IIA, con absorción de aire en el concreto

Tipo II (MH) Tipo II con moderado calor de hidratación

Tipo II(MH)A Tipo II con moderado calor de hidratación y absorción de aire en el concreto

Tipo III, Cemento con alta resistencia temprana

Tipo IIIA, Cemento tipo II con absorción de aire

Tipo IV, Cemento con bajo calor de hidratación

Tipo V, Cemento con alta resistencia a sulfatos

El cemento Portland utilizado para la elaboración de los especímenes fue cemento Portland tipo I, marca Tolteca de origen mexicano.



Figura 2.10 CEMENTO PORTLAND BLANCO

## **ii. Cemento Portland Puzolánico IP.**

Existen además del cemento Portland otros cementos hidráulicos que son producto de la combinación de cemento Portland y otros materiales cementantes. A este tipo de cementos se les denomina cementos compuestos y están regidos por la norma ASTM C595-14 “Especificación Normalizada para Cementos Adicionados Hidráulicos”. Esta norma involucra a los cementos que están conformados por cemento Portland y piedra caliza, puzolanas o escorias de altos hornos. Los porcentajes permisibles en los que se puede mezclar cada uno de estos cementantes con el cemento Portland está especificado en la norma y dan cementos hidráulicos con distintas denominaciones:

Los 4 tipos principales de cementos adicionados hidráulicos tratados en la norma son los siguientes:

Tipo IS: Cemento Portland con escorias de altos hornos

Tipo IP: Cemento Portland con puzolanas

Tipo IL: Cemento Portland con Caliza

Tipo IT: Cemento mezclado ternario

Para la elaboración de los especímenes de concreto permeable se utilizó cemento Portland Puzolánico Tipo IP ya que este tipo de cemento es uno de los más utilizados en el país. Esto se debe a la condición de Ecuador dentro de una

zona muy volcánica donde se encuentran grandes yacimientos de puzolanas de origen volcánico. Varias de las principales cementeras en el país como la Empresa Pública Cementera (Cemento Chimborazo) y UNACEM (Cemento Selvalegre) producen cementos Portland tipo IP. De acuerdo a la norma ASTM C595-14 el cemento tipo IP puede contener hasta máximo 40% en peso de puzolanas, el resto debe ser compuesto por cemento Portland. El cemento utilizado fue de la cementera UNACEM, de marca Selvalegre.



Figura 2.11 CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO TIPO IP MARCA SELVALEGRE

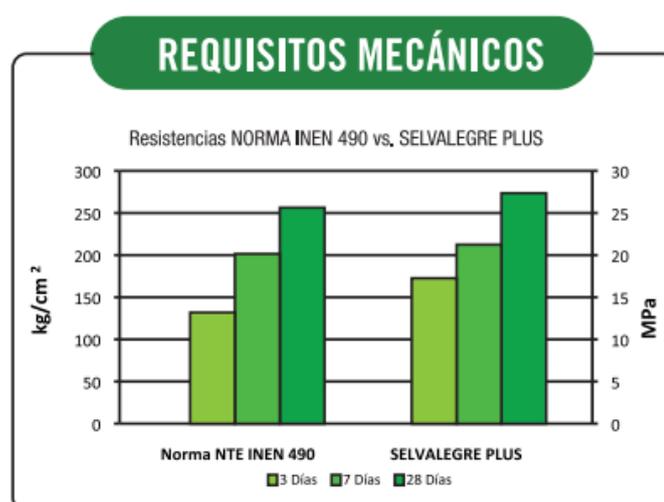


Figura 2.12 RESISTENCIA DE CEMENTO SELVALEGRE VS ESTÁNDARES INEN 490 (Unacem,s.f)

### iii. Cemento Hidráulico.

El último tipo de cemento utilizado para la elaboración de especímenes de hormigón permeable fue cemento hidráulico tipo GU. Este tipo de cementos entra en la categoría de cementos hidráulicos, regida por la norma ASTM C1157M-11 “Especificación Normalizada de Desempeño para Cementos Hidráulicos” Esta norma no establece lineamientos acerca de la composición química del cemento, más bien como su nombre lo indica se guía por el desempeño de la mezcla fraguada del mortero de cemento hidráulico.

Los tipos de cemento tratados en esta especificación son:

Tipo GU: Cemento hidráulico para uso general en construcción

Tipo HE: Cemento Hidráulico de alta resistencia temprana

Tipo MS: Cemento Hidráulico con moderada resistencia a los sulfatos

Tipo HS: Cemento Hidráulico de alta resistencia a los sulfatos

Tipo MH: Cemento Hidráulico de moderado calor de hidratación

Tipo LH: Cemento Hidráulico de bajo calor de hidratación

Los requerimientos básicos que deben cumplir los cementos hidráulicos se especifican en la tabla 1 de la norma

Tabla 1 Requerimiento físicos estándar

Tipo de Cemento	Método de prueba Aplicable	GU	HE	MS	HS	MH	LH
Finura	C 204 O C430						
Cambio de longitud máxima% en autoclave	C151	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
tiempo de fraguado prueba de Vicat Inicial, no menos que en minutos	C191	45	45	45	45	45	45
Inicial, no más que en minutos		420	420	420	420	420	420
Contenido de aire en mortero % max en volumen	C185	12	12	12	12	12	12
Resistencia a compresión Mpa(psi)	C109/C109M						
1 día			12				
3 días		13.0(1980)	24(3480)	11(1600)	11(1600)	5(725)	
7 días		20(2900)		18(2610)	18(2610)	11(1600)	11(1600)
28 días		28(4060)			25(3620)		21(3050)
Calor de hidratación	C196					290(70)	250(60)
7 días máximo kJ/kg (kcal/kg)							290(70)
28 días máximo (kcal/kg)							
Expansión del mortero	C1038	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
14 días % máximo							
expansión por sulfatos (resistencia a sulfatos)	C1012						
6 meses % max			0.1	0.06			
1 año % max				0.1			

Tabla 2.11 REQUERIMIENTOS FÍSICOS PARA CEMENTOS HIDRÁULICOS. ASTM C1157M-11

El cemento hidráulico utilizado para la elaboración de las viguetas y cilindros fue tipo GU de la compañía HOLCIM

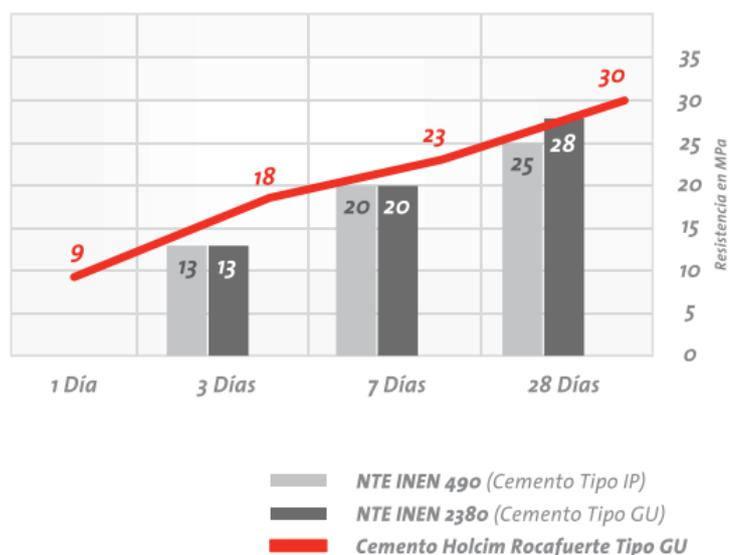


FIGURA 2. 13: Figura 2.13 REQUERIMIENTOS FÍSICOS PARA CEMENTOS HIDRÁULICOS. ASTM C1157M-11 (Holcim,s.f)

## j. Otros

### i. Microsílica.

La microsíllica o polvo de sílice es un cementante artificial, constituido principalmente por dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y que se da como subproducto de la manufactura de chips y otros elementos de silicio. La microsíllica es altamente reactiva con el hidróxido de calcio por lo que se suele utilizar como suplemento de una porción del cemento para mejorar algunas propiedades del concreto. El tamaño de las partículas de polvo de sílice más de diez veces más pequeñas que las partículas de cemento, lo que le permite ocupar los vacíos que

generalmente quedan en el concreto fresco, de esta manera se logra aumentar la resistencia. La utilización de microsílica altera varias características tanto del hormigón fresco, como del concreto endurecido como por ejemplo: (Neville, 2011)

- En hormigón Fresco
  - Menor trabajabilidad, se recomienda la utilización de superplastificantes para dosificaciones con relaciones bajas de agua/cementantes
  - Menor sangrado con respecto a una mezcla de hormigón tradicional
  - Mayor cohesión con respecto al concreto tradicional
  - Mayor riesgo de fisuración al momento del fraguado de la mezcla
  
- En hormigón Endurecido
  - Mayor resistencia temprana a compresión y flexión
  - Mayor resistencia a los 28 días para mezclas con baja relación de agua/cementantes
  - Menor porcentaje de vacíos con respecto a una mezcla similar sin microsílica
  - Mayor resistencia a sulfato y reacción Alkali-Silica
  - Mayor durabilidad
  - Menor permeabilidad

- Se recomienda un tiempo de curado mayor para especímenes con polvo de sílice debido a la baja permeabilidad de los mismos.

El polvo de sílice utilizado provenía de la compañía BASF y su nombre comercial es RHEOMAC 300 D.

#### Datos técnicos típicos del aditivo RHEOMAC 300D @ 2% por peso del cemento

<i>Características de desempeño</i>	<i>Método de ensayo</i>	<i>Desempeño en comparación a una mezcla de concreto sin tartar</i>
Absorción capilar	ASTM C 1585	43% reducción
Penetración de agua	DIN 1048 Modificada	40% reducción
Índice de emisión de Vapor	ASTM F 1869	Igual
Conducción eléctrica	ASTM C 1202	Igual
Resistencia a la compresión	ASTM C 39/C 39M	7% de aumento

Tabla 2.12 COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO DE MEZCLAS SIN MICROSÍLICA Y CON 2% DE MASA DE CEMENTO (BASF, S.F)

## ii. MasterRheobuild 1000.

Para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla de concreto permeable y obtener la trabajabilidad deseada se utilizó un aditivo plastificante. La adición de este plastificante se decidió previo al conocimiento de que el concreto permeable por sus características inherentes tienen muy baja trabajabilidad, por lo que el trabajo de encofrado y vibrado de la mezcla se puede dificultar y tener como consecuencias especímenes de baja calidad.

Se escogió el aditivo plastificante MasterRheobuild 1000 de la empresa BASF por razones de disponibilidad en el laboratorio y porque además cumplía con los requerimientos de desempeño y de disponibilidad (se buscaba realizar una mezcla con materiales disponibles en el mercado ecuatoriano).

“MasterRheobuild 1000 es un aditivo superplastificante reductor de agua de alta actividad indicado para los sectores del hormigón prefabricado, obra civil y hormigón para túneles (hormigón proyectado y hormigonado de túneles). Por sus características, permite la confección de hormigones líquidos partiendo de consistencias secas sin la necesidad de adicionar más agua de amasado y sin provocar retrasos de fraguado, ofreciendo elevadas resistencias iniciales sin pérdida de resistencias finales.” (BASF, 2014)

Basf recomienda la utilización del superplastificante en una dosificación de entre 0.8 y 2% del peso del cemento utilizado.

### **iii. Agua.**

El agua de mezcla es uno de los elementos más importantes en la fabricación de concreto. Esta reacciona con los cementantes para crear la pasta de cemento que posteriormente fraguará dando a lugar al hormigón endurecido. De acuerdo con Neville, el agua de mezcla para concreto no debe contener sustancias orgánicas, ni debe ser salina. Por lo general se considera aceptable agua potable con entre 6 y 8, también se puede utilizar agua que no sea potable, mientras

esta no tenga sustancias orgánicas, ni otro tipo de sustancias que puedan afectar el desempeño del concreto. Por lo general para comprobar si el agua de una fuente es apta para la realización de hormigón, se realiza dos mezclas gemelas utilizando en una agua potable o destilada y en la otra el agua proveniente de la fuente que se quiere probar, si los resultados de resistencia de los especímenes varían en menos de 10% se considera al agua apta para realizar concreto. (Neville,2011)

La norma que rige la calidad del agua de mezcla para concreto es la ASTM C1602/C1602M-06 “Especificación Estándar para Agua de Mezcla para Uso en la Producción de Concreto de Cemento Hidráulico”. Esta norma especifica que se considera como agua de mezcla a:

- Agua pesada en la balanza o unidad dosificadora de planta
- Hielo
- Agua añadida por el operador de la mezcladora
- Agua contenida en los agregados
- Agua presente en los aditivos

Para la elaboración de los especímenes de hormigón permeable se utilizó agua potable proveniente del sistema de agua potable de la ciudad.

## **k. Propiedades mecánicas Hormigón Permeable**

Las propiedades mecánicas que alcanza un espécimen de concreto, tradicional o permeable, dependerá de la dosificación de la mezcla y de los

métodos utilizados para la elaboración de los elementos de concreto. “La permeabilidad y resistencia del hormigón permeable dependen del tamaño nominal del agregado y de las proporciones de los materiales constituyentes del concreto” (Ajamu,2012)

## **i. Resistencia a Compresión**

Uno de los principales indicadores del desempeño de un espécimen de hormigón permeable es su resistencia a compresión. Debido a su estructura con un alto porcentaje de vacíos, el hormigón permeable suele tener resistencias a compresión mucho menores que el concreto tradicional.

“Mientras que el concreto tradicional tiene resistencias a compresión entre 3000 y 5000 psi y resistencias a tensión entre 350 y 600 psi (Wang et al, 2007), el concreto permeable tiene resistencia a compresión que típicamente van entre 500 y 4000 psi y resistencias a tensión entre 150 y 550 psi (Tennis et al, 2004), sin embargo, es posible lograr hormigones permeables de mayores resistencias. Yang y Jiang reportaron concretos permeables con resistencias a compresión y tensión tan altas como 7200 psi y 870 psi, respectivamente, esto se logró utilizando 2 aditivos, microsíllica y superplastificantes(Young y Jiang, 2003)” (Goede,2009)

### **1. Agregado Grueso.**

El tipo de agregado tiene una gran influencia en la resistencia a compresión del concreto permeable. Si bien en mezclas de hormigón tradicionales se considera a la resistencia de los agregados como factor determinante para la

resistencia final a compresión de los elementos de concreto, en mezclas de concreto permeable, la calidad de los pétreos puede llegar a tener aún más influencia en la resistencia final del concreto “Sin embargo, en concreto permeable la pasta de cemento es limitada y el agregado depende de las superficies de contacto entre sí para la resistencia. Por lo tanto, un agregado más fuerte como granito o cuarzo, produciría mayor resistencia a compresión que un agregado más suave como caliza” (Mulligan, 2005)

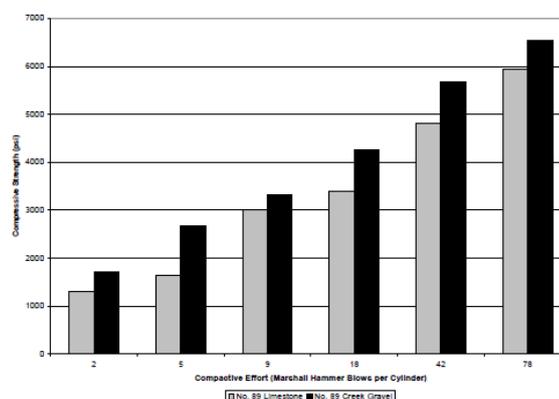


Figure 5. The Effect of Aggregate Shape, Texture and Compactive Effort on Compressive Strength of Lab Compacted Pervious PCC with No. 89 Aggregate

*Figura 2.14 RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON DIFERENTES TIPOS DE AGREGADO, (CROUCH,2006)*

La resistencia a compresión que desarrollará un espécimen de concreto permeable también dependerá de la forma y el tamaño del agregado. De acuerdo con Neville, “Partículas con forma de escamas o elongadas deben ser evitadas. La utilización de agregado triturado con bordes triturados no es recomendada ya que se puede dar aplastamiento local del agregado con la carga.” (Neville,2011)

En relación con el tamaño del agregado, la utilización de agregados con menor tamaño nominal conduce a mayores resistencias a compresión y menor permeabilidad (Yang y Jiang, 2002)

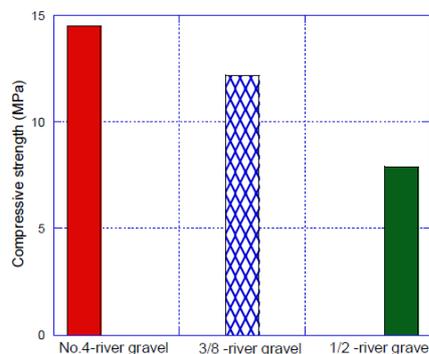


Figure 9 Effect of coarse aggregate size on compressive strength of pervious concrete, after Schaefer et al. (2006).

*Figura 2.15 RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON DIFERENTES TAMAÑO DE AGREGADO. (SCHAEFER,2006)*

La resistencia a compresión del concreto permeable también depende de la forma del agregado: “El concreto permeable consiste en partículas de agregado cubiertas por mortero y unidas por pequeñas áreas de contacto. La carga es transferida a través del mortero al agregado y a las otras partículas, y la resistencia está significativamente influenciada por la unión entre el mortero y el agregado. Agregados angulares con textura áspera tienen mejores características de unión que agregados lisos” (Kevern, 2008). Por lo tanto, se esperaría que agregados con textura áspera desarrollen mayores resistencias a compresión que agregados lisos debido a la mejor unión que desarrollan con el mortero. Sin embargo, Tennis en colaboración con otros investigadores defiende que la utilización de agregados redondeados resulta en mayores resistencias a compresión (Tennis et al, 2004)

## **2. Relación Agregado/Cementante.**

La relación agregado cementante tiene un impacto directo en la resistencia a compresión de los especímenes de concreto permeable. Entre menor sea la

relación agregado/cementante, existirá mayor pasta de cemento en el elemento, lo que se traducirá en una mayor resistencia a compresión. (Mulligan, 2005)

La resistencia a compresión aumenta exponencialmente con el aumento de cementante en la matriz del concreto (Zouaghi et al, 2000)

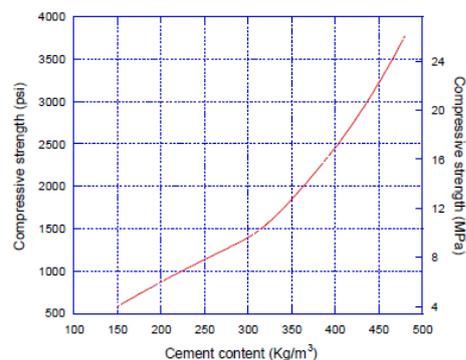


Figure 6 Relationship between compressive strength and cement content, after Zouaghi et al. (2000).

Figura 2.16 RELACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON CANTIDAD DE CEMENTO. (ZOUAGHI ET AL, 2000)

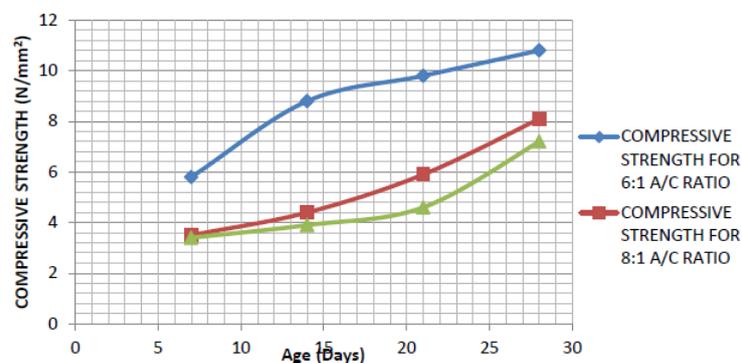


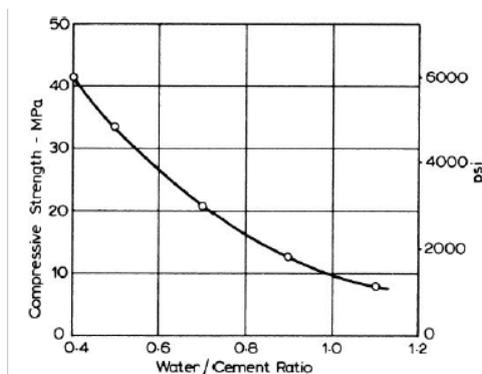
Figure 5: Compressive Strength of Pervious concrete of 3/8" Aggregate size at different Aggregate-Cement Ratio

Figura 2.17 RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA DIFERENTES RELACIONES AGREGADO/CEMENTANTE) (AJAMU,2012)

Ghafoori experimento con diferentes relaciones de agregado/cementantes y concluyó que la relación ideal para lograr un buen balance entre resistencia a compresión y permeabilidad en especímenes de concreto permeable se encuentra entre 4:1 y 4.5:1. (Ghafoori, 1995)

### 3. Relación Agua/Cemento.

Si bien para mezclas de hormigón permeable, la relación agua/cemento tiene un impacto directo e importante en la resistencia final a compresión de los especímenes, esta no sigue el mismo comportamiento que en hormigones tradicionales, donde se suelen obtener por regla general mayores resistencias a compresión cuando se disminuye la relación agua cemento.



**Fig. 6.2. Relation between 7-day strength and water/cement ratio for concrete made with a rapid-hardening Portland cement**

*Figura 2.18 RELACIÓN TÍPICA DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN VS RELACIÓN AGUA CEMENTO. (NEVILLE,2011)*

“La relación agua/cemento y la Resistencia a compresión para concretos tradicionales no es significativa para concreto permeable. Una alta relación de agua/cemento puede resultar en una adhesión reducida entre las partículas de agregado y también puede llenar la estructura de poros del concreto. Una relación baja de agua/cemento puede resultar en baja adhesión entre los agregados y problemas al momento de fundir la mezcla” (Crouch, 2006)

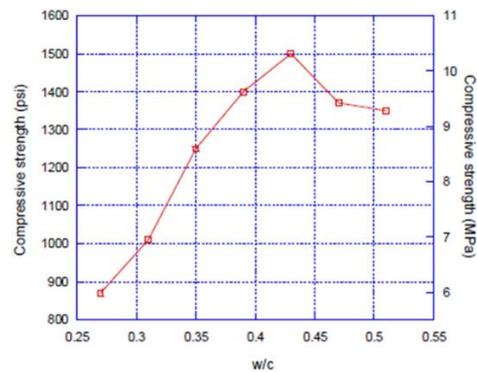


Figure 4 Relationship between compressive strength and w/c, after Meininger (1988).

Figura 2.19 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y RELACIÓN AGUA CEMENTO. (MEININGER, 1988)

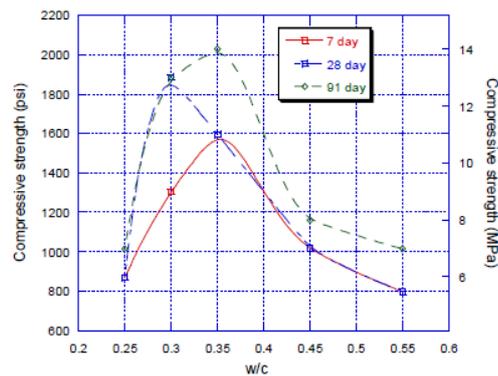


Figure 5 Relationship between w/c and compressive strength (cement content = 239 kg/m<sup>3</sup>), after Meininger (1988).

Figura 2.20 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y RELACIÓN AGUA/CEMENTO PARA DISTINTOS TIEMPOS DE CURADO. (MEININGER 1988)

#### 4. Presencia de Finos.

Aunque por definición el concreto permeable no debería contener finos, se puede utilizar para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. “Investigaciones previas han mostrado que agregado entre un 5% y 7% de agregado fino al agregado grueso, se optimiza la mezcla produciendo mayor resistencia a compresión y durabilidad” (Schaefer et al, 2006)

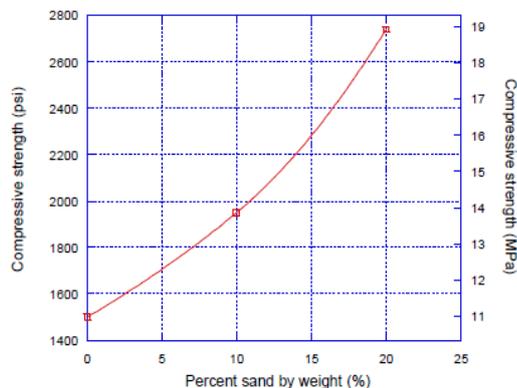


Figure 7 Relationship between sand content and compressive strength of pervious concrete, after Meininger (1988).

*Figura 2.21 RELACIÓN ENTRE CANTIDAD DE AGREGADO FINO Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CONCRETO PERMEABLE. (MEININGER, 1988)*

### **5. Compactación.**

La compactación es probablemente el factor que más influye en la resistencia a compresión del concreto permeable. No existe una metodología estándar acerca de cómo se debe compactar al hormigón permeable. Hay discrepancia entre varios autores entre los métodos adecuados para la compactación de especímenes de concreto permeable. De acuerdo con Neville, no se debe compactar ni vibrar al concreto permeable ya que esto puede causar sangrado en la mezcla. Otros investigadores han utilizado distintos métodos de compactación para la elaboración de especímenes de concreto permeable.

“La cantidad de compactación puede tener efectos considerables en la función de concreto permeable. Un nivel mayor de compactación al momento de colocar el concreto, llevará a mayores resistencias a compresión. Esto se debe a la densificación del concreto y la eliminación de vacíos. Estos son los mismos vacíos necesarios para la permeabilidad del agua. Por lo tanto, mucha compactación resultará en pérdida de permeabilidad del Sistema de concreto

permeable....Experimentos previos realizados por otros investigadores acerca de concreto permeable han utilizado varias técnicas de compactación como, rodadores, golpeteo a mano, y compactación con Proctor.” (Mulligan, 2005)

Aires realizó la compactación con martillo vibrador. (Aires et Al, 2012). Una práctica bastante común para realizar la compactación de hormigón permeable es compactar con metodologías utilizadas para compactar muestras de suelos como con el martillo Proctor estándar y modificado.

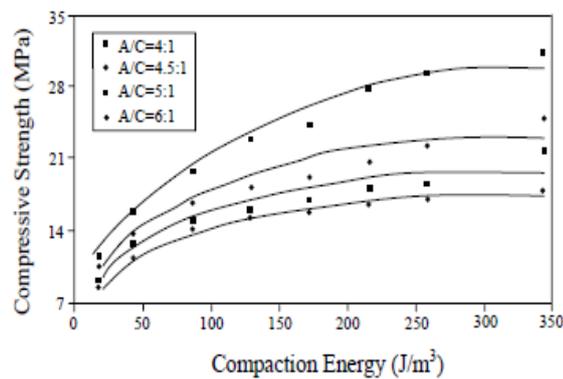


Figure 2.9 Effect of compaction energy on compressive strength for no-fines concrete [16]

*Figura 2.22 RELACIÓN ENTRE ENERGÍA DE COMPACTACIÓN Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN. (AOKI,2009)*

El nivel de compactación del elemento de hormigón permeable también es proporcional al peso unitario del espécimen.

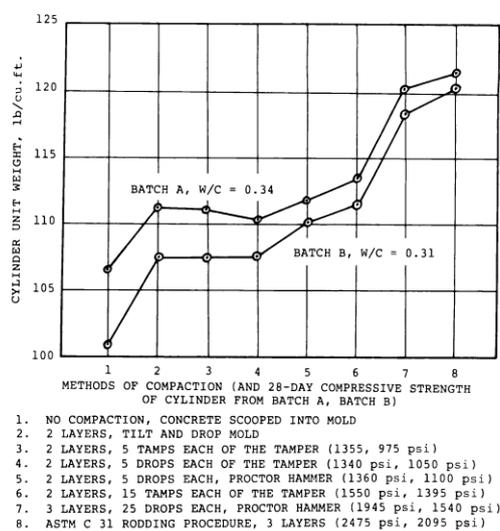


Fig. 3 — Cylinder unit weights and strengths for eight different compaction methods.

Figura 2.23 PESO UNITARIO PARA DISTINTOS MÉTODOS DE COMPACTACIÓN (AOKI,2009)

## 6. Peso Unitario y porcentaje de vacíos.

“La resistencia y desempeño estructural del concreto permeable es más variable que el del concreto tradicional, y depende principalmente de la porosidad” (Crouch et al, 2003)

El peso unitario y porcentaje de vacíos de un elemento de hormigón permeable están inversamente relacionados; a mayor porcentaje de vacíos, menor peso unitario y menor resistencia a compresión. Schaefer encontró una ecuación que relaciona la resistencia a compresión con el porcentaje de vacíos. (Schaefer et Al, 2006)

Resistencia a Compresión (MPa)=  $4762.1 - 97.16 \times [\text{porcentaje de vacíos} (\%)]$

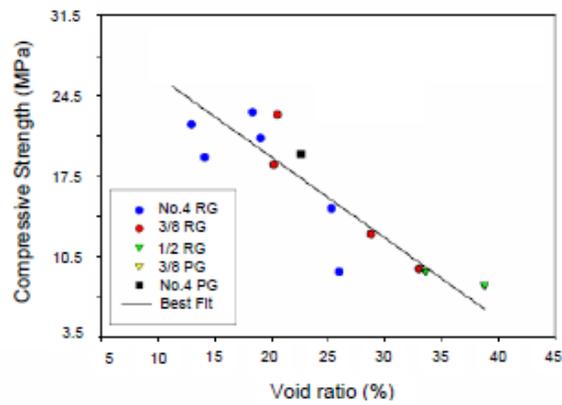


Figure 2.7 Relationship between compressive strength and void content [12]

Figura 2.24 RELACIÓN ENTRE PORCENTAJE DE VACÍOS Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN (SCHAEFER,2006)

Por regla general se suele encontrar que entre mayor sea el peso unitario del concreto, mayor será su resistencia a compresión.

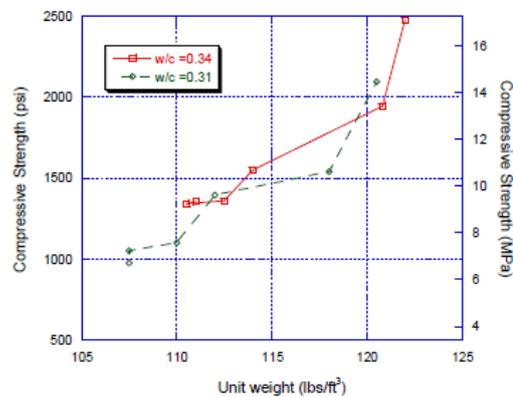


Figure 2 Relationship between 28-day compressive strength and unit weight, after Meininger (1988).

Figura 2.25 RELACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS Y PESO UNITARIO. (MEININGER,1988)

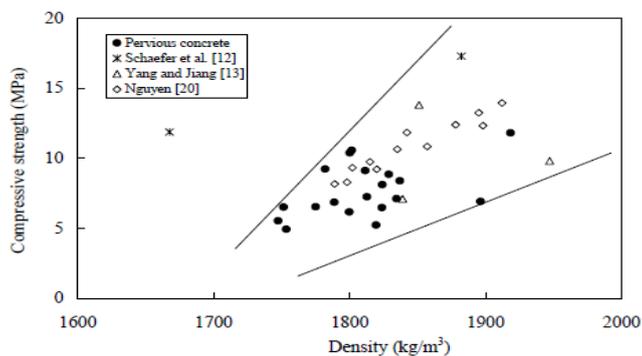


Figure 4.15 Relationship between compressive strength and density for pervious concrete

Figura 2.26 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y DENSIDAD DE ACUERDO CON DIFERENTES AUTORES. (AOKI,2009)

### 7. Desarrollo de Resistencia en tiempo de Curado.

El desarrollo de la resistencia a compresión del hormigón permeable no es igual al de hormigones tradicionales. Varios investigadores han llegado a resultados diferentes, con respecto al desarrollo de resistencia a compresión en el curado de los especímenes. De acuerdo con Kevern “El periodo más crítico para el concreto permeable es las condiciones de curado durante los primeros siete días. Una hidratación adecuada crea alta resistencia y durabilidad, mientras que un curado pobre permite que el concreto se diseque” (Kevern,2008)

Aoki realizó especímenes de hormigón permeable con dos dosificaciones distintas y al mismo tiempo realizó especímenes de hormigón tradicional para comparar la evolución de la resistencia a compresión entre el hormigón tradicional y hormigón permeable. Ambas mezclas fueron hechas con cemento Portland. La Figura 2.27, muestra los resultados obtenidos por Aoki, donde se

puede observar que los especímenes de hormigón permeable alcanzan la mayoría de su resistencia a compresión hasta los 7 días de curado. El aumento de resistencia a compresión entre los 7 y 28 días es muy pequeño para especímenes de hormigón permeable. (Aoki,2009)

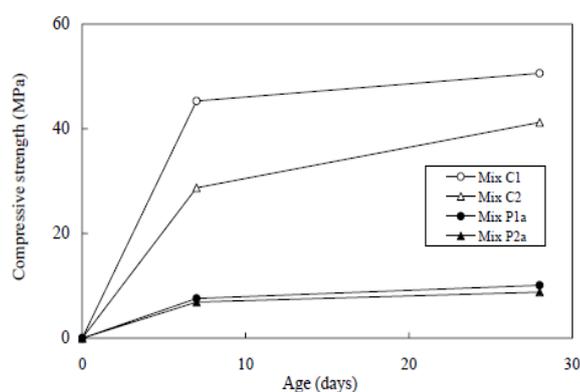


Figure 4.1 Development of compressive strength by age for conventional and pervious concrete

*Figura 2.27 DESARROLLO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CONCRETO PERMEABLE EN RELACIÓN A CONCRETO TRADICIONAL (AOKI,2009)*

En la figura 2.28 se muestran los resultados obtenidos por Amer con respecto al desarrollo de resistencia a compresión para especímenes de hormigón permeable tradicional y de alta resistencia. Los resultados de Amer concuerdan con los de los investigadores citados previamente en la observación de que el periodo crítico para el desarrollo de resistencia a compresión para especímenes de hormigón permeable se da hasta los 7 días de fraguado, a partir de este tiempo, el desarrollo de resistencia a compresión es mucho menor que en los primeros 7 días.

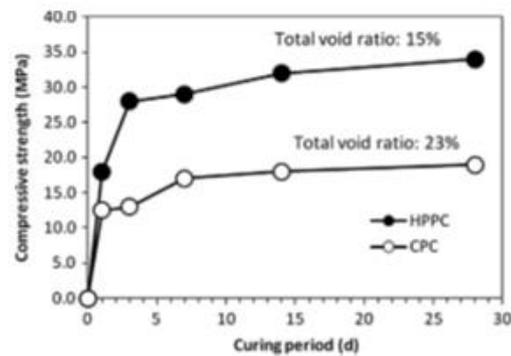


Figura 2.28 DESARROLLO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA MEZCLAS CON DIFERENTES PORCENTAJES DE VACÍOS. (AAMER,2012)

En la figura 2.28 se ilustran los resultados obtenidos por Mulligan con respecto al desarrollo de resistencia a compresión con el tiempo de curado. Esta investigadora obtuvo resultados disidentes con los de los otros autores citados, Las tres mezclas realizadas por Mulligan, desarrollan un aumento más o menos constante en la resistencia a compresión entre los 3 y 28 días. Esta diferencia puede haberse dado por el hecho de que la investigadora, utilizó un método de curado distinto al de los otros autores, en lugar de realizar el curado en piscinas o en cuartos de vapor, Mulligan únicamente cubrió a los especímenes con plástico para que el endurecimiento por fraguado se dé únicamente por el agua de mezcla del concreto. (Mulligan, 2005)

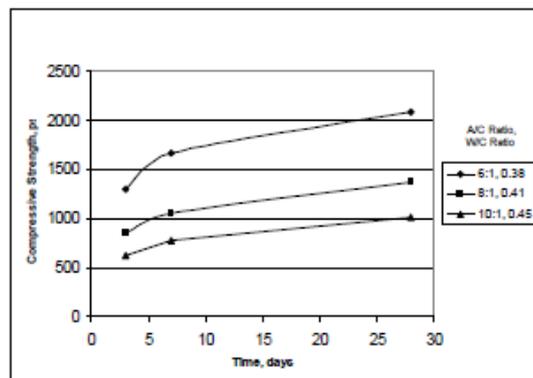


Figure 2.1.1 Compressive Strength vs. Time

Figura 2.29 DESARROLLO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON TIEMPO DE CURADO. EL CURADO FUE ÚNICAMENTE COLOCANDO PLÁSTICO ALREDEDOR DE LOS ESPECÍMENES. (MULLIGAN, 2005)

## 8. Microsílica.

La utilización de microsíllica en mezclas de hormigón tradicional, suele mejorar las propiedades mecánicas del hormigón, especialmente alta resistencia temprana y menor permeabilidad para los elementos de concreto. (Neville, 2011). “En contra del sentido común, la adición de microsíllica resultó en la reducción en la resistencia a la compresión a los 7 días en un 44% (Schaefer et al (2006), explicaron que la microsíllica influencia el porcentaje de vacíos y que la disminución en la resistencia a compresión se dio por el aumento en el porcentaje de vacíos debido a la presencia de microsíllica” (Young, 2008)

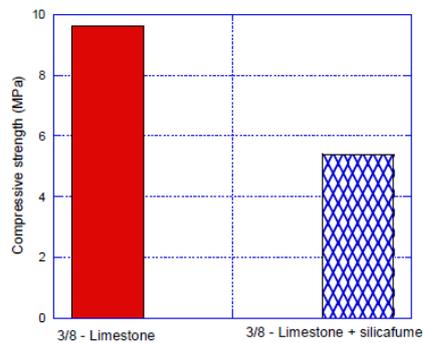


Figure 8 Effect of silica fume addition on the seven-day compressive strength of pervious concrete, after Schaefer et al. (2006).

Figura 2.30 EFECTO DE LA ADICIÓN DE MICROSÍLICA EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS, BASADO EN SCHAEFER ET AL 2006. (YOUNG,2008)

“Cuando se añadió microsílca a la mezcla, la resistencia a compresión disminuyó, principalmente por problemas de trabajabilidad. La adición de microsílca afectó negativamente a la trabajabilidad, lo que causó problemas de compactación y no permitió a la pasta de cemento cubrir uniformemente al agregado.” (Young,2008)

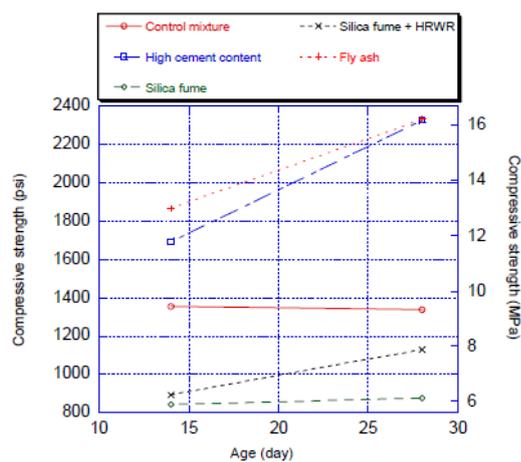


Figure 29 Effect of cementitious materials on compressive strength.

Figura 2.31 RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA DOSIFICACIÓN CON DISTINTAS MEZCLAS DE CEMENTANTES (YOUNG,2008)

Como se puede observar en la Figura 2.31, de todas las mezclas que realizó Young utilizando distintas mezclas de cementantes, la que resultó en menor resistencia a compresión fue la mezcla con microsílica.

## i. Resistencia a Flexión

### 1. Agregado.

Z

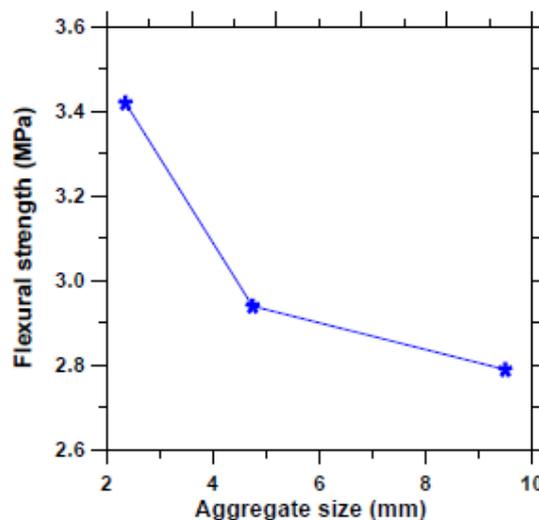


Figura 2.32 RESISTENCIA A FLEXIÓN VS TAMAÑO DE AGREGADO. (NEITHENALATH,2004)

### 2. Relación Agregado Cementante.

De acuerdo a Tennis et al (2005), la relación agregado/cementante o en otras palabras la cantidad de cemento en la mezcla afecta a la resistencia a flexión de los especímenes de hormigón permeable. Esto se puede deber a la mayor cantidad de pasta presente en la sección transversal de los elementos, lo que permite una mejor distribución de esfuerzos y una mayor área efectiva para resistir las cargas.

### 3. Compactación.

En elementos de hormigón permeable, la compactación tiene un fuerte impacto sobre resistencia a compresión y tracción. Al aplicar una mayor energía de compactación a los especímenes, estos desarrollarán mayor resistencia a compresión, flexión y tracción indirecta.

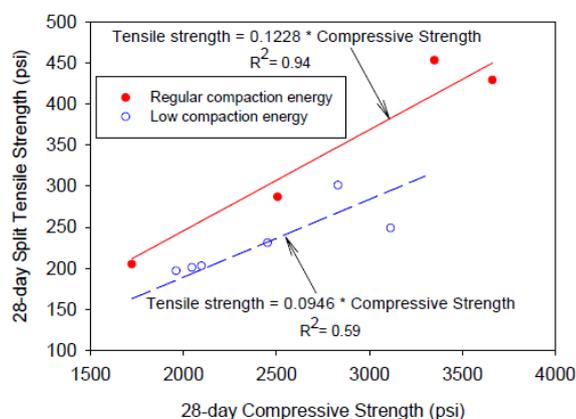


Figure 2. Effect of compaction energy on the relationship between compressive strength and split strength.

*Figura 2.33 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y TRACCIÓN INDIRECTA CON DOS NIVELES DE COMPACTACIÓN (SULEIMAN, S.F)*

### 4. Presencia de Finos.

De acuerdo con la evidencia encontrada por varios investigadores, la presencia de agregado fino aumenta la resistencia a flexión de los especímenes de hormigón permeable. Neithenath (2004) realizó ensayos a flexión para especímenes de hormigón permeable con diferentes cantidades de agregado fino y encontró una relación que aparenta ser lineal entre la cantidad de finos y la resistencia a flexión en especímenes de concreto permeable.

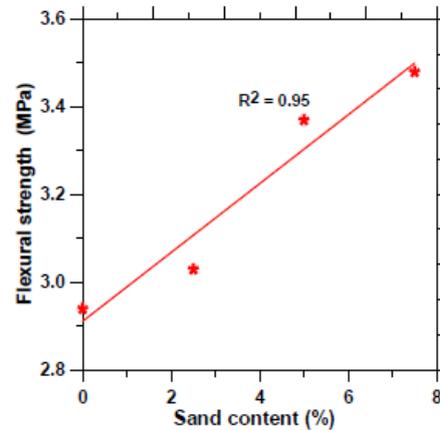


Figure 4.10 Influence of sand addition on flexural strength

*Figura 2.34 RELACIÓN ENTRE CANTIDAD DE AGREGADO FINO Y RESISTENCIA A FLEXIÓN PARA ESPECÍMENES DE HORMIGÓN PERMEABLE. (NEITHENALATH,2004)*

### **5. Porcentaje de Vacíos.**

Varios autores concuerdan en que el porcentaje de vacíos y la resistencia a flexión en elementos de hormigón permeable tienen una relación inversa. “Como se podía esperar, la resistencia a flexión también se reduce al aumentar el porcentaje de vacíos, y la relación es casi lineal” (Neithenalath,2004). De acuerdo con Joung (2008) si bien la resistencia a flexión, al igual que la resistencia a compresión, disminuye conforme aumenta el porcentaje de vacíos esta disminuye más lentamente.

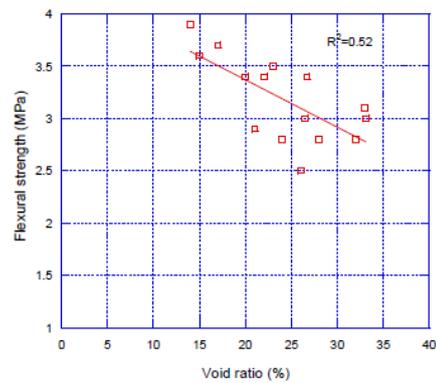


Figure 10 Relationship between flexural strength and total porosity, after Marolf et al. (2004).

Figura 2.35 RELACIÓN ENTRE % DE VACÍOS Y RESISTENCIA A FLEXIÓN (JOUNG,2008)

Figure 4.8 Influence of pore size on flexural strength

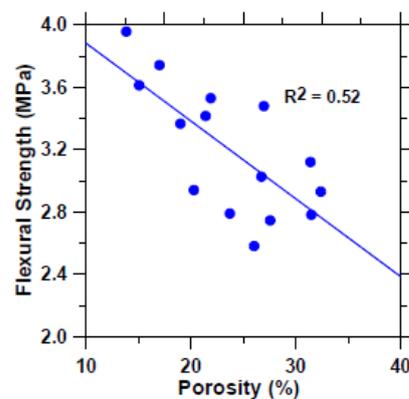


Figure 4.9 Influence of porosity on flexural strength

Figura 2.36 INFLUENCIA ENTRE RESISTENCIA A FLEXIÓN Y % DE VACÍOS (NEITHENALATH,2004)

## 6. Microsílica.

En relación con el efecto que tienen la utilización de microsílica en la resistencia a flexión de especímenes de hormigón permeable, en la literatura se encuentran conclusiones disidentes. Neithenalath (2004) encontró que la

utilización de polvo de sílice aumentaba la resistencia a flexión de las vigas de hormigón permeable, con relación a especímenes de hormigón permeable sin microsílca. En cambio los resultados de Joung (2008) de resistencia a flexión mostraron que la utilización de microsílca bajaba la resistencia a flexión de los especímenes de hormigón permeable, de todos las mezclas que realizó, los especímenes con microsílca resultaron con una de las menores resistencias a flexión.

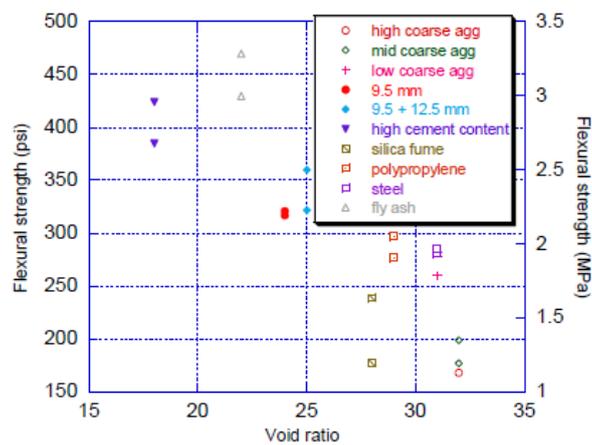


Figure 31 Relationship between void ratio and flexural strength.

Figura 2.37 RESISTENCIA A FLEXIÓN PARA DISTINTOS TIPOS DE CEMENTANTE. (JOUNG,2008)

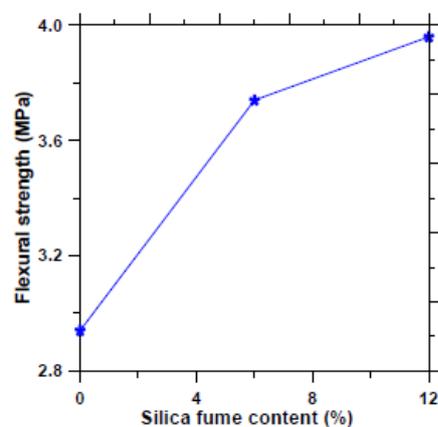


Figure 4.11 Influence of silica fume on flexural strength

Figura 2.38 INFLUENCIA DE LA UTILIZACIÓN DE MICROSÍLICA EN LA RESISTENCIA A FLEXIÓN (NEITHENALATH,2004)

## b. Permeabilidad

### i. Permeabilidad en concreto permeable

“La característica más distinguida del concreto permeable es su alta permeabilidad, esta es la medida de la facilidad con la cual un fluido puede pasar a través del material frente a una gradiente de presión” (Joung,2008). Esta depende de principalmente del porcentaje de vacíos en la mezcla, el cual a su vez depende de la relación agua/cementantes, relación agregado/cementantes, tamaño de agregados y energía de compactación utilizada en los especímenes. Entre mayor sea el porcentaje de vacíos en la matriz del elemento de concreto permeable, mayor será su permeabilidad

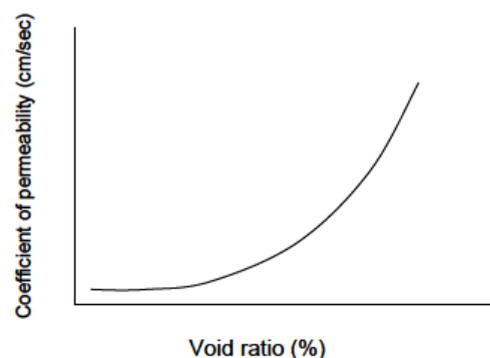


Figure 13 Relationship between pervious concrete void ratio and permeability for mixes placed using regular compaction energy, after Schaefer et al. (2006).

Figura 2.39 RELACIÓN ENTRE COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD Y PORCENTAJE DE VACÍOS. (JOUNG,2008)

Si bien se conoce que existe una relación entre las dos características, de acuerdo con Neithenath (2004) no existe un patrón que relacione al porcentaje de vacíos con el coeficiente de permeabilidad.

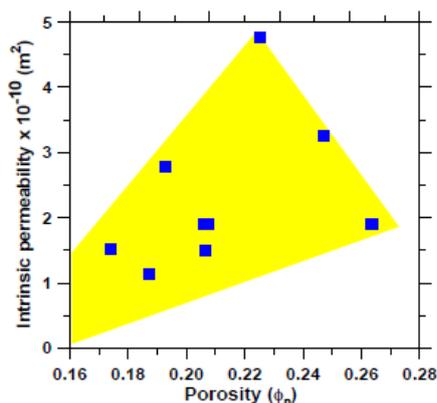


Figure 4.13 Porosity – permeability relationship – increasing permeability with porosity, but no definite trend

Figura 2.40 RELACIÓN ENTRE PERMEABILIDAD Y PORCENTAJE DE POROSIDAD EN HORMIGÓN PERMEABLE (NEITHENATH,2004)

### 1. Relación Agua/Cemento.

De acuerdo con Meninger (1988) la permeabilidad es inversa a la relación agua/cemento del hormigón permeable, es decir conforme disminuye la relación agua/cementante, aumenta la permeabilidad.

Table 1 — Detailed data for light compaction tests (5 tamp compaction; No. 8 coarse aggregate; aggregate-cement ratio = 6)

w/c	Cement (lb/yd <sup>3</sup> )	Water (lb/yd <sup>3</sup> )	Coarse aggregate (lb/yd <sup>3</sup> )	Air (%)	Strength (psi)	Percolation (in./min)
0.51	440	224	2640	22	1350	5
0.47	430	203	2575	23	1370	4
0.43	430	184	2570	25	1500	10
0.39	425	165	2550	27	1400	30
0.35	415	145	2520	29	1250	40
0.31	410	125	2430	32	1010	51
0.27	395	106	2370	33	870	59

Tabla 2.13 PROPIEDADES CONCRETO PERMEABLE (MEININGER,1988)

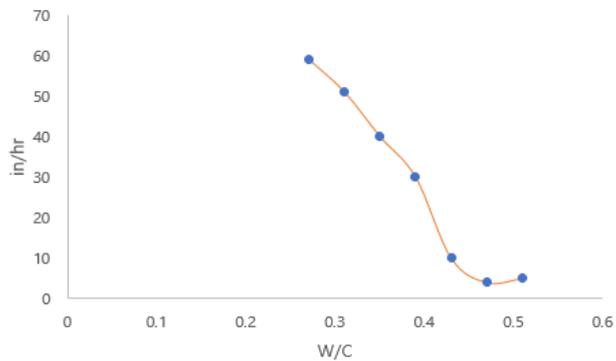


Figura 2.41 RELACIÓN AGUA/CEMENTO CON COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD, BASADO EN MEININGER (1988)

## 2. Relación Agregado/Cemento.

“La permeabilidad es afectada por la relación agregado/cemento. Cuando la cantidad de cemento disminuye en una mezcla, lo que indica un aumento de la relación agregado/cemento, la permeabilidad del concreto permeable aumenta” (Chopra et al,2007)

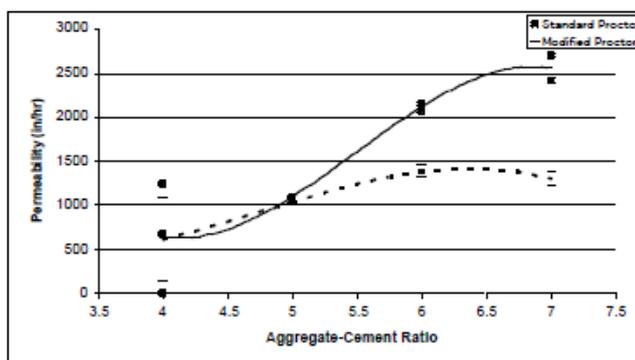


Figura 2.42 RELACIÓN ENTRE PERMEABILIDAD Y RELACIÓN AGREGADO/CEMENTO PARA DOS MÉTODOS DE COMPACTACIÓN (CHOPRA ET AL, 2007).

## 3. Resistencia a compresión.

La resistencia a compresión y el coeficiente tienen una relación inversa, entre mayor es el coeficiente de permeabilidad, la resistencia a compresión tenderá a ser menor. Esto se da por la menor área efectiva de concreto dada por el mayor porcentaje de vacíos en la mezcla.

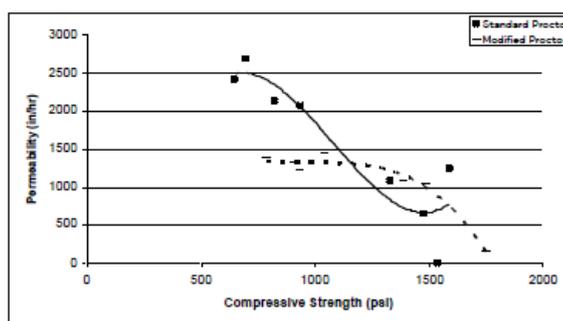


Figura 2.43 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (CHOPRA ET AL, 2007)

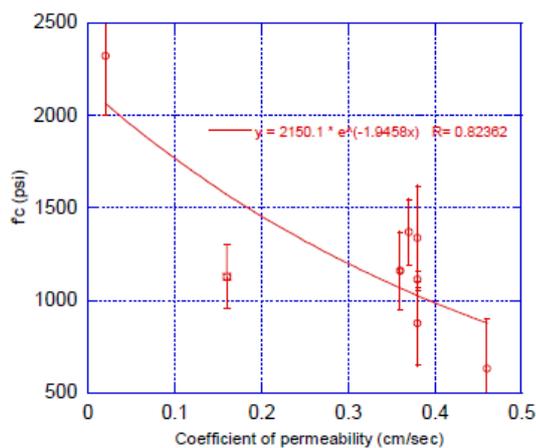


Figura 2.44 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (JOUNG,2008)

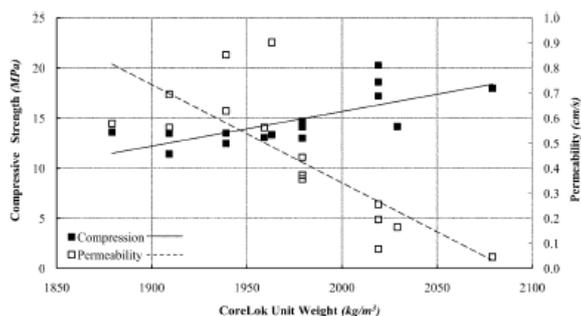


Figura 2.45 RELACIÓN ENTRE DENSIDAD, PERMEABILIDAD Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN. (NEPTUNE, 2010)

#### 4. Compactación.

“El coeficiente de permeabilidad también es relativamente constante con la compactación y la densidad. A mayor energía de compactación aumenta la densidad, disminuyendo la porosidad del concreto. La reducción de la porosidad conduce directamente a una reducción en el coeficiente de permeabilidad” (Chopra et al, 2007)

Como se puede observar en la tabla inferior, la aplicación de diferentes métodos (diferente energía) de compactación produce diferentes coeficientes de permeabilidad en los especímenes de concreto.

Mix	No.	Water Cement Ratio (by weight)	Aggregate Cement Ratio (by Volume)	Compaction	Weight of Cylinder and Concrete (Wet)	Weight of Concrete (Dry)	Permeability (in/hr)
1	1111	0.52	4.00	Standard	7.18	6.78	0
	1112			Standard	7.16	6.83	
	1121			Modified	7.32	6.92	
	1122			Modified	7.40	7.07	
2	2111	0.39	4.00	Standard	7.20	6.82	655
	2112			Standard	7.04	6.69	
	2121			Modified	7.10	6.70	
	2122			Modified	6.98	6.65	
3	3211	0.44	5.00	Standard	6.88	6.50	1085
	3212			Standard	6.90	6.57	
	3221			Modified	6.90	6.48	
	3222			Modified	6.92	6.59	
4	4211	0.35	4.00	Standard	6.66	6.30	1241
	4212			Standard	6.96	6.63	
	4221			Modified	7.08	6.72	
	4222			Modified	---Error---	---Void---	
5	5311	0.33	6.00	Standard	6.62	6.24	2068
	5312			Standard	6.64	6.31	
	5321			Modified	6.68	6.28	
	5322			Modified	6.76	6.45	
6	6311	0.38	6.00	Standard	6.60	6.20	2137
	6312			Standard	6.58	6.25	
	6321			Modified	6.86	6.48	
	6322			Modified	6.82	6.49	
7	7411	0.32	7.00	Standard	6.46	6.04	2688
	7412			Standard	6.40	6.09	
	7421			Modified	6.76	6.36	
	7422			Modified	6.68	6.37	
8	8411	0.39	7.00	Standard	6.56	6.14	2412
	8412			Standard	6.52	6.21	
	8421			Modified	6.96	6.54	
	8422			Modified	6.88	6.55	

Tabla 2.14 CARACTERÍSTICAS DE ESPECÍMENES DE HORMIGÓN PERMEABLE (MULLIGAN, 2005)

“La compactación afecta a las propiedades del concreto permeable de cemento Portland reduciendo la resistencia a compresión, la resistencia a tracción indirecta, peso unitario y aumentando la permeabilidad (Suleiman,2006)

## ii. Coeficiente de Permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad es una de las características más importantes del concreto permeable. (ACI 522R,2010). Este coeficiente refleja la capacidad que tiene el concreto de percolar el agua. Entre mayor sea el coeficiente de permeabilidad, más rápido pasará el agua a través del espécimen.

Para hallar el coeficiente de permeabilidad se utilizó un permeómetro (se lo explicará con más detalle más adelante) y se utilizó la ecuación de Darcy para obtener la constante.

$$k = \frac{A_1 * L}{A_2 * t} * \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

Donde

k es la constante de permeabilidad

A1 es el área del tubo de vidrio

L es la altura del cilindro de concreto permeable

t es el tiempo que se demora el agua de bajar de h1 a h2

h1 es la altura de inicio del agua (290 mm)

$h_2$  es la altura final del agua (70 mm)

### iii. Permeómetro

Para realizar los ensayos de permeabilidad se utilizó el permeómetro disponible en el laboratorio. El diseño y construcción de este se basó en el diseño recomendado por el ACI 522R-10, realizado originalmente por Neithenalath (2004).

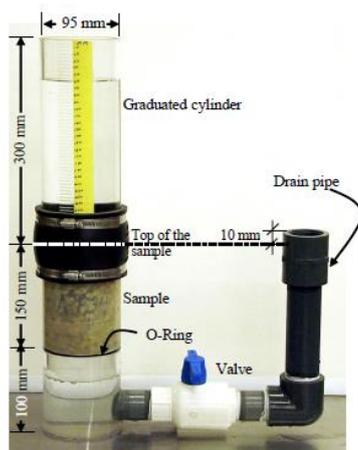


Figura 2.46 PERMEÓMETRO DE NEITHENALATH (NEITHENALATH, 2004)



Figura 2.47 Permeómetro utilizado para las obtener la constante de permeabilidad de los cilindros

Para encontrar la constante de permeabilidad de cada uno de los cilindros a los 3,7,14 y 28 días de curado se utilizó la fórmula de Darcy:

$$k = \frac{A_{cilindro} * L}{A_{tubo} * t} * \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)$$

Donde:

- K es la constante de permeabilidad del cilindro
- $A_{cilindro}$  es el área transversal del cilindro
- L es la altura del cilindro
- $A_{tubo}$  es el área transversal interna del tubo de acrílico
- t es el tiempo que se demora el agua de bajar de  $h_0$  a  $h_1$
- $h_0 = 29$  cm sobre la parte superior del cilindro de concreto
- $h_1 = 7$  cm sobre la parte superior del cilindro de concreto

#### iv. Dosificación

Para la elaboración de los especímenes se eligió una dosificación estándar con el propósito de mantener todas las variables constantes, exceptuando el cemento y de esta manera poder concluir de manera certera que la variación en las propiedades mecánicas y de permeabilidad de los especímenes fuera dictada únicamente por el comportamiento del cemento en cada uno de los especímenes. La dosificación escogida se muestra a continuación:

Metro Cúbico de Mezcla		
Material	Volumen m3	Peso (Kg)
<b>Cemento</b>	0.224	639.69
<b>Humo de Sílice</b>	0.032	71.08
<b>Agua</b>	0.246	246.20
<b>Aditivo Plastificante</b>	0.017	17.77
<b>Agregado 3/8"</b>	0.275	604.85
<b>Agregado No 4</b>	0.113	304.92
<b>Agregado No 8</b>	0.063	95.17
<b>Agregado No 30</b>	0.000	0
<b>Aire</b>	0.029	0
<b>TOTAL</b>	<b>1</b>	<b>1979.67</b>

Tabla 2.15 DOSIFICACIÓN UTILIZADA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES



Figura 2.48 MATERIAL UTILIZADO PARA ELABORACIÓN DE VIGUETAS DE HORMIGÓN PERMEABLE UTILIZANDO CEMENTO PORTLAND

Para realizar la dosificación se siguió las recomendaciones de diseño de mezclas para hormigones permeables del Reporte sobre Concreto Permeable ACI 522R-10.

## v. Elaboración de especímenes

### 1. Mezcla/Fundición

Para realizar la mezcla se siguió el procedimiento recomendado por la norma ASTM C192-14 (Práctica para la elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto en el laboratorio.) En primer lugar, se humedeció la concretera. A continuación, se colocó el agregado grueso con una parte del agua y el aditivo (Rheobuild 1000), a continuación, se encendió la concretera durante aproximadamente 30 segundos, a continuación, se agregó el agregado fino, luego se colocó el cemento y la microsílica. Siguiendo el procedimiento de la norma se mezcló durante 3 minutos, tras lo que se dejó reposar a la mezcla durante 2 minutos tras lo que se mezcló 2 minutos más. Se utilizó el mismo procedimiento para realizar todas las mezclas.



Figura 2.50 Concretera y dosificación para cilindros



Figura 2.49 Hormigón permeable fresco con cemento Portland



Figura 2.51 Hormigón permeable con cemento Portland en concretera

C. Hidráulico	W/C DISEÑO	Agua Diseño (g)	Agua sobrante (g)	Agua Utilizada (g)	W/C FINAL
Cilindros	0.33	3106.5	340	2766.5	0.29
Vigas	0.33	3760.5	331	3429.5	0.30

Tabla 2.16 Relación Agua-Cemento Final para Mezclas de Cemento Hidráulico

C. Puzolánico	W/C DISEÑO	Agua Diseño (g)	Agua sobrante (g)	Agua Utilizada (g)	W/C FINAL
Cilindros	0.327	3106.5	280	2826.5	0.30
Vigas	0.3	3760.5	391	3369.5	0.29

Tabla 2.17 Relación Agua/Cemento Finales para Mezclas con Cemento Puzolánico

C.	W/C	Agua	Agua	Agua	W/C
Portland	DISEÑO	Diseño (g)	sobrante (g)	Utilizada (g)	FINAL
Cilindros	0.33	3106.5	360	2746.5	0.29
Vigas	0.33	3760.5	486	3274.5	0.28

Tabla 2.18 Relación Agua/Cemento Finales para Mezclas con Cemento Portland

## 2. Encofrado

El proceso de encofrado y compactación de los especímenes se realizó con una mesa vibratoria en 2 capas donde se vibró 5 segundos cada capa, esto se realizó debido a que en pasadas experiencias se obtuvo mejores resultados tanto en resistencia a compresión como en permeabilidad con este método de compactación con relación al método tradicional especificado por la norma ASTM C 192-14 donde se recomienda compactar con 25 golpes cada capa para los cilindros y 67 golpes para las vigas. Se utilizó para la fundición de los especímenes encofrados cilíndricos de 4" \*8" para los cilindros de concreto permeable y cajas de MDF de dimensiones internas de 150\*150\*450 mm para las vigas.



Figura 2.52 Encofrados cilíndricos de 4"\*8"

Se cubrió a los especímenes con una lámina plástica para evitar la pérdida de agua de mezcla por evaporación y de esta forma procurar el mejor curado posible de los especímenes



*Figura 2.53 Especímenes encofrados de hormigón permeable*

### **3. Desencofrado**

Se desencofró y etiquetó todos los cilindros y viguetas para no tener complicaciones con relación a la identificación de los mismos al momento de realizar las pruebas. En total se realizaron 15 cilindros de 4''\*8'' y 3 viguetas de 15\*15\*45 cm para cada mezcla, en total se realizaron 45 cilindros y 9 viguetas de concreto permeable. Se curó a los especímenes en una piscina de agua a temperatura constante de 21° Celsius durante 28 días.



Figura 2.54 Cilindro de concreto permeable con cemento Hidráulico



Figura 2.56 Cilindros etiquetados de concreto permeable con cemento Pozolánico tipo IP



Figura 2.55 Especímenes en Piscina de Curado a 21° C

#### 4. Otras pruebas

##### i. Revenimiento

A pesar de que por definición el hormigón permeable debe tener un revenimiento cercano a cero, se realizó una prueba de revenimiento según la norma ASTM C 143-12, Esta prueba se realizó únicamente con los especímenes de prueba. En esta prueba se obtuvo un revenimiento mayor a lo esperado, pero como se puede observar en la figura inferior, más que asentamiento, existió una falta de cohesión en el concreto permeable, producido probablemente por falta de agua de mezcla, se aprendió de esta experiencia y para las mezclas

definitivas existió un control más riguroso del agua de mezclado y se utilizó el método sugerido por Tennis (2004) (tomar una muestra del hormigón y apretarlo fuertemente en las dos manos, si el hormigón no tiene cohesión, se debe agregar más agua a la mezcla, si existe sangrado del concreto sobre los guantes, se puso mucha agua en el concreto, y si se forma una especie de esfera con buena cohesión, existe una adecuada cantidad de agua en la mezcla.

“No existen métodos estándar para determinar la consistencia del concreto permeable. Los métodos de revenimiento estándar proveen de muy poco o ningún revenimiento debido a la consistencia del material, y por lo tanto no se utilizan” (Mulligan,2005)



Figura 2.57 Revenimiento de mezcla de prueba con Cemento Portland

ii. *Porcentaje de vacíos*

Durante la elaboración de los especímenes de ensayo, se intentó encontrar el porcentaje de vacíos de la mezcla a través del especificado por la norma ASTM C231M-14, pero no se consiguió los resultados esperados, el porcentaje de vacíos encontrados eran menores al 5% lo que es imposible para hormigones permeables. por este motivo se encontrará el porcentaje de vacíos de la mezcla en los especímenes endurecidos por el método experimental recomendado por el Insituto Japonés del Concreto. (Aoki,2009)



Figura 2.59 Obtención de porcentaje de vacíos de mezclas de prueba



Figura 2.58 Obtención de porcentaje de vacíos por Norma ASTM C231M-14

Fórmula utilizada para obtener porcentaje de

vacíos en los especímenes:

- Msum es la masa sumergida del espécimen
- Mseca es la masa seca en horno del espécimen

- es la densidad del agua a 21° Celsius
- es el volumen del espécimen

Cemento	Elemento	Peso	Peso	%
		Seco (g)	Sumergido (g)	Vacios
Hidráulico	C13	2694	1614.5	31%
	C14	2706.2	1618	31%
	C15	2701.4	1619	31%
	V1	17368.54	10222	29%
	V2	16952.04	10391	35%
	V3	17631.18	10450	29%
Puzolánico	C13	2641.1	1604	34%
	C14	2673.9	1618	33%
	C15	2726.3	1646.5	31%
	V1	17337.18	10368	31%
	V2	17167.64	10370	33%
	V3	17323.46	10360	31%
Portland	C13	2706.2	1649	33%

C14	2806.7	1694	29%
C15	2827.3	1712	29%
V1	16931.46	10414	36%
V2	16800.14	10175	35%
V3	16767.8	10040	34%

Tabla 2.19 Porcentaje de vacíos de especímenes probados a los 28 días de curado

### iii. TEMPERATURA

Se encontró la temperatura de cada una de las mezclas según la norma ASTM C1064-12 (Método de Ensayo Normalizado de Temperatura de Concreto de Cemento Hidráulico recién Mezclado). Se dejó el termómetro entre tres minutos y tres minutos y medio en cada una de las mezclas, las temperaturas de las mezclas realizadas con cemento Portland, Hidráulico GU, y Portland Puzolánico Tipo IP variaron entre los 20 y 23 grados Celsius, como se muestra en la tabla 2.20

	Temperatura °C		
	C.	C. Puzolánico	C.
Mezcla	Hidráulico	Tipo IP	Portland

Vigas	21.8	21.2	22.2
Cilindros	21.4	20.8	21.6

Tabla 2.20 Temperatura de mezclas con diferentes cementos



Figura 2.60  
Temperatura de mezcla de  
cemento hidráulico



Figura 2.61  
Temperatura de  
mezcla de cemento  
Portland

### **3. Análisis de Resultados**

#### **a. Observaciones sobre modo de falla de los especímenes**

El objetivo principal de esta investigación se basaba en encontrar las diferencias en las propiedades mecánicas y de filtración de especímenes de hormigón permeable donde se mantenían todas las variables constantes con excepción del cemento. Donde se utilizó tres tipos diferentes de cementos. Para poder diferenciar las propiedades mecánicas desarrolladas por los cilindros y vigas de concreto permeable se necesitaba que, tanto en los ensayos de compresión como de flexión, la falla se diera por rotura de la pasta o por separación entre la pasta de cemento y el agregado. De esta manera al tener falla de la pasta (del cemento) se podría comparar las propiedades mecánicas que aportó cada uno de los cementos a los especímenes.

Al momento de realizar los ensayos a compresión y flexión de los especímenes de hormigón permeable, se encontró que el modo de falla fue distinto al esperado. En la mayoría de cilindros a partir de los 7 días de curado, y en todas las vigas ensayadas a los 28 días, se encontró que la falla se dio por rotura del agregado y no por falla de la pasta de cemento. Estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos por Neptune et al (2010) “Después de que los especímenes fueran ensayados, estos fueron examinados, se observó que la mayoría de fallas ocurrieron por fractura del agregado y no por fractura de la pasta de cemento” (Neptune et al, 2010)



*Figura 3.1 Plano de falla de viga de hormigón permeable con cementoPortland*



*Figura 3.2 Falla de cilindro por rotura de agregado grueso*

Este modo de falla que ocurrió en la mayoría de especímenes dio como consecuencia resultados casi iguales en los módulos de rotura de las vigas y resistencia a compresión de los especímenes a partir de los 7 días de curado. Por este motivo es difícil concluir si los resultados obtenidos de los especímenes reflejan las diferencias en las propiedades mecánicas de los especímenes.

La falla del agregado se pudo haber dado por un mal triturado de los agregados, mala calidad de la piedra en sí o por la forma elongada que presentaba una buena porción del agregado 3/8" del lote de agregado utilizado.

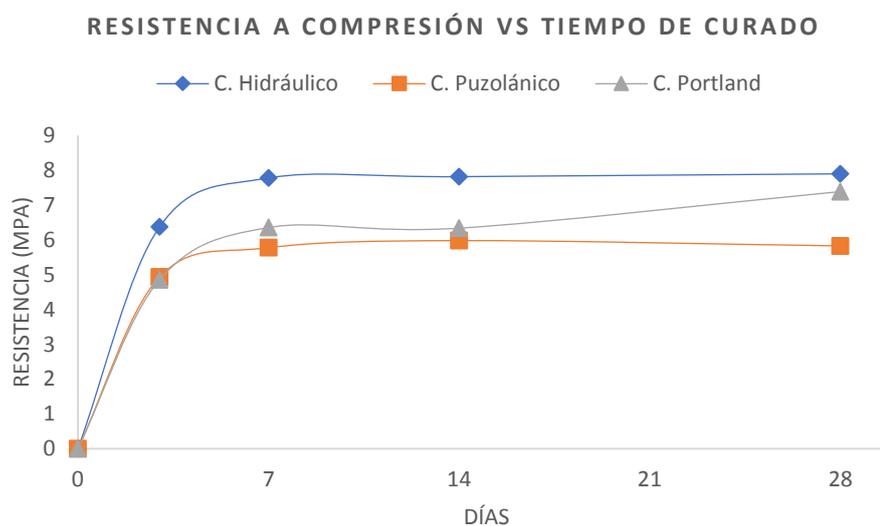


*Figura 3.3 Agregado 3/8" con forma laminar*

## **b. Desarrollo de resistencia a compresión en tiempo de curado**

Los especímenes de hormigón permeable presentaron un desarrollo de resistencia a compresión distinto a lo que se obtiene generalmente para especímenes de concreto tradicional. Como se ilustra en la figura 3.3, los

cilindros desarrollaron más del 60% de su resistencia final a los 3 días, aumentando su resistencia entre un 20 y 30% hasta los 7 días y de ahí se estabiliza la resistencia a compresión de los especímenes de cemento hidráulico y puzolánico tipo IP hasta los 28 días. A diferencia de los otros dos cementos, los especímenes de cemento Portland desarrollaron un aumento de resistencia a compresión importante entre los 14 y 28 días de curado.



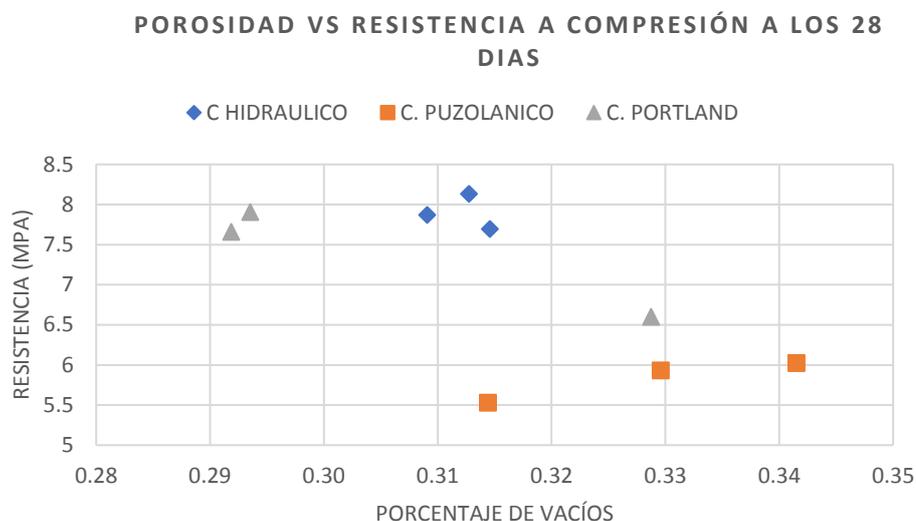
*Figura 3.4 Desarrollo de resistencia a compresión con tiempo de curado*

Los resultados obtenidos reflejan que el cemento que desarrolló una mayor resistencia a compresión fue el cemento hidráulico, el cual alcanzó su resistencia final a los 7 días. Seguida por el cemento Portland, el cual tuvo un desarrollo de resistencia a compresión más lento que el cemento hidráulico. El cemento que

demonstró la menor resistencia a compresión el puzolánico tipo IP el cual desarrolló la mayoría de su resistencia a compresión hasta los 7 días.

### **c. Relación entre porcentaje de vacíos y resistencia a compresión**

El porcentaje de vacíos en los especímenes de concreto permeable dependen de las características de la dosificación y de la energía de compactación. Al mantener estos parámetros constantes, el porcentaje de vacíos de los especímenes para los diferentes cementos dependerán de las características mecánicas de los cementos como el tamaño de las partículas de cemento, las que tienen un efecto directo en la trabajabilidad de la mezcla y por lo tanto en la eficacia de la compactación realizada. Gracias a la diferencia en las características físicas y químicas en los distintos cementos se puede esperar diferentes porcentajes de vacíos para los especímenes de distintos cementos. Se puede observar que conforme aumenta el porcentaje de vacíos de los especímenes, la resistencia a compresión disminuye.



*Figura 3.5 Relación entre porcentaje de vacíos y resistencia a compresión a los 28 días*

De lo que se puede observar en la figura 3.4 de los resultados obtenidos se puede destacar que los especímenes que mantuvieron una mejor relación entre resistencia a compresión y porcentaje de vacíos fueron los realizados con cemento Hidráulico ya que estos lograron resistencias entre 7 y 8 MPa con porcentajes de vacíos cercanos al 31%, los especímenes de cemento Portland requirieron de porcentajes de vacíos menores para lograr resistencias comparables y los especímenes con cemento puzolánico tipo IP desarrollaron resistencias mucho menores para porcentajes de vacíos similares

#### d. Relación entre densidad y resistencia a compresión

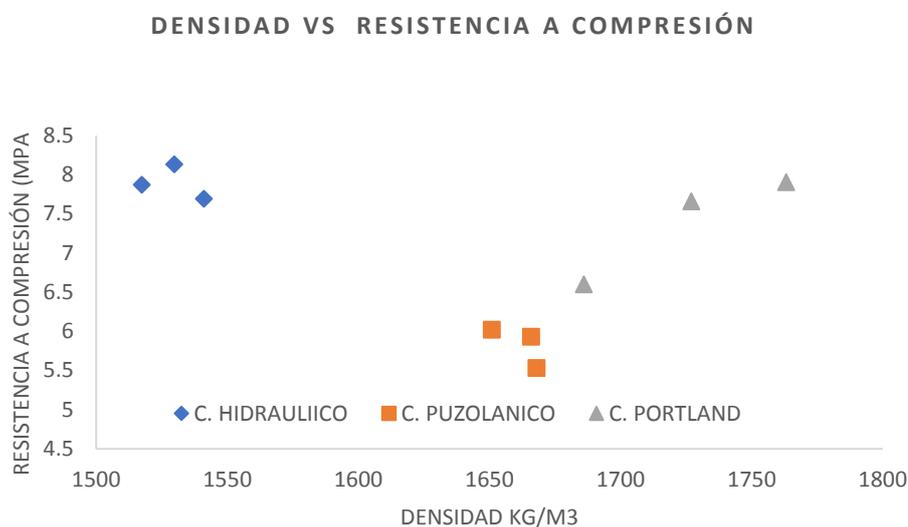


Figura 3.6 Relación entre densidad de los especímenes y resistencia a compresión

La densidad de los especímenes está directamente relacionada con la energía de compactación y la trabajabilidad de la mezcla. Por este motivo era de esperarse que las distintas mezclas tengan diferentes densidades para un mismo nivel de compactación. Esto se debe a la diferente trabajabilidad de las mezclas con distintos cementos (esto se da por el diferente tamaño de partículas de los distintos cementos y a la diferencia de propiedades mecánicas y químicas entre estos)

Al igual que en los casos anteriores el cemento Hidráulico fue el que presentó mejores características, ya que con la menor densidad logró alcanzar la mayor resistencia a compresión. El cemento con el segundo mejor comportamiento a compresión fue el Portland, seguido por el cemento Portland Puzolánico tipo IP.

Debido a que los valores de las densidades de los especímenes de cemento hidráulico y puzolánico son muy parecidas entre sí, no se puede diferenciar una tendencia en la relación entre las dos variables. En el comportamiento del cemento Portland se puede observar que los especímenes siguen la convención general de que, a mayor densidad, existirá mayor resistencia a compresión.

### e. Relación entre constante de permeabilidad y resistencia a compresión

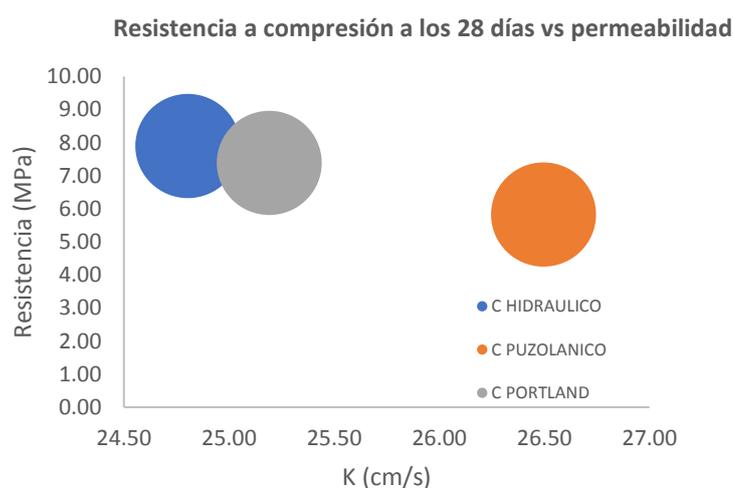


Figura 3.7 Relación entre constante de permeabilidad y resistencia a compresión

De acuerdo con la literatura revisada, la resistencia a compresión debería bajar conforme aumenta la permeabilidad de los especímenes. En la gráfica se puede observar que indistintamente del tipo de cemento, se mantiene la tendencia que entre mayor es la constante de permeabilidad del espécimen, menor será la resistencia a compresión de la misma.

En búsqueda de conocer si la relación inversa entre la constante de permeabilidad y la resistencia a compresión se cumplía independientemente del tiempo de curado de los especímenes, se comparó los resultados de las resistencias a compresión a los 3,7,14 y 28 días con las permeabilidades en los mismos días. Como se puede observar en la figura 3.8, la resistencia a compresión y la permeabilidad siguen una tendencia casi lineal independiente del tiempo de curado y del tipo de cemento.

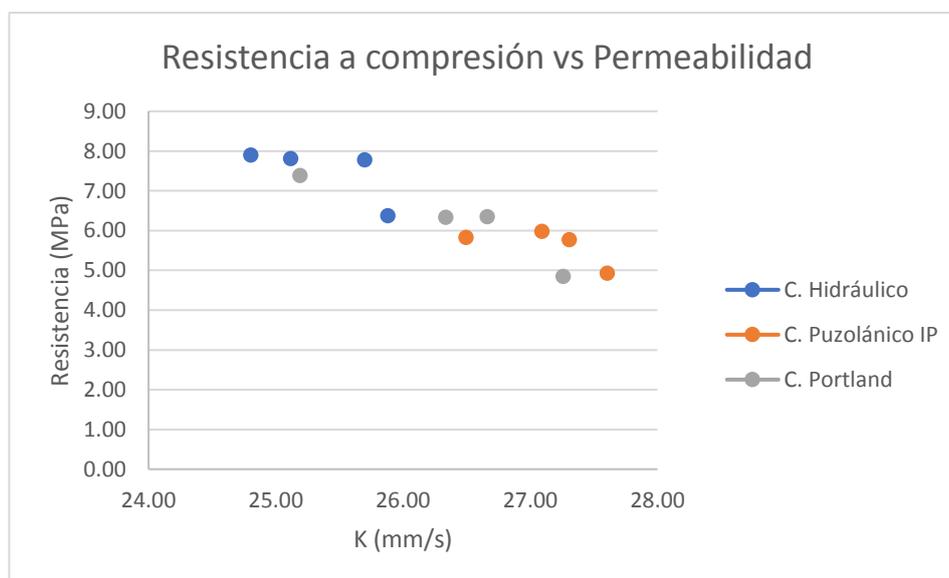


Figura 3.8 Relación entre constante de permeabilidad y resistencia a compresión independiente del tiempo de curado

Se realizó una aproximación lineal sobre la relación entre constante de permeabilidad y la resistencia a compresión de los especímenes a los distintos días de curado. Se encontró la siguiente ecuación

Donde

Mr es el módulo de rotura en Mega Pascales

K es la constante de permeabilidad en milímetros sobre segundo.

La regresión lineal dio como resultado un coeficiente de determinación R de 0.86, lo que indica que la aproximación representa bastante bien al comportamiento de la resistencia a compresión con respecto a la constante de permeabilidad de los especímenes.

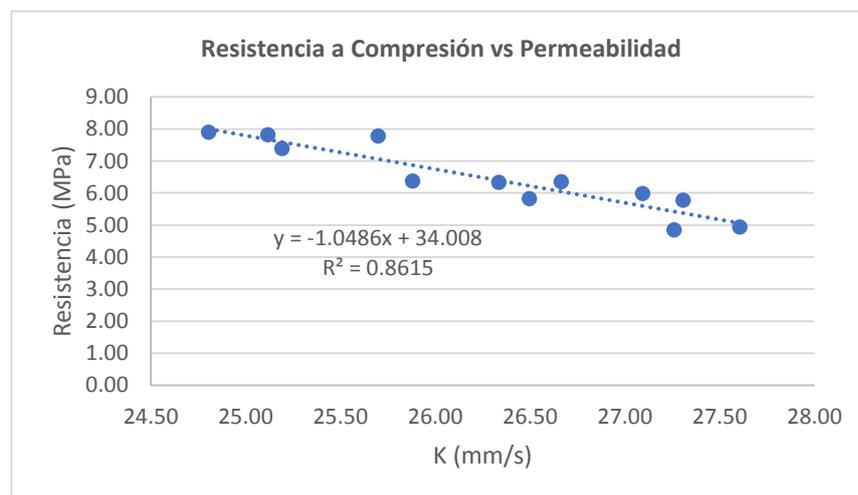


Figura 3.9 Aproximación lineal entre constante de permeabilidad y resistencia a compresión

## f. Evolución de la constante de permeabilidad en el tiempo de curado de los especímenes

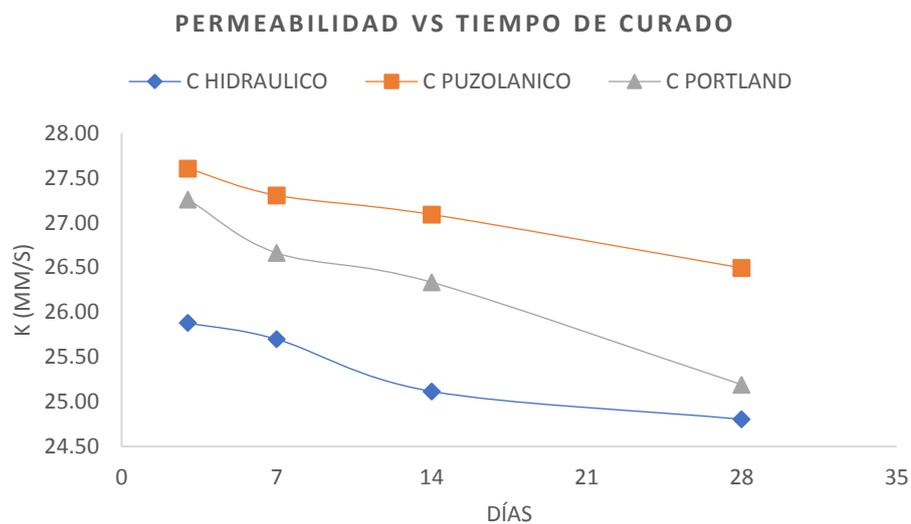


Figura 3.10 Evolución de la constante de permeabilidad con el tiempo de curado

Uno de los objetivos principales de la investigación era comprobar si las permeabilidades de los especímenes cambiaban con el tiempo de curado. De los resultados obtenidos e ilustrados en la figura 3.10 se puede observar que la permeabilidad baja con una tendencia casi lineal desde los 3 a los 28 días independientemente del cemento utilizado.

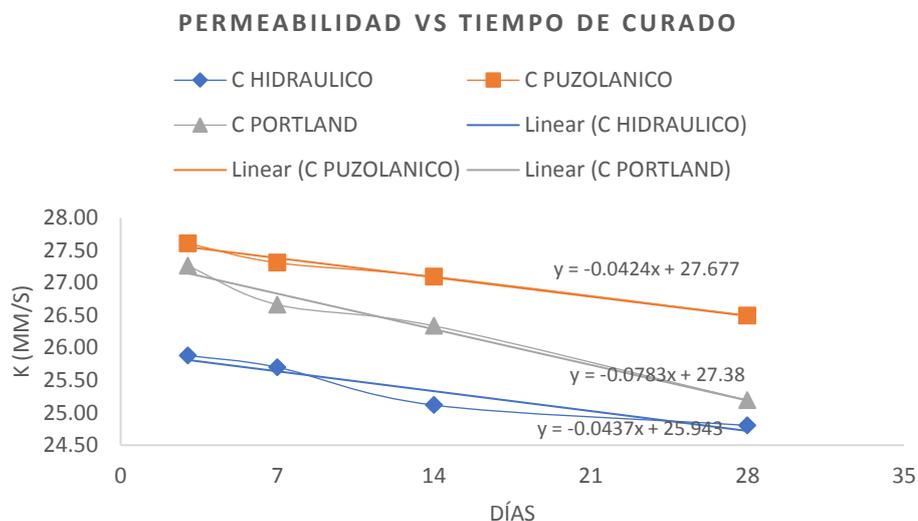


Figura 3.11 Aproximaciones lineales entre constante de permeabilidad y tiempo de curado

Como se puede observar en las ecuaciones de las aproximaciones lineales de la figura 3.11, la evolución de la permeabilidad es prácticamente la misma para los cementos Hidráulicos y Puzolánicos, mientras que se ve una disminución más abrupta de la permeabilidad en los especímenes de cemento Portland, teniendo la mayor pendiente de los tres casos.

Se puede observar que la pérdida de permeabilidad de los especímenes de cemento Portland se da entre los 14 y 28 días y que esta tendencia empata con el desarrollo de resistencia a compresión de los especímenes de cemento Portland en este periodo. Esta relación se podría dar por la reacción de la pasta de cemento, formando nuevos cristales, que disminuyen la permeabilidad de los especímenes.

### g. Relación entre constante de Permeabilidad y porcentaje de vacíos

Los resultados obtenidos para sobre el efecto que tiene el porcentaje de vacíos con la constante de permeabilidad de los cilindros de concreto permeables es que no se puede observar una relación aparente entre estas dos características de los especímenes. Estos resultados son coherentes con los resultados obtenidos por Neithenalth (2004) ilustrados en la figura 2.40.

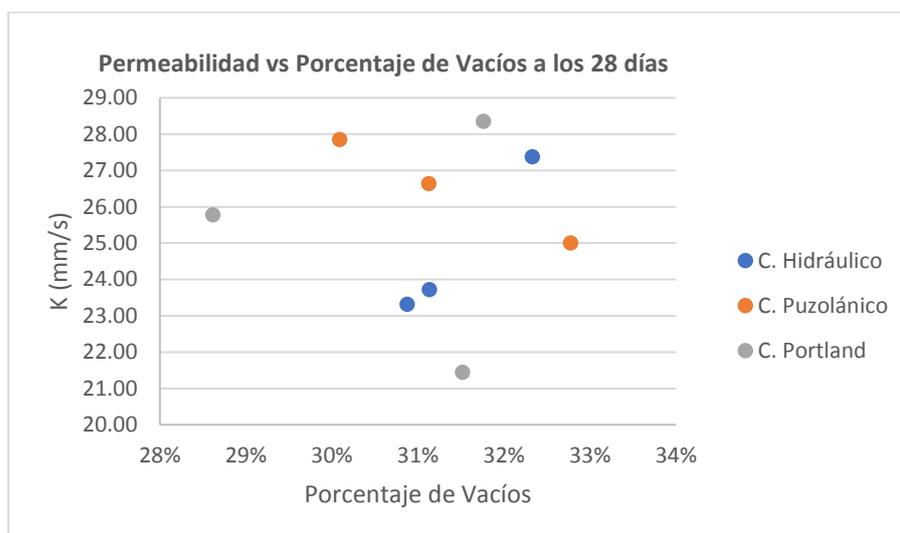


Figura 3.12 Efecto del porcentaje de vacíos en la constante de permabilidad

### h. Efecto del porcentaje de vacíos en la resistencia a flexión

En los ensayos de resistencia a flexión de las vigas de hormigón permeable, al igual que en los resultados de resistencia a compresión la falla de los elementos se dio por fractura del agregado grueso. Probablemente por este motivo la mayoría de vigas tuvieron un módulo de rotura similar, a pesar del porcentaje de vacíos de cada uno de los especímenes. La gráfica sugiere que el módulo de rotura para las vigas de concreto permeable es prácticamente

constante e independiente del porcentaje de vacíos de los mismos. Estos resultados van en contra de la literatura revisada y se dan probablemente por la rotura del agregado grueso en los elementos.

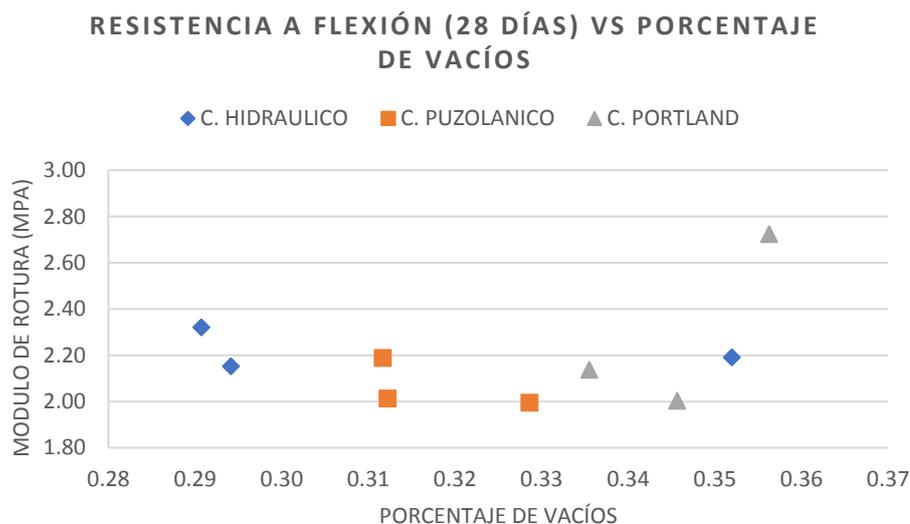


Figura 3.13 Relación entre porcentaje de vacíos y módulo de rotura a los 28 días

### **i. Relación entre resistencia a flexión y permeabilidad a los 28 días de curado**

Si bien los resultados de resistencia a flexión no son concluyentes debido a la falla por fractura del agregado grueso en los especímenes, se puede observar que el cemento Portland brinda las mejores propiedades ya que tiene la mayor resistencia a flexión y la diferencia en el índice de permeabilidad entre los especímenes de este cemento y los especímenes del cemento con menor resistencia a flexión (cemento Puzolánico tipo IP) es menos de 2 mm/s, la cual se puede tomar como una diferencia mínima y que no logra compensar la mayor resistencia a flexión obtenida con la utilización de cemento Portland..

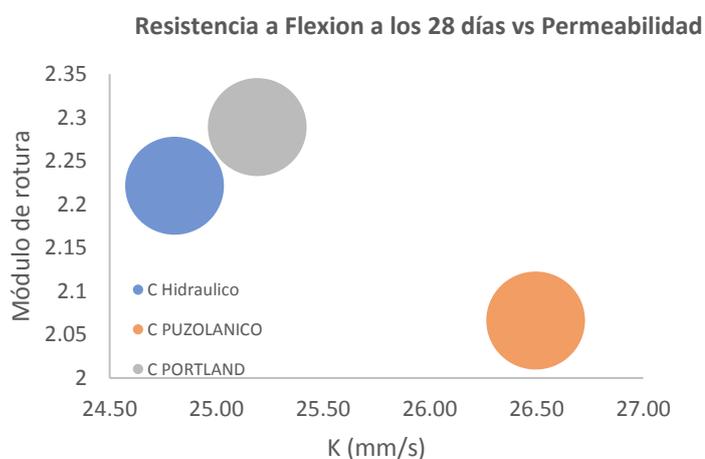


Figura 3.14 Relación entre resistencia a flexión y constante de permeabilidad a los 28 días

## j. Relación entre densidad y resistencia a flexión

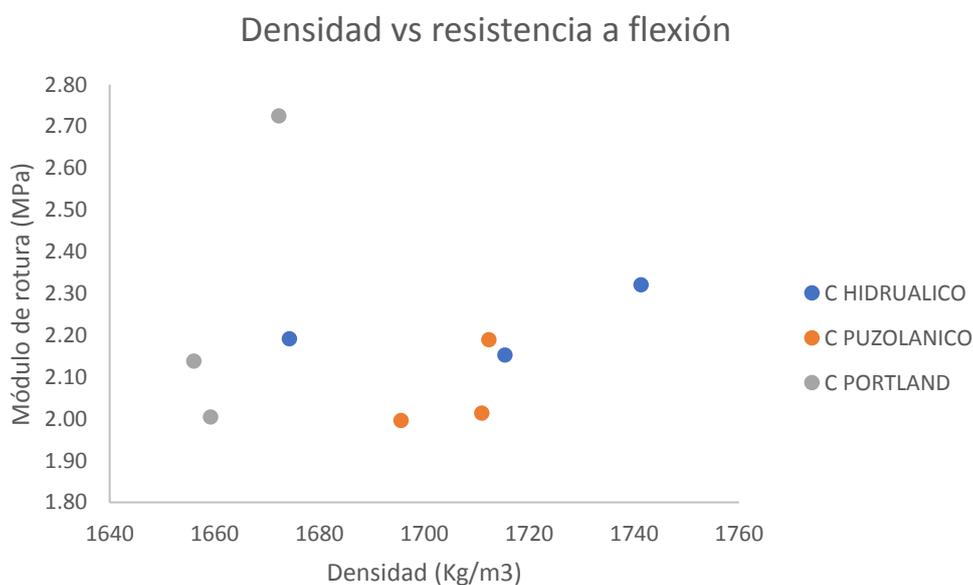
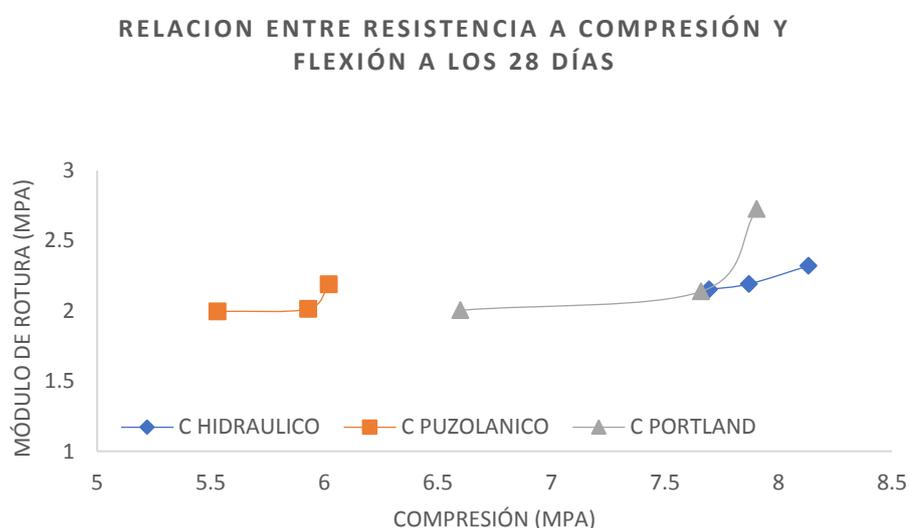


Figura 3.15 Relación entre densidad y módulo de rotura a los 28 días

Debido a la condición especificada previamente de que el modo de falla de los especímenes fue por fractura del agregado grueso, que dio lugar a resultados muy parecidos en el módulo de rotura para todos los especímenes. No se lograron obtener resultados concluyentes sobre el efecto de la densidad de los

especímenes en el módulo de rotura de la mezcla. De acuerdo con el gráfico se entendería que la densidad de los especímenes no influye en el módulo de rotura de los mismos. Estos resultados difieren con la literatura revisada sobre hormigones permeables y probablemente se dieron por la fractura del agregado grueso.

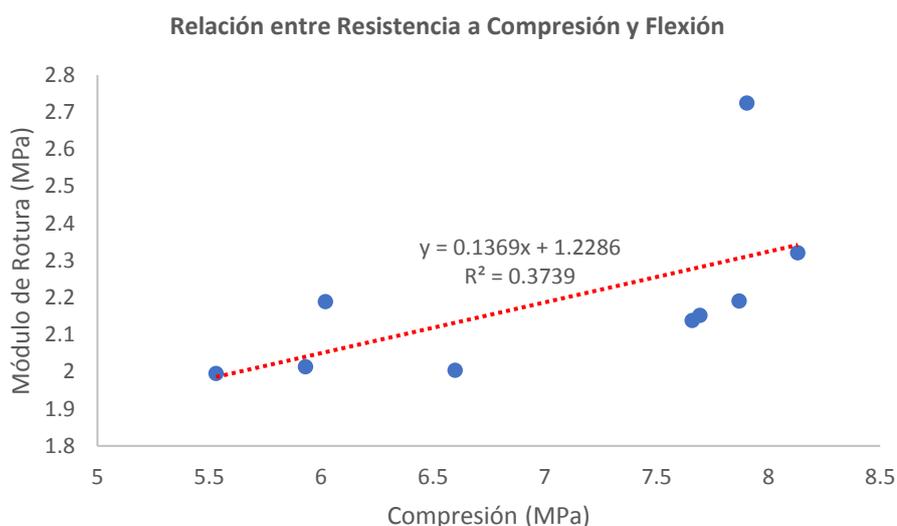
### k. Relación entre resistencia a compresión y flexión



*Figura 3.16 Relación entre resistencia a compresión y flexión a los 28 días*

La resistencia a compresión y a flexión de los especímenes de concreto permeable están relacionadas (a mayor resistencia a compresión se espera mayor resistencia a flexión en la matriz del concreto permeable) y dependen de la relación agua/cemento, agregado/cemento, energía de compactación y porcentaje de vacíos en la matriz de los elementos. Al mantener estos parámetros constantes, se esperaría tener relaciones parecidas entre los módulos de rotura y las resistencias a compresión para cada uno de los cementos. Al igual que en las otras relaciones investigadas que relacionan el

módulo de rotura de los especímenes, los resultados obtenidos son poco fiables, debidos al modo de falla de las vigas. Aun así, se puede observar que conforme aumenta la resistencia a compresión de los especímenes también suele aumentar el módulo de rotura de los especímenes.



*Figura 3.17 Aproximación lineal entre resistencia a compresión y módulo de rotura a los 28 días*

Se realizó una aproximación lineal tomando en cuenta todos los datos de resistencia a compresión en relación con la resistencia a flexión a los 28 días indistintamente del tipo de cemento utilizado. Se encontró la ecuación mostrada en la figura 3.17, con un coeficiente de correlación de 0.37 lo que indica que los datos están muy poco relacionados con la ecuación encontrada y que esta no logra modelar de manera real la relación entre estas dos variables.

## 4. Conclusiones y Recomendaciones

Los objetivos de la investigación se centraron en conocer las propiedades mecánicas y de filtración de especímenes de hormigón permeable realizados con los principales tipos de cemento presentes en el mercado ecuatoriano y comparar los resultados obtenidos de los distintos cementos para conocer qué cemento presentaba las mejores propiedades para este tipo de hormigones. Para lograr esto se realizó un estudio previo sobre los materiales a ser utilizados para la fundición de los especímenes, en especial de los agregados pétreos.

Se logró encontrar las principales características físicas de los agregados (densidad, porcentaje de absorción y resistencia a abrasión) siguiendo los procedimientos recomendados por las normas ASTM.

Una vez realizados los ensayos para los especímenes se encontró que, en la mayoría de muestras, el modo de falla fue por fractura del agregado grueso y no por rotura de la pasta de cemento como se esperaba en un principio. Esta situación no permitió obtener resultados concluyentes acerca de la influencia que tienen los distintos tipos de cementos sobre las propiedades mecánicas de los ejemplares de hormigón permeable, esta situación fue especialmente clara en el módulo de rotura de las vigas, donde la mayoría de elementos fallaron bajo cargas similares.

Con respecto a las propiedades mecánicas se pudo observar que los especímenes de cemento hidráulico presentaron la mayor resistencia a compresión, seguidos por los cilindros de cemento Portland, y los especímenes

de cemento Portland Puzolánico tipo IP fueron los que presentaron la menor resistencia a compresión. Cabe resaltar que, si bien los resultados obtenidos no fueron concluyentes, sí indican que la pasta de los diferentes cementos influye en la resistencia a compresión de los cilindros, como se puede observar en la relación entre resistencia a compresión y densidad de los cilindros donde los cilindros de cemento hidráulico alcanzaron la mayor resistencia, aun teniendo la menor densidad entre todos los especímenes. Los resultados obtenidos para resistencia a compresión de los cilindros indicaron que el cemento hidráulico es el que otorga mejores propiedades al hormigón permeable.

Con respecto a la resistencia a flexión de los especímenes no se logró tener resultados concluyentes debido al mecanismo de falla de las vigas, que derivaron en cargas de falla similares en todas las vigas. Los resultados obtenidos para resistencia a flexión reflejaban que ninguna característica mecánica de los especímenes de hormigón permeable (porcentaje de vacíos, densidad, etc.) tenían influencia en la resistencia de las vigas, lo cual contradice al comportamiento general del hormigón permeable.

El estudio de la constante de permeabilidad de los especímenes de hormigón permeable para los distintos tipos de cementos mostró que la evolución de esta constante en el tiempo de curado fue similar para todos los tipos de cemento. Además, se observó que la permeabilidad de los especímenes era inversa a la resistencia a compresión de los especímenes, es decir el cemento que desarrolló la menor resistencia a compresión (cemento Portland Puzolánico tipo IP) fue el que logró el mayor coeficiente de permeabilidad, mientras que los

especímenes realizados con cemento hidráulico (alcanzaron la mayor resistencia a compresión) fueron los que tuvieron menor coeficiente de permeabilidad. De igual manera los resultados de evolución de coeficiente de permeabilidad en relación con la resistencia a compresión de los especímenes mostraron una resistencia casi lineal e inversa, lo que permite concluir que la permeabilidad está estrechamente relacionada con la resistencia a compresión y es independiente del tipo de cemento utilizado.

Para investigaciones futuras se recomienda investigar sobre el efecto del tipo de agregado en la resistencia de los elementos de hormigón permeable e investigar si la utilización de distintas granulometrías o métodos de compactación pueden evitar este mecanismo de falla en los especímenes de hormigón permeable.

## 5. Referencias

- ASTM Standard C128. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. *ASTM INTERNATIONAL*. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org).
- Neptune, A. I., & Putman, B. J. (2010). Effect of Aggregate Size and Gradation on Pervious Concrete Mixtures. *ACI Materials Journal*, 625-631.
- ACI 522R. (2010). *Report on Pervious Concrete*. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute.
- Aire, C., Mendoza, C. J., & Pérez, D. (2012). Hormigón Permeable. Estudio experimental usando andesitas de 9.5 y 19 mm. *Revista Técnica Cemento Hormigón*, 52-59.
- Ajamu, S. O., Jimoh, A. A., & Oluremi, J. R. (2012). Evaluation of Structural Performance of Pervious Concrete in Construction. *International Journal of Engineering and Technology*, 829-836.
- Aoki, Y. (2009). *DEVELOPMENT OF PERVIOUS CONCRETE*. Sydney: University of Technology, Sydney.
- ASTM Standard C1064/1064M. (2012). Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete. *ASTM INTERNATIONAL*. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard C1064/C1064M. (2012). Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete. *ASTM INTERNATIONAL*. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard C1157. (2011). Standard Performance Specification for Hydraulic Cement. *ASTM INTERNATIONAL*. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard C127. (2012). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. *ASTM INTERNATIONAL*. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard C131. (2006). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. *ASTM INTERNATIONAL*. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard C136. (2006). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *ASTM INTERNATIONAL*. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard C143/C143M. (2012). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. *ASTM INTERNATIONAL*. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard C143/C143M. (2012). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. *ASTM INTERNATIONAL*. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard C150/C150M. (2012). Standard Specification of Portland Cement. *ASTM INTERNATIONAL*. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard C192. (2014). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. *ASTM INTERNATIONAL*. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard C231/231M. (2010). Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method. *ASTM INTERNATIONAL*. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard C294. (2012). Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates. *ASTM INTERNATIONAL*. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard C33. (2013). Standard Specification for Concrete Aggregates. *ASTM INTERNATIONAL*. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard C33/C33M. (2013). Specification for Concrete Aggregates. *ASTM INTERNATIONAL*. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard C39/C39M. (2014). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *ASTM INTERNATIONAL*. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard C702. (2011). Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. *ASTM INTERNATIONAL*. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM Standard C78/C78M. (2010). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. Obtenido de ASTM INTERNATIONAL: [www.astm.org](http://www.astm.org)

Beeldens, A., Van Gemert, D., & Caestecker, C. (2004). *Pervious Concrete*.

Bhutta, A. R., Tsuruta, K., & Mirza, J. (2012). Evaluation of high-performance porous concrete properties. *Construction and Building Materials*, 67-73.

Chopra, M., Wanielista, M., & Mulligan, A. M. (2007). *Compressive Strength of Pervious Concrete Pavements*. Orlando, FL: Stormwater Management Academy University of Central Florida.

Crouch, L. K., & Et, A. (s.f.). *Pervious PCC Compressive Strength in the Laboratory and the Field: The Effects of*. Obtenido de Ready Mixed Concrete (RMC) Research & Education Foundation : <http://rmcfoundation.org/images/PCRC%20Files/Construction%20Techniques/Pervious%20PCC%20Compressive%20Strength%20in%20the%20Laboratory%20and%20the%20Field.pdf>

Crouch, L. K., Pitt, J., & Hewitt, R. (2007). Aggregate Effects on Pervious Portland Cement Concrete Static Modulus of Elasticity. *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*, 561-568.

Francis, A. M. (1965). Early Buildings in Great Britain. *Journal of Concrete and Construction Engineering*, 73-75.

- Gaedicke, C., & Et, A. (2016). A method to correlate splitting tensile strength and compressive strength of pervious concrete cylinders and cores. *Construction and Building Materials*, 271-278.
- Ghafoori , N., & Dutta, S. (1995). Laboratory Investigation of compacted no fines concrete for paving materials. *J MATER CIV ING*, 183-191.
- Joung, Y. M. (2008). *EVALUATION AND OPTIMIZATION OF PERVIOUS CONCRETE WITH RESPECT TO PERMEABILITY AND CLOGGING*. College Station, TX: Texas A&M University.
- Kevern, J. T. (2008). *Advancements in pervious concrete technology*. Ames, Iowa: Iowa State University.
- Malhotra, V. (1976). No fine concrete- It's properties and applications. *ACI Proceedings Journal*, 628-644.
- Meininger, R. (1988). No fines pervious concrete for paving. *Concrete International*, 20-27.
- Mulligan, A. M. (2005). *Attainable compressive strength of pervious concrete paving systems*. Obtenido de Stormwater Management Academy University of Central Florida: [http://www.stormwater.ucf.edu/research/chopra\\_publications/mulligan\\_ann\\_m\\_200508\\_ms.pdf](http://www.stormwater.ucf.edu/research/chopra_publications/mulligan_ann_m_200508_ms.pdf)
- National Ready Mix Concrete Associaton. (2004). *CIP 38 Pervious Concrete*. Obtenido de National Ready Mix Concrete Associaton: <https://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/38p.pdf>

- Neithenalth, N. (2004). *Development and Characterization of accoustically efficient cementitious materials*. West Lafayette, Indiana: Purdue University.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. Harlow: Pearson Education Limited.
- Olek J., & Weiss, J. (2003). Development of quiet and durable Porous Portland Cement Concrete Paving Materials. *Final Report*. West Lafayette, Indiana: Purdue University.
- SIKA. (s.f.). *A Guide to Pervious Concrete*. Lyndshurst,NJ: Sika Corporation.
- Suleiman, M. T., Kevern, J., Schaefer, V., & Wang, K. (2006). *Effect of Compaction Energy on Pervious Concrete Properties* . Obtenido de Ready Mixed Concrete (RMC) Research & Education Foundation : <http://www.rmc-foundation.org/images/PCRC%20Files/Construction%20Techniques/Effect%20of%20Compaction%20Energy%20on%20Pervious%20Concrete%20Properties.pdf>
- Tejas, J., & Urmil, D. (2016). EVALUATION OF STRENGTH, PERMEABILITY AND VOID RATIO OF PERVIOUS CONCRETE WITH CHANGING W/C RATIO AND AGGREGATE SIZE. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 276-284.
- Tennis, P. D., Leming , M. L., & Akers, D. J. (2004). *Pervious Concrete Pavements*. Skokie, Illionis y Silver Spring, Maryland: Portland Cement Association y National Ready Mixed Concrete Association.

*The Concrete Society*. (s.f.). Obtenido de Wimpey No fines concrete:  
<http://www.concrete.org.uk/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=904>

Wang K, e. A. (2015). *Development of Mix Proportion for Functional and Durable Pervious Concrete*. Obtenido de Research Gate:  
[https://www.researchgate.net/publication/264841848\\_Development\\_of\\_Mix\\_Proportion\\_for\\_Functional\\_and\\_Durable\\_Pervious\\_Concrete](https://www.researchgate.net/publication/264841848_Development_of_Mix_Proportion_for_Functional_and_Durable_Pervious_Concrete)

Yang, J., & Jiang, G. (2003). Experimental Study on Properties of Pervious Concrete Pavement Materials. *Cement and Concrete Research*, 381-386.

Youngmin Joung, Z. C. (2008). *Evaluation and Optimization of Durable Pervious Concrete for Use in Urban Areas*. College Station, TX: Texas Transportation Institute, Texas A&M University System .

Zouaghi, A., & et , A. (2000). Fundamental Study on Properties of pervious concrete and it's applicability to control stormwater runoff. *Transaction of the Japan Concrete Institute*, 43-50.

## 6. Anexos

### ANEXO 1. TABLA DE CILINDROS CON CEMENTO HIDRÁULICO ENSAYADOS A COMPRESIÓN

Cemento Hidráulico GU Resistencia a Compresión MPa													
DÍAS	Especímen	Diámetro mm				Altura mm				Peso	Fuerza	Resistenci	Resistencia
		D1	D2	D3	Promedio	H1	H2	H3	Promedio	Gramos	KN	Mpa	Promedio Mpa
3	C4	99.5	99.75	99.75	99.67	205	205	205	205.00	2807.2	52.26	6.68	6.37
	C5	99.5	100.25	100.25	100.00	197	197	199	197.67	2719.5	47.55	6.05	
	C6	100.5	100.5	100.5	100.50	203	204	201	202.67	2729.3	50.62	6.391	
7	C7	101	101.5	100	100.83	202	202	200	201.33	2695.9	56.39	7.31	7.78
	C8	100	99.75	100.5	100.08	202	205	200	202.33	2721.4	61.14	7.86	
	C9	101.5	100.5	100.75	100.92	204	203	203	203.33	2753.8	62.22	8.165	
14	C10	99	99.75	100	99.58	204	205	205	204.67	2742	62.55	8.05	7.82
	C11	99.75	100	99.75	99.83	203	201	204	202.67	2804.7	57.63	7.42	
	C12	99.25	99.5	100	99.58	202	200	202	201.33	2703.3	61.72	7.98	
28	C13	98.75	100.5	99.25	99.50	203	200	204	202.33	2694	58.956	7.694	7.90
	C14	100.25	101	100	100.42	201	205	202	202.67	2706.2	62.17	7.87	
	C15	100	100.5	100.25	100.25	201	203	200	201.33	2701.4	63.866	8.132	

### ANEXO 2. TABLA DE CILINDROS CON CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO ENSAYADOS A COMPRESIÓN

Cemento IP Resistencia a Compresión MPa													
DÍAS	Especímen	Diámetro mm				Altura mm				Peso	Fuerza	Resistenci	Resistencia
		D1	D2	D3	Promedio	H1	H2	H3	Promedio	Gramos	KN	Mpa	Promedio Mpa
3	C4	101.5	101.5	101.5	101.50	202	204	202	202.67	2725.8	36.81	4.64	4.93
	C5	100.25	102	100.75	101.00	202	200	197	199.67	2695	40.83	5.42	
	C6	101.75	102	102	101.92	203	205	204	204.00	2686.1	36.874	4.74	
7	C7	102	100.75	101	101.25	204	202	201	202.33	2707.2	52.41	6.774	5.77
	C8	100.5	100.5	100.5	100.50	202	200	202	201.33	2693	44.88	5.9	
	C9	100.75	101.5	101	101.08	202	202	203	202.33	2719.5	36.31	4.65	
14	C10	100.75	101	101	100.92	203	205	203	203.67	2633.7	43.83	5.74	5.98
	C11	99.75	99.75	100.25	99.92	200	198	200	199.33	2675.8	50.11	6.39	
	C12	100.5	101	101	100.83	201	200	200	200.33	2699.9	45.56	5.81	
28	C13	100.5	101	100	100.50	198	204	203	201.67	2641.1	47.757	6.02	5.83
	C14	101.25	102	100	101.08	198	200	202	200.00	2673.9	46.539	5.93	
	C15	100	101.75	103	101.58	202	202	201	201.67	2726.3	43.43	5.53	

### ANEXO 3. TABLA DE CILINDROS CON CEMENTO PORTLAND ENSAYADOS A COMPRESIÓN

Cemento Portland Resistencia a Compresión MPa													
DÍAS	Especímen	Diámetro mm				Altura mm				Peso	Fuerza	Resistencia	Resistencia
		D1	D2	D3	Promedio	H1	H2	H3	Promedio	Gramos	KN	Mpa	Promedio Mpa
3	C4	100.5	101	101.25	100.92	204	202	205	203.67	2610.7	35.59	4.54	4.85
	C5	101.5	101.25	101.25	101.33	200	205	204	203.00	2649.4	38.01	4.85	
	C6	101	101.25	101	101.08	203	198	205	202.00	2637.6	38.95	5.164	
7	C7	102	101.75	102	101.92	202	201	201	201.33	2666.5	61.58	7.92	6.35
	C8	100.75	101	101	100.92	200	199	203	200.67	2631.6	42.59	5.644	
	C9	100.5	101.25	100.5	100.75	203	202	200	201.67	2648	41.2	5.5	
14	C10	100.75	100	100.5	100.42	205	202	205	204.00	2738.1	50.85	6.5	6.34
	C11	99.75	100	99.5	99.75	200	200	200	200.00	2686.2	46.86	5.9	
	C12	100.5	102	100	100.83	198	198	202	199.33	2569.6	51.56	6.61	
28	C13	100.5	101	100	100.50	202	205	200	202.33	2706.2	52.124	6.6	7.39
	C14	101.75	101	99.5	100.75	200	198	201	199.67	2806.7	62.079	7.904	
	C15	102.25	101	102	101.75	203	200	201	201.33	2827.3	59.857	7.659	

#### ANEXO 4. TABLA DE VIGAS CON CEMENTO HIDRÁULICO ENSAYADAS A FLEXIÓN

Cemento Hidráulico GU Módulo de Ruptura a los 28 días																
Especímen	Base mm				Altura mm				Profundidad mm				Peso	Fuerza	Mr	
	B1	B2	B3	Promedio	H1	H2	H3	Promedio	P1	P2	P3	Promedio	Gramos	KN	Mpa	
Viga 1	150	152	150	150.67	151	155	152	152.67	450	451	450	450.33	17368.54	18.16	2.15	
Viga 2	148	150	151	149.67	153	154	150	152.33	450	448	449	449.00	16952.04	18.49	2.19	
Viga 3	150	149	149	149.33	150	151	153	151.33	449	448	448	448.33	17631.18	19.58	2.32	

#### ANEXO 5. TABLA DE VIGAS CON CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO TIPO IP ENSAYADAS A FLEXIÓN

Cemento IP Módulo de Ruptura a los 28 días																
Especímen	Base mm				Altura mm				Profundidad mm				Peso	Fuerza	Mr	
	B1	B2	B3	Promedio	H1	H2	H3	Promedio	P1	P2	P3	Promedio	Gramos	KN	Mpa	
Viga 1	150	149	149	149.33	148	152	155	151.67	453	452	453	452.67	17337.2	18.47	2.19	
Viga 2	148	150	150	149.33	151	150	153	151.33	450	451	451	450.67	17167.6	16.84	2.00	
Viga 3	150	151	150	150.33	155	154	150	153.00	450	450	450	450.00	17323.5	16.99	2.01	

#### ANEXO 6. TABLA DE VIGAS CON CEMENTO PORTLAND ENSAYADAS A FLEXIÓN

Cemento Portland Módulo de Ruptura a los 28 días																
Especímen	Base mm				Altura mm				Profundidad mm				Peso	Fuerza	Mr	
	B1	B2	B3	Promedio	H1	H2	H3	Promedio	P1	P2	P3	Promedio	Gramos	KN	Mpa	
Viga 1	150	149	150	149.67	153	150	151	151.33	450	451	450	450.33	16931.46	22.99	2.724741	
Viga 2	151	150	150	150.33	152	151	151	151.33	450	449	449	449.33	16800.14	16.91	2.004148	
Viga 3	152	150	153	151.67	150	150	153	151.00	451	451	451	451.00	16767.8	18.04	2.138074	

## ANEXO 7 DATOS DE PERMEABILIDAD DE CILINDROS CON CEMENTO HIDRÁULICO

Cemento Hidráulico GU Permeabilidad																
Especimen	Diámetro mm				Altura mm				Peso	Tiempo (seg)				Tiempo (s)	k	K Promedio
	D1	D2	D3	Promedio	H1	H2	H3	Promedio		T1	T2	T3	Promedio			
C1 3 DÍAS	100	102	100	100.5	148	148	150	148.67	2026	10.02	10.2	9.98	10.06	9.38	23.41	25.88
C2 3 DÍAS	102	100	99	100.25	149	150	151	150.00	2019.5	9.55	9.63	9.33	9.50		24.88	
C3 3 DÍAS	101	101	100	100.5833	160	158	158	158.67	2051.5	8.6	8.66	8.47	8.58		29.35	
C1 7 DÍAS	101	103	102	101.8333	148	148	150	148.67	2026	10.26	10.2	10.15	10.21	9.53	23.68	25.70
C2 7 DÍAS	102	100	99	100.25	149	150	151	150.00	2019.5	9.71	9.83	9.53	9.69		24.40	
C3 7 DÍAS	101	101	100	100.5833	160	158	158	158.67	2051.5	8.89	8.55	8.59	8.68		29.02	
C1 14 DÍAS	101	103	102	101.8333	148	148	150	148.67	2026	10.42	10.5	10.64	10.52	9.76	22.98	25.12
C2 14 DÍAS	102	100	99	100.25	149	150	151	150.00	2019.5	9.87	10	9.93	9.94		23.79	
C3 14 DÍAS	101	101	100	100.5833	160	158	158	158.67	2051.5	8.65	8.94	8.83	8.81		28.59	
C1 28 DÍAS	101	103	102	101.8333	148	148	150	148.67	2026	10.42	10.2	10.52	10.37	9.84	23.32	24.80
C2 28 DÍAS	102	100	99	100.25	149	150	151	150.00	2019.5	10.02	9.91	9.97	9.97		23.72	
C3 28 DÍAS	101	101	100	100.5833	160	158	158	158.67	2051.5	9.19	9.27	9.13	9.20		27.37	

## ANEXO 8 DATOS DE PERMEABILIDAD DE CILINDROS CON CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO TIPO IP

Cemento IP Permeabilidad																
Especimen	Diámetro mm				Altura mm				Peso	Tiempo (seg)				Tiempo (s)	k	K Promedio
	D1	D2	D3	Promedio	H1	H2	H3	Promedio		Gramos	T1	T2	T3			
C1 3 DÍAS	101	101	99	100.0833	154	152	152	152.6667	2086.5	9.25	9.07	8.9	9.07	8.82	26.4325	27.61
C2 3 DÍAS	102	102	103	101.9167	150	152	148	150	2021.5	8.94	8.75	8.82	8.84		27.6523	
C3 3 DÍAS	99.5	102	103	101.25	154	152	152	152.6667	2054.5	8.66	8.5	8.47	8.54		28.7306	
C1 7 DÍAS	101	101	99	100.0833	154	152	152	152.6667	2086.5	9.37	8.99	9.4	9.25	8.92	25.9184	27.31
C2 7 DÍAS	102	102	103	101.9167	150	152	148	150	2021.5	8.8	8.5	9.08	8.79		27.7886	
C3 7 DÍAS	99.5	102	103	101.25	154	152	152	152.6667	2054.5	8.88	8.71	8.51	8.70		28.2132	
C1 14 DÍAS	101	101	99	100.0833	154	152	152	152.6667	2086.5	9.03	9.02	9.32	9.12	8.98	26.2877	27.09
C2 14 DÍAS	102	102	103	101.9167	150	152	148	150	2021.5	9.1	9.14	9.05	9.10		26.8619	
C3 14 DÍAS	99.5	102	103	101.25	154	152	152	152.6667	2054.5	8.54	8.67	8.97	8.73		28.127	
C1 28 DÍAS	101	101	99	100.0833	154	152	152	152.6667	2086.5	9.54	9.67	9.57	9.59	9.19	24.9998	26.50
C2 28 DÍAS	102	102	103	101.9167	150	152	148	150	2021.5	9.04	9.21	9.27	9.17		26.6374	
C3 28 DÍAS	99.5	102	103	101.25	154	152	152	152.6667	2054.5	8.79	8.78	8.87	8.81		27.8504	

## ANEXO 9. DATOS DE PERMEABILIDAD DE CILINDROS CON CEMENTO PORTLAND

Cemento Portland Permeabilidad																
Especimen	Diámetro mm				Altura mm				Peso	Tiempo (seg)				Tiempo (s)	k	K Promedio
	D1	D2	D3	Promedio	H1	H2	H3	Promedio		Gramos	T1	T2	T3			
C1 3 DÍAS	100	102	99.5	100.4167	148	150	149	149	1972.5	8.36	8.23	8.27	8.29	8.94	28.4352	27.26
C2 3 DÍAS	101	101	100	100.5	150	154	151	151.6667	1966.5	7.88	7.82	8.19	7.96		30.1693	
C3 3 DÍAS	101	102	101	101.25	154	150	153	152.3333	2186	10.6	10.51	10.6	10.57		23.1712	
C1 7 DÍAS	100	102	99.5	100.4167	148	150	149	149	1972.5	8.45	8.58	8.46	8.50	9.19	27.7324	26.66
C2 7 DÍAS	101	101	100	100.5	150	154	151	151.6667	1966.5	7.82	8.05	7.95	7.94		30.258	
C3 7 DÍAS	101	102	101	101.25	154	150	153	152.3333	2186	11.1	11	11.3	11.13		22.9987	
C1 14 DÍAS	100	102	99.5	100.4167	148	150	149	149	1972.5	8.59	8.65	8.73	8.66	9.26	27.2198	26.34
C2 14 DÍAS	101	101	100	100.5	150	154	151	151.6667	1966.5	8.15	8.29	8.06	8.17		29.4182	
C3 14 DÍAS	101	102	101	101.25	154	150	153	152.3333	2186	11	11.26	10.55	10.95		22.3671	
C1 28 DÍAS	100	102	99.5	100.4167	148	150	149	149	1972.5	9.01	9.13	9.28	9.14	9.68	25.7804	25.19
C2 28 DÍAS	101	101	100	100.5	150	154	151	151.6667	1966.5	8.56	8.47	8.39	8.47		28.3535	
C3 28 DÍAS	101	102	101	101.25	154	150	153	152.3333	2186	11.5	11.58	11.23	11.42		21.4403	

ANEXO 10. PORCENTAJE DE VACÍOS DE ESPECÍMENES ENSAYADOS  
A LOS 28 DÍAS.

Cemento	Elemento	Peso Seco (g)	Peso Sumergido (g)	% Vacíos
Hidráulico	C13	2694	1614.5	31%
	C14	2706.2	1618	31%
	C15	2701.4	1619	31%
	V1	17368.54	10222	29%
	V2	16952.04	10391	35%
	V3	17631.18	10450	29%
Puzolánico	C13	2641.1	1604	34%
	C14	2673.9	1618	33%
	C15	2726.3	1646.5	31%
	V1	17337.18	10368	31%
	V2	17167.64	10370	33%
	V3	17323.46	10360	31%
Portland	C13	2706.2	1649	33%
	C14	2806.7	1694	29%
	C15	2827.3	1712	29%
	V1	16931.46	10414	36%
	V2	16800.14	10175	35%
	V3	16767.8	10040	34%

ANEXO 11. PORCENTAJE DE VACÍOS DE ELEMENTOS ENSAYADOS  
PARA PERMEABILIDAD

Cemento	Elemento	Peso Seco (g)	Peso Sumergido (g)	% Vacíos
Hidráulico	C1	2228.6	1132	30%
	C2	2271.5	1179	31%
	C3	2256.7	1183	32%
Puzolánico	C1	2295.2	1228.5	32%
	C2	2223.7	1131	31%
	C3	2260.0	1151	30%
Portland	C1	2295.2	1163	28%
	C2	2223.7	1141	31%
	C3	2260.0	1173.5	31%

ANEXO 12. FOTOGRAFÍA VIGAS ENSAYADAS



ANEXO 13. CILINDRO CON FALLA POR ROTURA DE AGREGADO



ANEXO 14 VIGA ENSAYADA A FLEXIÓN



ANEXO 15. AGREGADO CON FORMA ELONGADA ENCONTRADO EN EL LOTE UTILIZADO PARA LA FUNDICIÓN DE LOS ESPECÍMENES



## ANEXO 16. PLANO DE FALLA DE VIGA ENSAYADA A FLEXIÓN

