

**ESTUDIO DE UNA MEZCLA EN CONCRETO CON ESTRUCTURA DRENANTE
FABRICADO CON AGREGADOS DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO
DEL MUNICIPIO DE IPIALES**

ÁNGELA MARÍA ORTEGA MORENO

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2015**

**ESTUDIO DE UNA MEZCLA EN CONCRETO CON ESTRUCTURA DRENANTE
FABRICADO CON AGREGADOS DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO
DEL MUNICIPIO DE IPIALES**

ÁNGELA MARÍA ORTEGA MORENO

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniera Civil**

**Director
I.C. ESP. VICENTE PARRA SANTACRUZ**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2015**

NOTA DE RESPONSABILIDAD

Las ideas y conclusiones aportadas en este Trabajo de Grado son Responsabilidad de los autores.

Artículo 1 del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966, emanado del honorable Concejo Directivo de la Universidad de Nariño.

“La Universidad de Nariño no se hace responsable de las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”.

Artículo 13, Acuerdo N. 005 de 2010 emanado del Honorable Consejo Académico.

Nota de Aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

San Juan de Pasto, Enero de 2015

DEDICATORIA

A Dios por derramar sus bendiciones sobre mí y llenarme de mucha fortaleza para vencer todos los obstáculos y retos desde el principio de mi vida.

A mis padres por su infinito amor, sacrificio y esfuerzo por darme una carrera profesional para asegurarme un buen futuro, y por ser la mejor fuente de inspiración de tenacidad para seguir luchando por mis sueños.

A mis hermanos, la mejor herencia que pudieron dejarme mis padres, a ellos por brindarme su apoyo incondicional y no permitir que decayera por más difícil que fuera la tormenta.

A mi director de tesis por su apoyo, orientación y experiencia que me brindó en todo el proceso de este trabajo de grado y creer en mi capacidad.

A mis amigos por su apoyo y motivación para seguir adelante.

Y por último y no menos importante, este trabajo de grado se lo dedico a las personas que les resulte interesante y saquen provecho de esta investigación.

Ángela María Ortega Moreno

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por sus bendiciones y hacer realidad este sueño tan anhelado.

A la UNIVERSIDAD DE NARIÑO, por permitirme estudiar y formarme como profesional.

A mi director de tesis, Ing. Vicente Parra Santacruz quien con sus conocimientos, su experiencia, sus consejos y visión crítica han logrado en mí que pueda terminar mi trabajo de grado con éxito.

Al Mg. Arsenio Hidalgo por su apoyo brindado en los conocimientos de estadística.

A mis hermanos, Ing. Luis Germán Ortega Moreno y al Ing. Fidel Humberto Ortega Moreno, por su valioso apoyo y conocimientos aportados a lo largo de mi formación profesional.

A la empresa TRITURADOS & CONCRETOS EN OBRA S.A, Arq. Jairo Luis Chávez, Dra. Katherine Delgado y demás personal de la empresa por permitirme llevar a cabo los ensayos de materiales en su laboratorio y la disponibilidad del material.

A mis profesores de toda mi carrera profesional, porque con su sabiduría y enseñanza han aportado inmensamente en mi formación.

A todos ellos, muchas gracias

RESUMEN

A menudo el impacto ambiental se asocia con el desarrollo y expansión de zonas urbanas las cuales conducen a un efecto negativo, entre los que se encuentran la impermeabilización del suelo. Este efecto promueve a incrementar la escasez de agua alterando el ciclo natural al interrumpir la filtración al subsuelo y de esta forma desabastecer los mantos acuíferos al no permitir que se recarguen. Por otra parte, el inconveniente que genera la escorrentía superficial como producto de la lluvia sobre pavimentos impermeables, que no sólo es la de llevar agentes contaminantes a desembocar en muchas ocasiones a ríos, sino también la de generar desestabilización en la seguridad y funcionalidad vial al presentar una delgada película de agua dando lugar al fenómeno de hidroplaneo como producto de una deficiente adherencia neumático-pavimento. Rodríguez (2008), afirma que “El concreto permeable forma parte de las tendencias de la construcción sostenible como uno de los sistemas urbanos de drenaje más completos” (p.5).

Desde el punto de vista técnico los requisitos principales a exigir en un concreto permeable, son: resistencia, permeabilidad y durabilidad. Las dos primeras propiedades citadas son contrapuestas, por lo tanto, adquieren mayor importancia en el momento del diseño y elaboración de este tipo de concreto para buscar su equilibrio. El concreto permeable sin embargo presenta deficiencias que limitan su aplicación en pavimentos. Estas limitaciones se deben principalmente a las bajas resistencias en comparación con el concreto convencional.

A lo largo de esta investigación se busca principalmente estudiar un concreto con estructura drenante mediante la dosificación y elaboración de mezclas utilizando agregados de fuentes que abastecen al municipio de Ipiales como son: arena de la mina “Sand Pit” localizada en el corregimiento del Espino y el agregado grueso de la mina “El Pedregal” localizada en el municipio de Puerres.

Se elaboran dos tipos de concreto permeable teniendo en cuenta el proceso y análisis de dosificación establecido en esta investigación con base en la experiencia obtenida en otros estudios. Los tipos de concreto permeable a analizar están denominados como CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos) donde se emplea: cemento portland Tipo I marca Argos, agua potable, agregado grueso condicionado en su granulometría proveniente de la mina “El Pedregal”; el otro tipo de concreto permeable se denomina CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos) empleando cemento portland Tipo I marca Argos, agua potable, agregado grueso condicionado en su granulometría proveniente de la mina “El Pedregal” y agregado fino condicionado en su granulometría proveniente de la mina “Sand Pit”.

Seguidamente para cada tipo de concreto permeable se prepara las mezclas elaborando cilindros de prueba de 4 x 8 pulgadas (diámetro y altura) con el fin de verificar el proceso matemático de dosificación para proceder a realizar la muestra piloto y mediante procesos estadísticos determinar el tamaño de la muestra definitiva a analizar.

En la mezcla definitiva para cada concreto permeable CONCRETO MODIFICADO TIPO I y CONCRETO MODIFICADO TIPO II, se encuentran subgrupos de mezclas condicionadas bajo cinco (5) relaciones agua/cemento 0.38, 0.36, 0.34, 0.32 y 0.30; explícitamente diseñadas para evaluar el efecto que produce cambiar las proporciones en cuanto a cantidad de cemento y agua, sobre la resistencia a la compresión y coeficiente de permeabilidad. De acuerdo al análisis, procedimiento y cálculos efectuados para determinar el tamaño de muestra se establece que por cada relación agua/cemento se elabora 14 cilindros distribuidos de la siguiente forma: 7 cilindros para prueba de resistencia a la compresión a 14 días y los otros 7 cilindros para pruebas de estimación del porcentaje de vacíos, determinación del coeficiente de permeabilidad y resistencia a la compresión a 28 días. Sumando un total de 140 especímenes a analizar (70 para CONCRETO MODIFICADO TIPO I y 70 para CONCRETO MODIFICADO TIPO II).

De los resultados obtenidos de los ensayos realizados permitieron observar tendencias de comportamiento entre las distintas variables como son: relación agua/cemento, granulometría del agregado, combinación de los dos agregados, cantidad de material cementante, cantidad de agua, porcentaje de vacíos, coeficiente de permeabilidad y resistencia a la compresión para cada uno y entre los dos tipos de concreto permeable analizados. Llegando a la conclusión que el CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos) presenta una mejor resistencia a la compresión a los 28 días, alcanzando una resistencia de 2642 psi (18.2 MPa) sin comprometer significativamente la permeabilidad.

Y finalmente, en suma de lo anterior, este trabajo contiene, proceso y análisis de dosificación de diseño de las mezclas para cada tipo de concreto permeable, propiedades y características de los materiales, consideraciones a tener en cuenta para la elaboración de las mezclas, conclusiones y recomendaciones en cuanto a la granulometría escogida para esta investigación.

ABSTRACT

Often the environmental impact associated with the development and expansion of urban areas lead to a negative effect with respect in the waterproofing of soil. This effect promotes increased water scarcity altering the natural cycle by disrupting the infiltration of the subsoil, and dep provision the aquifers by not allowing recharge. Moreover, the drawback that generates surface runoff as a result of rain on impermeable surfaces, which is not only carry pollutants on many occasions a the rivers, but also to generate destabilization in road safety and functionality, to submit a thin film of water giving rise to the phenomenon of hydroplaning as a result of poor adherence between tire-pavement. Rodríguez (2008), affirm that "Pervious concrete is part of trends in sustainable building as one of the most comprehensive urban drainage systems" (p.5).

From the technical point of view the main requirements to require in the pervious concrete, are: resistance, permeability and durability. The first two properties mentioned are contradictory between them, therefore, it very important obtain at the time of design and development of this type of concrete find your balance between them. However, the pervious concrete has deficiencies which limit their application in pavements. These limitations are mainly due to the low resistance compared to conventional concrete.

Throughout of this research, is searched mainly study a concrete with structure draining, with dosage and preparation of mixtures using aggregates of sources that supply to the city of Ipiales as: Sand "Sand Pit" mine located in the village of The Espino and the coarse aggregate of "El Pedregal" mine located in the town of Puerres.

Two types of pervious concrete considering the metering process and analysis provided in this investigation based on the experience gained in other studies are developed. The types of pervious concrete analyze were denominated as CONCRETE MODIFIED TYPE I (no fines) that used: Cement portland Type I brand Argos, potable water, coarse aggregate conditioned in its granulometry, from the "El Pedregal" mine. The other type of pervious concrete is denominated as CONCRETE MODIFIED TYPE II (with fines) using: Cement portland Type I brand Argos, potable water, coarse aggregate conditioned in its granulometry from the "El Pedregal" mine, and fine aggregate conditioned also in its granulometry, from the "Sand Pit" mine.

Then for each type of pervious concrete, prepared test cylinders of 4 x 8 inches (diameter and height) in order to verify the process mathematical of dosing to

proceed to develop the pilot sample, and through statistical process define the size a its sample final for analyze.

In the definitive mix for each pervious concrete MODIFIED CONCRETE TYPE I and MODIFIED CONCRETE TYPE II, there subgroup of mixtures conditioned under five (5) rations water/cement 0.38, 0.36, 0.34, 0.32 and 0.30; explicitly designed to test the effect of changing the proportions in quantity of cement and water on the compressive strength and permeability coefficient. According to analysis, procedure and calculations made to determine the sample size, is determined that for each ration water/cement must be made 14 cylinders distributed as follows: 7 test cylinders for compressive strength at 14 days and the other 7 cylinders for testing estimate of the percentage of voids, determination of the coefficient of permeability and compressive strength at 28 days. A total of 140 specimens tested (70 for MODIFIED CONCRETE TYPE I and 70 for MODIFIED CONCRETE TYPE II).

From the results of tests allowed to observe trends in behavior between the different variables such as: ration water / cement, gradation of the aggregate, combination of the two aggregates, amount of cementitious material, water quantity, a percentage of voids, coefficient of permeability and compressive strength for each types of the pervious concrete and between the two types of pervious concrete analyzed. Concluding that the MODIFIED CONCRETE TYPE II (with fine) has a better compressive strength at 28 days, reaching a strength of 2642 psi (18.2 MPa) without significantly compromising permeability.

And finally, in addition to the above, this work contains, processing and analysis dosing mix design for each type of pervious concrete, properties and characteristics of materials, considerations to take into account when preparing the mixtures, conclusions and recommendations as to the particle size chosen for this research.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. MARCO DE REFERENCIA	23
1.1 RESEÑA HISTÓRICA	23
1.2 DEFINICIÓN CONCRETO PERMEABLE	24
1.3 APLICACIONES DEL CONCRETO PERMEABLE	25
1.4 VENTAJAS DEL CONCRETO PERMEABLE	25
1.5 COMPONENTES DEL CONCRETO PERMEABLE	26
2. METODOLOGÍA	28
2.1 ESTRUCTURA GRANULAR DEL CONCRETO PERMEABLE	28
2.2 SELECCIÓN DE LOS MATERIALES	29
2.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS	33
2.4 DOSIFICACIÓN CONCRETO PERMEABLE	34
2.4.1 Procedimiento de dosificación concreto permeable	35
2.5 DISEÑO DE MEZCLA	45
2.6 PERMEABILIDAD	49
2.6.1 Permeámetro de carga variable	50
2.6.2 Cálculo coeficiente de permeabilidad “K”	53
3. MUESTRA PILOTO	55
3.1 CONCRETO MODIFICADO TIPO I (SIN FINOS)	55
3.1.1 Dosificación muestra piloto.	55
3.1.2 Estimación del porcentaje del contenido de vacíos	55
3.1.3 Cálculo coeficiente de permeabilidad “K”.	56
3.1.4 Evaluación resistencia a la compresión.	57
3.1.5 Cálculo del tamaño muestral	58
3.2 CONCRETO MODIFICADO TIPO II (CON FINOS)	61
3.2.1 Estimación del porcentaje del contenido de vacíos	61
3.2.2 Cálculo coeficiente de permeabilidad “K”	62

3.2.3	Evaluación resistencia a la compresión	62
3.2.4	Cálculo tamaño muestral.....	63
4.	DISEÑO DE MEZCLAS.....	65
4.1	CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos)	65
4.2	CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos)	65
5.	PROCESAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
5.1	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN: EDAD 14 Y 28 DÍAS.....	68
5.2	PORCENTAJE DE VACÍOS.....	69
5.3	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS	69
5.4	RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y CONTENIDO DE CEMENTO.....	70
5.5	RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD “K”	71
5.6	RELACIÓN ENTRE COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD Y PORCENTAJE DE VACÍOS.....	72
5.7	RELACIÓN ENTRE COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD Y RELACIÓN AGUA/CEMENTO.....	73
5.8	RELACIÓN ENTRE PORCENTAJE DE VACÍOS Y RELACIÓN AGUA/CEMENTO	74
5.9	RELACIÓN ENTRE EL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD Y CONTENIDO DE CEMENTO.....	75
5.10	RELACIÓN ENTRE COSTO DE 1 m ³ DE CONCRETO PERMEABLE Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	76
6.	CONCLUSIONES.....	78
7.	RECOMENDACIONES	80
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
	ANEXOS	82

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Granulometría del agregado grueso escogido para esta investigación.	31
Tabla 2. Granulometría del agregado fino escogido para esta investigación.....	32
Tabla 3. Normas de los ensayos requeridos para los agregados.	33
Tabla 4. Resumen datos ensayos de los materiales.....	34
Tabla 5. Verificación especificación granulométrica. NTC 174.	42
Tabla 6. Límite superior e inferior.	43
Tabla 7. Granulometría ajustada para proporción agregados concreto modificado Tipo II (con finos).	43
Tabla 8. Registro datos para calibración del permeámetro de carga variable. ..	52
Tabla 9. Información permeámetro y muestra.	57
Tabla 10. Resistencia a la compresión (14 días). Concreto modificado Tipo I (sin finos) relación a/c = 0.34.	58
Tabla 11. Número de muestras dentro del rango, para resistencia a la compresión y permeabilidad, concreto modificado Tipo I (sin finos). ...	60
Tabla 12. Porcentaje de respuesta.	60
Tabla 13. Valores de Z (nivel de confianza).....	61
Tabla 14. Cálculo tamaño de la muestra definitiva concreto modificado Tipo I....	61
Tabla 15. Resistencia a la compresión (14 días). Muestra piloto, concreto modificado Tipo II (con finos). Relación a/c = 0.34.	62
Tabla 16. Número de muestras que están dentro del rango, para resistencia a la compresión y permeabilidad, concreto modificado Tipo II (con finos).	63
Tabla 17. Porcentaje de respuesta.	63
Tabla 18. Cálculo tamaño de la muestra definitiva, concreto modificado Tipo II (con finos).	64
Tabla 19. Resumen datos: concreto modificado Tipo I (sin finos).....	66
Tabla 20. Resumen datos: concreto modificado Tipo II (con finos).	66
Tabla 21. Porcentaje de resistencia a la compresión promedio alcanzado.	68

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Agregado grueso de diferentes fuentes de abastecimiento para Ipiales.	30
Imagen 2. Visita mina El Pedregal	30
Imagen 3. Zaranda manual y tamizado para obtención del material.	31
Imagen 4. Tamaños de partículas que se encuentran en el agregado grueso ...	31
Imagen 5. Visita mina Sand Pit.	32
Imagen 6. Tamaños de partículas que se encuentran en el agregado fino.	33
Imagen 7. Efecto de la inclusión de la pasta de cemento en el agregado con alto contenido inicial de vacíos.	37
Imagen 8. Efecto de compactación sobre una mezcla de concreto permeable.....	39
Imagen 9. MEZCLA DE PRUEBA: Concreto modificado Tipo I (sin finos) a/c = 0.3. asentamiento = 0.	46
Imagen 10. Fenómeno de lixiviación por hidróxido de calcio - concreto tipo I (sin finos).	47
Imagen 11. Medición de diámetro y altura.....	48
Imagen 12. MEZCLA DE PRUEBA: Concreto modificado Tipo II (con finos) a/c = 0.3. asentamiento = 0, proporción AF/AG: 40/60.....	49
Imagen 13. Colocación del cilindro concreto modificado Tipo II, sobre la plataforma de la prensa. Edad 7 días.....	49
Imagen 14. Permeámetro de carga variable elaborado para esta investigación.....	51
Imagen 15. Colocación de la muestra a ensayar.	51
Imagen 16. Sellado de tubo de PVC, empate sobre la base del permeámetro y ensamble total.	52
Imagen 17. Verificación ecuación calibración permeámetro de carga variable. ...	53
Imagen 18. Esquema permeámetro de carga variable.....	53
Imagen 19. Ensayo para determinar el porcentaje de vacíos.....	56

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Curva granulométrica agregado grueso.....	31
Gráfica 2. Curva granulométrica arena del Espino.....	33
Gráfica 3. Proporción granulométrica para concreto modificado Tipo II.....	43
Gráfica 4. Ajuste curva granulométrica para proporción agregados del concreto modificado Tipo II (con finos).	44
Gráfica 5. Calibración permeámetro: volumen de agua agregada vs. altura....	52
Gráfica 6. Concreto modificado tipo I: relación a/c y f'c (edad 14 y 28 días)....	68
Gráfica 7. Concreto modificado Tipo II: relación a/c y f'c (edad 14 y 28 días).....	68
Gráfica 8. Concreto modificado Tipo I y Tipo II. % promedio de vacíos.	69
Gráfica 9. Concreto modificado Tipo I y Tipo II, relación a/c y f'c (28 días).....	69
Gráfica 10. Concreto modificado Tipo I y concreto modificado Tipo II, relación entre f'c (28 días) y contenido de cemento.	70
Gráfica 11. Concreto modificado Tipo I, relación entre f'c (28 días) y coeficiente de permeabilidad "K".	71
Gráfica 12. Concreto modificado Tipo II, relación entre f'c (28 días) y coeficiente de permeabilidad "K".	71
Gráfica 13. Relación entre resistencia a la compresión (28 días) y coeficiente de permeabilidad "K" entre concreto modificado Tipo I y Tipo II.....	71
Gráfica 14. Concreto modificado Tipo I, relación entre coeficiente de permeabilidad "K" y porcentaje de vacíos.....	72
Gráfica 15. Concreto modificado Tipo II, relación entre coeficiente de permeabilidad "K" y porcentaje de vacíos.....	73
Gráfica 16. Concreto modificado Tipo I, relación entre coeficiente de permeabilidad y relación agua/cemento.	73
Gráfica 17. Concreto modificado Tipo II, relación entre coeficiente de permeabilidad y relación agua/cemento.	74
Gráfica 18. Concreto modificado Tipo I, relación entre porcentaje de vacíos y relación agua/cemento.....	74
Gráfica 19. Concreto modificado Tipo II, relación entre porcentaje de vacíos y relación agua/cemento.....	75

Gráfica 20.	Concreto modificado Tipo I, relación entre coeficiente de permeabilidad “K” y contenido de cemento.....	75
Gráfica 21.	Concreto modificado Tipo II, relación entre coeficiente de permeabilidad “K” y contenido de cemento.....	76
Gráfica 22.	Concreto modificado Tipo I y concreto modificado Tipo II, relación entre resistencia a la compresión (28 días) y costo de 1m ³ de concreto permeable.....	76

LISTA DE ANEXOS
(Registro en medio digital)

ANEXO A: Materiales

ANEXO B: Mezcla de prueba

ANEXO C: Muestra piloto – $a/c = 0.34$

ANEXO D: Muestra definitiva – a/c : 0.38, 0.36, 0.34, 0.32 y 0.30.

ANEXO E: Análisis de costo de 1m^3 de concreto permeable Tipo I y Tipo II.

ANEXO F: Normas

GLOSARIO

ANOVA: Análisis de varianza, sirve para comparar varios grupos en una variable cuantitativa. Se trata, por tanto, de una generalización de la prueba T para dos muestras independientes al caso de diseños con más de dos muestras.

CONSISTENCIA: Es la capacidad de una mezcla fresca de concreto tiene de fluir, esto es, su movilidad, su fluidez, o en otras palabras, la oposición que presenta el concreto fresco en experimentar deformaciones, y desde un punto de vista más práctico la consistencia es la medida del grado de humedad de la mezcla, es decir, cuanto más húmeda es la mezcla mayor es el asentamiento.

CONTENIDO DE VACÍOS: Porosidad o contenido de vacíos, es el espacio no ocupado por las partículas de agregado en un volumen unitario.

ENERGÍA DE COMPACTACIÓN: Es la cantidad de trabajo necesaria para lograr la compactación total. El trabajo aplicado incluye forzosamente el necesario para vencer la fricción de la superficie, pero reducido a un mínimo, aunque quizá la fricción varíe con la manejabilidad de la mezcla.

ESCORRENTÍA SUPERFICIAL: Es un término geológico de la hidrología, que hace referencia a la lámina de agua que circula sobre la superficie en una cuenca de drenaje, es decir la altura en milímetros del agua de lluvia escurrida y extendida. La escorrentía superficial es una de las principales causas de erosión a nivel mundial. Suele ser particularmente dañina en suelos poco permeables, como los arcillosos, y en zonas con una cubierta vegetal escasa.

ESQUELETO GRANULAR: Matriz conformada por los agregados, en estado compactado.

FACTOR DE DENSIFICACIÓN: Este concepto en dosificación indica el reacomodo de partículas cuando se realiza la compactación bien sea por varillado, vibrado o cualquier otro tipo de mecanismo utilizado haciendo que la mezcla sea más densa, esta acción provoca una eliminación de vacíos o aire atrapado naturalmente, pero no logra eliminarlos en su totalidad. El factor de densificación (Fd) depende de la granulometría, de la humedad y el grado de energía de compactación.

GRANULOMETRÍA CONTINUA: Se dice que la granulometría es continua cuando en un agregado existen fracciones de todos los tamaños comprendidos entre el más pequeño y el mayor de él mismo.

GRANULOMETRÍA DISCONTINUA: Se dice que la granulometría es discontinua cuando la continuidad de los tamaños desaparece, faltando algunas fracciones de tamaños de partículas pertenecientes al agregado analizado.

INFILTRACIÓN: Es la acción de introducir suavemente un líquido entre los poros de un sólido.

LIXIVIACIÓN DE HIDRÓXIDO DE CALCIO: Es una forma leve de desarreglo que ocurre cuando el agua disuelve componentes en el concreto. El cemento portland hidratado contiene desde 25 a 30 porciento de hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , el cual es soluble en agua. La lixiviación produce una apariencia arenosa en las superficies expuestas de concreto de los revestimientos de canales, alcantarillados o tuberías.

MANTOS ACUÍFEROS: También llamados aguas subterráneas, es aquella área bajo la superficie de la tierra donde el agua de la superficie, por ejemplo la lluvia, se infiltra y se almacena.

PERMEABILIDAD: Es la capacidad de un sólido (en este caso concreto permeable) de dejar pasar a través de él un fluido como el agua.

PESO UNITARIO: Se define peso unitario o volumétrico del agregado, ya sea en estado suelto o compactado, al peso que alcanza un determinado volumen unitario. Usualmente expresado en Kg/m^3 .

POROSIDAD: Es el porcentaje de espacios vacíos por ejemplo dentro de una roca respecto al volumen total. El hecho de que una roca sea más porosa no significa forzosamente que presente una permeabilidad más alta. Para que esto sea así, hace falta que los poros estén bien intercomunicados o conectados entre ellos, es decir, hace falta que la roca sea permeable.

TAMAÑO MÁXIMO: Es el menor tamiz por el cual pasa toda la muestra.

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL: El tamaño máximo nominal de un agregado, es el menor tamaño de la malla por el cual debe pasar la mayor parte del agregado.

VACÍOS CONECTADOS: Son vacíos comunicados entre sí que en conjunto forman un sistema de poros capaz de poder filtrar y dirigir un líquido sin ninguna interrupción a través de la estructura de un sólido que sea permeable.

VOLUMEN ADICIONAL DE VACÍOS: El volumen adicional de vacíos (V_{adc}), es el volumen de vacíos inducido por la interface (matriz) pasta y/o mortero que se ubica entre los agregados generando una separación de éstos, dando origen así a la formación de este volumen de vacíos adicional.

INTRODUCCIÓN

Normalmente la construcción tradicional de vías o áreas de parqueaderos no poseen la capacidad de gestionar eficazmente la escorrentía de aguas pluviales creando efectos negativos sobre el medio donde están contruidos. Por tal razón en los últimos años se ha empezado a implementar nuevas técnicas de construcción sostenible entre las que se encuentra el concreto permeable, considerado como una solución potencial para eliminar al menos algunos de los problemas relacionados con el manejo de aguas pluviales.

El concreto permeable está compuesto por cemento portland, agregado grueso controlado en su granulometría, poco o nada de agregado fino, aditivos y agua; logrando un concreto hidráulico con cierta característica especial en su estructura que tiene un alto nivel de porosidad interconectada, permitiendo filtrar el agua lluvia a través de su matriz y reducir al mínimo la escorrentía superficial en áreas pavimentadas. Además, este tipo de concreto tiene otras ventajas, como el de recargar los mantos acuíferos, reducir el fenómeno “isla de calor”, reducir el ruido, reducir la iluminación artificial; también tiene la ventaja de evacuar las aguas lluvias con mayor rapidez que un concreto convencional, lo cual, se traduce en una mejora en la resistencia al deslizamiento entre otros beneficios.

Por estos motivos es muy interesante la realización de este trabajo, ya que el objetivo principal es el de elaborar y estudiar dos tipos de mezclas de concreto hidráulico con estructura drenante elaboradas con agregados de las fuentes que abastecen al municipio de Ipiales, que para este caso son: el agregado grueso proveniente de la mina “El Pedregal”, y arena del Espino mina “Sand Pit”.

Las mezclas fueron investigadas para evaluar las características del concreto permeable como son: resistencia a la compresión, coeficiente de permeabilidad y porcentaje de vacíos.

Con los resultados obtenidos se busca promover futuras investigaciones dentro de la Universidad de Nariño en cuanto a este tipo de concreto, de acuerdo a la experiencia de éste estudio preliminar teniendo en cuenta las características de los materiales de la región.

JUSTIFICACIÓN

El uso de concreto se ha aplicado no sólo en la construcción de grandes edificios sino también a diversas obras de infraestructura (puentes, tanques, muros, etc.), y los pavimentos de manera particular que están destinados a la circulación de vehículos, son otras de las aplicaciones importantes del concreto. Cualquiera que

sea su aplicación, el concreto elaborado debe cumplir con los requisitos básicos de ser resistente, manejable, durable y económico (Cañas Lazo, *et al* 2006,1), no obstante, el reto a superar por la industria de la construcción, en cualquiera de sus tipologías, sigue siendo fundamentalmente el empleo de materiales de construcción de bajo impacto ambiental, dado que son estos los que más repercuten sobre el medio natural, sin descartar otros impactos relacionados con el consumo de energía o los residuos.

Dada la importancia que tiene el impacto ambiental, se planteó la presente propuesta con el fin de dar respuesta a la necesidad de realizar un estudio preliminar que permita llegar a obtener una mezcla drenante en concreto hidráulico que aporte al beneficio del medio ambiente y por ende al ser humano. Por tal razón, el trabajo de investigación se justifica en el compromiso con el desarrollo de la región brindando otros insumos de construcción aplicados a la construcción de pavimentos rígidos que contribuyan al medio ambiente, basados en los conocimientos adquiridos a lo largo de la vida académica y de esta forma ir aportando información para llevar a cabo nuevas investigaciones en la Universidad de Nariño.

OBJETIVOS

Objetivo general

Realizar un estudio de una mezcla de concreto con estructura drenante, empleando agregados de las fuentes de abastecimiento del municipio de Ipiales.

Objetivos específicos

- Determinar las propiedades físicas y mecánicas del agregado grueso y fino empleado.
- Realizar el diseño de una mezcla de concreto con estructura drenante para una resistencia a la compresión establecida mediante pruebas piloto.
- Elaborar la mezcla especificada en el paso anterior.
- Realizar ensayos para establecer la permeabilidad, y resistencia a la compresión de la mezcla establecida.
- Analizar resultados obtenidos y establecer relaciones de los parámetros encontrados.

ALCANCE Y DELIMITACIONES

Con el fin de analizar el diseño de mezcla de un pavimento permeable, en este trabajo de grado se estudiara únicamente la resistencia a la compresión como primera fase de investigación; teniendo en cuenta que el módulo de rotura es un parámetro fundamental en el caso de los concretos para pavimentos, éste tema

será objeto de estudio en una posterior investigación partiendo de los datos y resultados que se obtengan de este trabajo de grado.

CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Para el diseño de un pavimento de concreto permeable se debe tener en cuenta dos aspectos que resultan fundamentales para un adecuado funcionamiento del sistema, los cuales son: el diseño de mezcla y el diseño hidráulico. Cabe aclarar que para este trabajo de grado se *abordara únicamente el análisis del diseño de mezcla*.

• DISEÑO DE MEZCLA DE UN PAVIMENTO DE CONCRETO PERMEABLE:

La resistencia y la permeabilidad obtenidas para un pavimento de concreto permeable están determinadas por la mezcla que se va a utilizar. Las variables que afectan el comportamiento del concreto permeable son: granulometría, dosis de cemento, relación agua/cemento y contenido de vacíos.

• DISEÑO HIDRÁULICO DE UN PAVIMENTO DE CONCRETO PERMEABLE:

Para determinar el espesor de diseño se debe considerar las necesidades hidráulicas; las tres consideraciones principales dentro del diseño hidráulico a tener en cuenta en este tipo de pavimentos son: la cantidad de lluvia esperada, propiedades del suelo subyacente y características del pavimento.

Una sección transversal típica está compuesta por diferentes estratos que componen un pavimento permeable, de abajo hacia arriba son: una subrasante formada por el suelo existente inalterado, un filtro geotextil, filtro granular o membrana impermeable sobre la subrasante, una sub-base de material granular grueso, sobre está un filtro granular o base y en la superficie la carpeta de rodado o pavimento permeable.

Es importante precisar que el diseño de cada pavimento de concreto permeable es ligeramente diferente debido a la necesidad o propósito de cada proyecto.

Una vez que el agua filtra a través de la superficie de la carpeta de rodado, existen dos procedimientos alternativos para su disposición final. Uno es continuar la infiltración hacia el suelo bajo el pavimento y el otro es recoger mediante drenes y disponer de ella en otro lugar. También es posible emplear una combinación de ambos sistemas en la cual, para lluvias poco intensas, se infiltra todo localmente y para lluvias más intensas pero menos frecuentes, además de infiltrarse localmente parte se drena a otros elementos hacia aguas abajo, evitando así que el agua aflore en la superficie¹.

¹ Ministerio de vivienda y urbanismo de Chile. (1996). Técnicas alternativas para soluciones de

1. MARCO DE REFERENCIA

Aunque el concreto de estructura permeable se utilizó por primera vez en el siglo XIX, sólo recientemente ha despertado interés en su empleo. Parte de esta información ha sido recopilada de investigaciones realizadas en el área de estudio².

1.1 RESEÑA HISTÓRICA³

El concreto permeable ha sido usado en construcciones de edificios por lo menos desde mediados del siglo XIX. El término concreto permeable es usado para describir el material, pero en las referencias e históricamente, es descrito como un concreto con poco o nada de finos y también como concreto abierto.

Los estragos de la segunda guerra mundial de 1939 a 1945 dejó a casi todos los Europeos con una gran necesidad de vivienda, lo que alentó a desarrollar nuevos métodos para la construcción de edificios, cabe destacar que entre ellos estaba el concreto permeable. Por años, el concreto permeable ha sido un sistema que ha contribuido sustancialmente para la construcción de nuevas casas en el Reino Unido, Alemania, Holanda, Francia, Bélgica, Escocia, España, Hungría, Venezuela, Oeste de África, Medio Oriente, Australia y Rusia.

Aunque el concreto permeable ha sido usado en Europa y Australia durante los últimos 60 años, el uso como material de construcción en América ha sido extremadamente limitado. Una de las razones para el uso limitado es que, después de la segunda guerra mundial, América no experimentó escasez de materiales en el mismo grado que Europa. El primer uso reportado de concreto permeable fue en 1960 en Canadá, América del Norte. El concreto permeable fue usado en la construcción de algunas casas en Toronto. Este también fue usado en bases no estructurales en un edificio Federal en Ottawa.

Históricamente, siempre se pensó en estructuras densas, para pavimentos con una buena capacidad de agua por drenaje superficial⁴. Hacia 1945-1950 comenzaron las primeras experimentaciones con pavimentos permeables,

aguas lluvias en sectores urbanos. Guía de diseño. p.(7).

² Remitirse a la sección, REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS de este documento.

³ ACI 522R-10 PERVIOUS CONCRETE, Reported by ACI Committee 522. [ACI 522R-10 CONCRETO PERMEABLE, Comunicado por el Comité ACI 522]. Chapter 2. pág. 522R-3

⁴ Revista Cemento Año 5, N°22, EL HORMIGÓN POROSO: UN MATERIAL INNOVADOR PARA INFRAESTRUCTURA VIAL Y URBANA.

basándose en nuevos principios: conseguir una estructura densa de agregados, de granulometría equilibrada, ligados por una matriz discontinua de mortero de buena resistencia. Los estudios no merecieron demasiado impulso hasta la década de 1970, cuando las sociedades concesionarias de autopistas con peaje y algunos municipios recurrieron a los pavimentos permeables como una alternativa eficaz para solucionar ciertos inconvenientes.

En los primeros años del siglo XXI en los EE.UU., un renovado interés ha sido expresado en pavimentos de concreto permeable, debido principalmente al medio ambiente. Estos materiales han sido efectivamente utilizados por más de 30 años en Inglaterra y EE.UU. y también son ampliamente utilizados en el resto de Europa y Japón para reducir el ruido del tráfico y mejorar la resistencia al deslizamiento. La elevada permeabilidad provoca una infiltración inmediata del agua en el seno del pavimento, y de esta forma se reduce o elimina el “salpicado” (splash) y la niebla evitando la ocurrencia de hidroplaneo. Aún en condiciones reales de congelamiento, la falta de acumulación de agua en superficie evita la formación del hielo, conservándose valores importantes de adherencia vehículo - pavimento.

1.2 DEFINICIÓN CONCRETO PERMEABLE

El Instituto Norteamericano del Concreto (*American Concrete Institute*) [ACI 522R-10], define el concreto permeable como un concreto con asentamiento cero y granulometría abierta, compuesto por cemento Portland, agregado grueso controlado en su granulometría, poco o nada de agregado fino, aditivos y agua. La mezcla de estos compuestos producirá un concreto endurecido que contiene grandes espacios de vacíos entre partículas. Característica que puede ser aprovechada para múltiples beneficios.

La Asociación Norteamericana de Pavimentos de Concreto (*American Concrete Pavements Association, ACPA*) describe el funcionamiento de los pavimentos en concreto permeable como un pavimento de características y funciones especiales que a menudo cuentan con una capa subyacente de piedra (triturada) que funciona como reservorio, recoge las aguas lluvias y las almacena hasta que se infiltren en el subsuelo.⁵

⁵ Unidad Civil Geominera – NUEVAS TECNOLOGÍAS DE CONSTRUCCIÓN PARA PAVIMENTOS. 2008.

1.3 APLICACIONES DEL CONCRETO PERMEABLE⁶

El concreto permeable ha sido usado en una amplia gama de aplicaciones, entre ellas están:

- Pavimentos permeables para estacionamientos.
- Capas de drenaje en zonas rígidas en áreas exteriores de centros comerciales.
- Pavimentos, muros y pisos donde se requiera mejorar la absorción acústica de acuerdo a las características deseadas.
- Carpeta de base para calles de la ciudad, carreteras locales, caminos de entrada.
- Carpetas de superficie para canchas de tenis.
- Pisos alrededor de piscinas.
- Sistemas de almacenamiento de energía solar.
- Revestimientos en las paredes de pozos de agua perforados.
- En arrecifes artificiales donde el concreto permeable imita la estructura de un arrecife.

1.4 VENTAJAS DEL CONCRETO PERMEABLE

Resistencia al deslizamiento. El concreto permeable puede quitar el agua de la lluvia con mayor rapidez que el concreto convencional, debido a su capacidad de absorción y rápida infiltración del agua a través de su estructura. Reduciendo al mínimo el agua sobre la superficie del pavimento, la resistencia al deslizamiento se mejora favorablemente.

Escorrentía de aguas pluviales. Reducir la escorrentía de las aguas pluviales es una de las principales funciones del concreto permeable. El concreto permeable contiene un tamaño condicionado de agregado grueso al igual que el agregado fino pero en menor proporción, esto con el fin de que haya más espacios de vacíos en la matriz del concreto logrando así almacenar y evacuar el agua a través de su estructura hacia el sistema de drenaje que se ha escogido de acuerdo a la necesidad del proyecto.

Recargar mantos acuíferos. La sobre explotación de mantos acuíferos han ocasionado pérdidas de ecosistemas, asentamientos y agrietamientos en la superficie, contaminación del agua subterránea, y un incremento en los costos de extracción del agua del subsuelo, los hundimientos en diferentes sectores de algunas ciudades aumenta los riesgos geológicos ya que se están generando

⁶ ACI 522R-10 PERVIOUS CONCRETE, Reported by ACI Committee 522. [ACI 522R-10 CONCRETO PERMEABLE, Comunicado por el Comité ACI 522]. Chapter 2. pág. 522R-2.

grietas en el subsuelo que hacen vulnerables las viviendas ante un sismo, por tal razón es sumamente importante captar el mayor volumen de agua de las precipitaciones e inyectarlo al subsuelo para alimentar los mantos acuíferos de forma natural⁷.

El concreto permeable absorbe el agua de escorrentía conservando así este recurso natural. Este tipo de concreto ayuda directamente a llevar el agua lluvia para ser aprovechada por las plantas y también para que se infiltre libremente al subsuelo.

1.5 COMPONENTES DEL CONCRETO PERMEABLE

Material cementante. La elección del tipo de cemento Portland a usarse es muy importante para cualquier clase de concreto, estos deben cumplir con las normas como la ASTM C 150 o C 595, por ser el cemento el componente más activo del concreto, y teniendo en cuenta que todas las propiedades del concreto dependen de la cantidad y tipo de cemento los cuales son muy importantes para obtener una adecuada dosificación.

Agua. El agua es imprescindible por dos razones. Una de ellas es para hidratar el cemento y la segunda es para incrementar la lubricación entre las partículas. La hidratación del cemento es necesaria para ligar los agregados que a su vez dan al concreto su resistencia. La cantidad de agua para el concreto permeable, se rige por los mismos requerimientos para el concreto convencional.

El concreto permeable deberá estar proporcionado con una relación relativa baja de agua-cemento (0.30 a 0.40), puesto que un exceso en la cantidad de agua dará lugar a un escurrimiento de la pasta y posteriormente obstruir los poros del sistema (*ACI 522, Concreto permeable, 2010*) perdiendo así la principal función de este tipo de concreto que es permitir el paso del agua a través de su estructura. La cantidad correcta de agua maximizará la resistencia sin comprometer las características de la permeabilidad de este tipo de concreto que es su principal función.

Agregado grueso. La clasificación del agregado grueso en el concreto permeable normalmente consta de un solo tamaño o una clasificación cercana de 3/4" a 3/8" (19 a 9.5 mm) (*ACI 522 Concreto permeable, 2010*), porque su tamaño da como resultado grandes espacios de vacíos. El agregado grueso utilizado para el presente estudio tiene una granulometría discontinua, ciertos tamaños de partículas fueron omitidos intencionalmente. El agregado tiene un porcentaje de partículas de tamaño de 1/2 a 3/8 de pulgada (12.7 a 9.5 mm).

⁷ Hormigón Express. (2011). Hormigón (concreto) ecológico permeable. Panamá.

Agregado fino. El agregado fino típicamente no se utiliza para las mezclas de concreto permeable en las mismas proporciones que el concreto convencional, este puede ser descartado o disponer de una proporción que puede cifrarse en una dotación igual o ligeramente superior, en peso, a la del cemento⁸.

⁸ AGUADO DE CEA Antonio, *et al.* Un material permeable y resistente Aproximación al hormigón poroso.

2. METODOLOGÍA

El objetivo general de esta investigación corresponde al estudio de una mezcla de concreto con estructura drenante, empleando materiales de las fuentes de abastecimiento del municipio de Ipiales.

Los métodos de investigación que se procedió para alcanzar los objetivos planteados fueron, definitorios, clasificatorios, estadísticos, hipotético-deductivos, procedimientos de medición, obtención de resultados y discusión de ellos.

En primer lugar está la caracterización físico-mecánica de los materiales de insumo, como son de los materiales pétreos propios de las fuentes de abastecimiento del municipio de Ipiales, con el fin de comprobar que cumplan con la norma que los rige (masa unitaria suelta y compactada, porcentaje de vacíos, análisis granulométrico, gravedad específica y absorción), para posteriormente continuar con la definición de mezclas a emplear que finalmente son ensayadas para cumplir con los objetivos de este trabajo de investigación.

Teniendo en cuenta que para este tipo de concreto permeable, en el diseño de mezcla se puede emplear un porcentaje mínimo de agregado fino o ausencia total de éste agregado, se procede por lo tanto a realizar dos tipos de mezcla las cuales para este trabajo de investigación se denomina CONCRETO MODIFICADO TIPO I (Sin finos) y CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos).

Cabe aclarar que este trabajo de investigación se centra en la búsqueda de estrategias válidas para incrementar el conocimiento en cuanto a este tipo de concreto. No es la finalidad de esta Tesis llegar a resultados óptimos, si no el de establecer cuáles son los mecanismos a tener en cuenta en el concreto permeable considerando la resistencia a la compresión y la permeabilidad.

2.1 ESTRUCTURA GRANULAR DEL CONCRETO PERMEABLE

La importancia del uso del tipo y de la calidad correcta del agregado no se puede subestimar. Los agregados fino y grueso ocupan cerca del 60% al 75% del volumen del concreto (70% a 85% de la masa) e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, en las proporciones de la mezcla y en la economía del concreto convencional⁹.

⁹ KOSMATKA Steven H. *et al*, Diseño y control de mezclas de concreto. Capítulo 5, p.103.

Para comprender la estructura de un concreto permeable se tiene que imaginar un esqueleto granular formado principalmente por agregado grueso de excelente calidad, en estado compactado. Este esqueleto, puede estar constituido esencialmente por partículas de un tamaño dominante y de un solo tipo de agregado (monogranular) o por dos tipos de agregados fino y grueso pero teniendo en cuenta que cada uno contenga un tamaño dominante de partículas (bimodal), esto con el fin de obtener un contenido de vacíos importante que a diferencia de un concreto convencional no se llenaran de pasta ligante. La cantidad de mortero o pasta de cemento según sea el caso, debe ser suficiente para recubrir todas las partículas de agregado grueso y formar puentes de adherencia entre ellos, pero no debe llenar los vacíos remanentes de tal forma de obtener una porosidad interconectada elevada, los cuales serán responsables de la permeabilidad del concreto.

Para esta investigación se realiza dos tipos de mezclas, las cuales se denominan como: CONCRETO MODIFICADO TIPO I (ausencia total de agregado fino), y CONCRETO MODIFICADO TIPO II (presencia de agregado fino). A fin de determinar las propiedades y características de los agregados se realiza el estudio y ensayos previos al diseño de mezcla del concreto, con el propósito de determinar si cumplen con las normas que se exige para su uso en la ingeniería.

2.2 SELECCIÓN DE LOS MATERIALES

Material cementante. Para este trabajo de investigación el cemento que se usa es cemento portland Tipo I (uso general) marca ARGOS. Para las especificaciones técnicas de éste tipo de cemento ver *ANEXO A*.

Materiales pétreos. Ipiales cuenta con el agregado de las Lajas, más sin embargo esta piedra no resulta ser apropiada para el uso en pavimentos por su característica laminar, por lo tanto la ciudad se abastece de materiales pétreos de sectores aledaños, ver *Imagen 1*, como: Macas, Puerres, Pilcuan, y para el agregado fino del corregimiento de El Espino.

El agregado que se utilizó tanto fino como grueso, fueron facilitados para esta investigación por la Planta TRITURADOS & CONCRETOS EN OBRA S.A. ubicada en el municipio de Ipiales – Nariño, sobre el Kilómetro 2.5 Saguarán, vía Ipiales - Potosí.

- **Agregado grueso**

El agregado grueso que se escogió para este trabajo de investigación es proveniente de la mina “El Pedregal”, ver *Imagen 2*, ubicada en Puerres de propiedad del Señor Miguel Lucero. Esta mina posee un yacimiento de piedra de buena calidad, este banco ocupa la totalidad de 4 hectáreas, la explotación es a

cielo abierto. Geográficamente la mina El Pedregal se halla beneficiada por la facilidad de acceso con distintos medios de movilidad, al igual el clima permite en general trabajar durante todo el año. Se encuentra ubicada a 6 Km de la cabecera del municipio de Puerres departamento de Nariño.



Imagen 1. Agregado grueso de diferentes fuentes de abastecimiento para Ipiales.



Imagen 2. Visita mina El Pedregal

El agregado extraído se lo lleva a la Planta TRITURADOS & CONCRETOS EN OBRA S. A, donde se le realiza el proceso de trituración completo, entregando la granulometría deseada.

Trituración primaria: primer proceso que tienen el material donde se tritura con un sistema de mandíbulas.

Trituración secundaria: por medio de una banda transportadora el material llega de la trituración primaria con un tamaño de 3" (in) a una zaranda vibratoria, la cual separa los sobre-tamaños mayores a 1" (in) devolviéndolos a través de un circuito de retorno a una banda transportadora para ser triturados nuevamente. El triturado pasa por varias mallas dirigiendo el material a las diferentes tolvas.

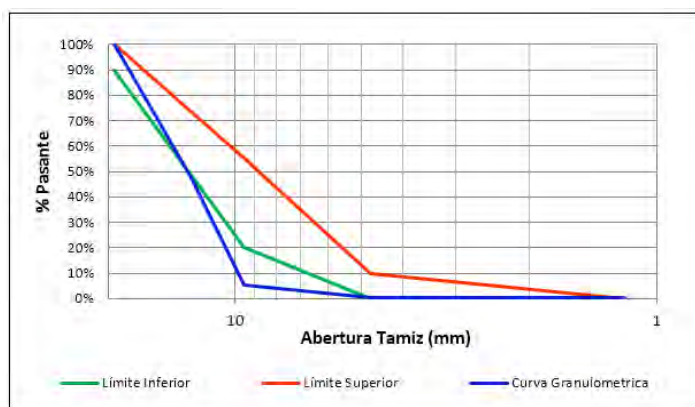
Posteriormente para la caracterización físico-mecánica del agregado grueso que se utiliza para este trabajo de investigación, se procede a seleccionarlo a través de un tamizado manual utilizando mallas de $\frac{1}{2}$ in y $\frac{3}{8}$ in, ver *Tabla 1*. El material escogido es el agregado grueso que queda retenido entre estas dos mallas, retirando así los demás tamaños de partículas del agregado intencionalmente, ver imágenes 3 y 4.



Imagen 3. Zaranda manual y tamizado para obtención del material.

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE	LÍMITES NTC 174 /ASTM C-33 (Tamaño No. 67)	
						Inferior	Superior
3/4"	19,4	0	0,00%	0,00%	100,00%	90%	100%
1/2"	12,7	1139,2	52,43%	52,43%	47,57%		
3/8"	9,51	917,6	42,23%	94,66%	5,34%	20%	55%
Nº 4	4,76	107,3	4,94%	99,60%	0,40%	0%	10%
Nº 8	2,38	0,3	0,01%	99,61%	0,39%	0%	5%
Nº 16	1,19	0	0,00%	99,61%	0,39%		
Fondo		8,4	0,39%	100%	0%		
Perdida		0					
Peso Total		2172,8	100%				
% Error			0,00%				

Tabla 1. Granulometría del agregado grueso escogido para esta investigación.



Gráfica 1. Curva granulométrica agregado grueso.

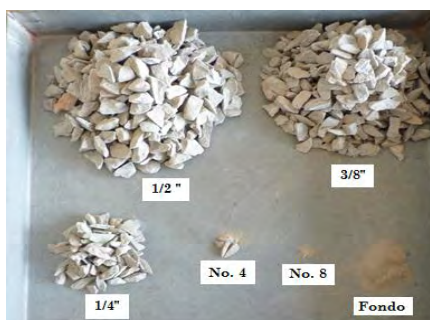


Imagen 4. Tamaños de partículas que se encuentran en el agregado grueso

- **Agregado fino**

El material es proveniente de la mina Sand Pit S.A (ver Imagen 5), ubicada en el corregimiento de El Espino, municipio de Sapuyes, departamento de Nariño, intersección de carretera Tuquerres – Tumaco con la carretera El Espino - Guachucal. De propiedad del señor Esteban Rodríguez. Este material se obtiene a partir de un proceso de extracción con un sistema de laboreo a cielo abierto, la explotación es con generación de bancos por arranque descendente. Esta arena pasa por un proceso de extracción, trituración y cribado, asegurando su distribución y que esté libre de partículas orgánicas.

MINA SAND PIT S.A:

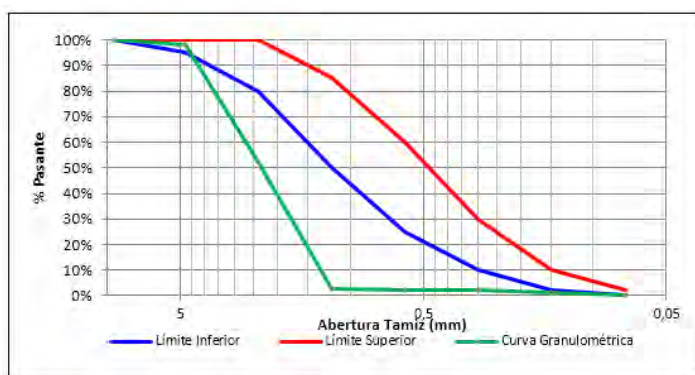


Imagen 5. Visita mina Sand Pit.

La arena en esta investigación para el diseño de CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos) es condicionada en su granulometría para lo cual por medio de tamizado manual se elimina el tamaño del agregado fino a partir del pasante del Tamiz N16 (1.19 mm) (ver Imagen 6). Por lo tanto, la granulometría de este agregado fino comprende en su mayoría entre el Tamiz N4 (4.76 mm) y retenido hasta el Tamiz N16 (1.19 mm), ver *Tabla 2*.

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE	LIMITES NTC 174	
						Inferior	Superior
3/8"	9,51	0	0,00%	0,00%	100%		100%
Nº 4	4,76	18,1	1,80%	1,80%	98,20%	95%	100%
Nº 8	2,38	461,7	46,01%	47,82%	52,18%	80%	100%
Nº 16	1,19	498,4	49,67%	97,49%	2,51%	50%	85%
Nº 30	0,595	3	0,30%	97,79%	2,21%	25%	60%
Nº 50	0,297	0,9	0,09%	97,88%	2,12%	10%	30%
Nº 100	0,149	6,8	0,68%	98,55%	1,45%	2%	10%
Nº 200	0,074	10,8	1,08%	99,63%	0,37%		
Fondo		3,7	0,37%	100%	0,00%		
Perdida		0					
Peso Total		1003,4	100%				
% Error			0,00%				

Tabla 2. Granulometría del agregado fino escogido para esta investigación.



Gráfica 2. Curva granulométrica arena del Espino escogida para esta investigación, limitada en su granulometría natural.



Imagen 6. Tamaños de partículas que se encuentran en el agregado fino.

2.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

Las pruebas de laboratorio que se realizan a los agregados para su caracterización, son:

ENSAYO	NORMA
Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos.	NTC – 77 I.N.V.E – 213
Determinación del peso unitario y los vacíos entre partículas de agregados.	NTC – 92 I.N.V.E – 217
Método para determinar la densidad y absorción del agregado grueso.	NTC – 176 I.N.V.E – 223
Método para determinar la densidad y absorción del agregado fino.	NTC – 237 I.N.V.E – 222

Tabla 3. Normas de los ensayos requeridos para los agregados.

Las normas referidas para estos ensayos se encuentran indicadas en el *ANEXO F*. Los ensayos de los agregados se realizan en el laboratorio de la Planta TRITURADOS & CONCRETOS EN OBRA S.A, debido principalmente a la disponibilidad de los materiales y al alto costo que implicaría transportarlo a las

instalaciones del laboratorio de la Universidad de Nariño en San Juan de Pasto. Los ensayos del agregado fino y grueso están realizados bajo los requisitos y procedimientos de las normas NTC, los resultados y procedimiento se aprecian en el ANEXO A.

AGREGADO GRUESO	Resultado	
Densidad aparente seca	2536	Kg/m ³
Absorción	1,95	%
Peso unitario compactado	1463	Kg/m ³
% de vacíos estado compactado	42	%
Tamaño máximo	¾	in
Tamaño máximo nominal	¾	in
AGREGADO FINO	Resultado	
Densidad aparente seca	1725	Kg/m ³
Absorción	11,86	%
Peso unitario compactado	1124	Kg/m ³
% de vacíos estado compactado	35	%
Módulo de finura	4,4	
CEMENTO ARGOS TIPO I	Resultado	
Densidad ¹⁰	3040	Kg/m ³
AGUA	Resultado	
Densidad	1000	kg/m ³

Tabla 4. Resumen datos ensayos de los materiales.

2.4 DOSIFICACIÓN CONCRETO PERMEABLE

El Instituto Norteamericano del Concreto (*American Concrete Institute*) en el informe ACI 211.3R-02, “GUÍA PARA LA SELECCIÓN DE PROPORCIONES PARA UN CONCRETO SIN ASENTAMIENTO”, propone un método de dosificación para concreto permeable para dos tamaños de agregado, clasificados de acuerdo ASTM C33 tamaño número 8 y tamaño número 67; más sin embargo no se optó por este método en primer lugar porque la gradación escogida para esta investigación es una clasificación cercana al tamaño número 67 (ASTM C33), y dentro del documento anteriormente descrito no se encuentra un referente o información con respecto a la relación entre el volumen de la pasta y contenido de vacíos para este tamaño de gradación, si no únicamente para el tamaño número 8. Por lo tanto algunos datos se determina o asumen con respecto a la información que proporciona el ACI 522R -10, y a la experiencia y diseños realizados en algunos estudios anteriores¹¹.

¹⁰ OSORIO, Jesús David. Densidad suministrada por la empresa ARGOS. Asesoría técnica. Cali, s.n. 2014.

¹¹ CASTRO Javier, *et al.* Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón. *Revista Ingeniería de Construcción*. 2009. Volumen 24. 271-284.

2.4.1 Procedimiento de dosificación concreto permeable. Esta sección es una de las más importantes dentro de este documento, en una primera parte se realiza la presentación detallada del método de diseño que se aplica para la dosificación de este tipo de concreto, método que se basa en la experiencia obtenida por investigadores Chilenos.

Este método sirve de base para realizar las mezclas para CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos) y también es adaptado para la elaboración del CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos), seguidamente se cumple uno de los objetivos del presente trabajo que es el de realizar un estudio de una mezcla de concreto con estructura drenante o denominado también concreto permeable. Este objetivo representa uno de los más difíciles a cumplir, dado que la predicción del comportamiento del concreto permeable en su estado fresco y endurecido, sigue siendo uno de los temas principales de investigación alrededor del mundo. Para el caso del CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos) se soluciona el problema de las proporciones ideales de agregado grueso y fino, y también el condicionamiento en cuanto a la granulometría del agregado fino.

PASO 1: *Características físicas de los materiales a tener en cuenta*

- Densidad aparente agregado grueso.
- Densidad aparente agregado fino.
- Peso unitario compactado agregado grueso.
- Peso unitario compactado agregado fino.
- Porcentaje de vacíos de agregado grueso en estado compactado.
- Porcentaje de vacíos de agregado fino en estado compactado.
- Porcentaje de vacíos de la proporción granulométrica agregado grueso y fino, en estado compactado.
- Porcentaje de absorción agregado grueso.
- Porcentaje de absorción agregado fino.
- Densidad cemento.
- Densidad agua.
- Humedad de los agregados, inmediatamente antes de hacer las mezclas.

PASO 2: *Valores estimados*

Relación agua – cemento (a/c): la relación agua/cemento es de importante consideración para mantener la resistencia y la estructura porosa del concreto. Un alta relación agua/cemento reduce la adherencia de la pasta con el agregado y causa que la pasta se segregue y llene los vacíos aun cuando no se aplicado un alto esfuerzo de compactación. De acuerdo a experiencias se ha demostrado que un rango de 0.25 a 0.4 proporciona un mejor recubrimiento del agregado y la estabilidad de la pasta. El concepto que se tiene con respecto a la relación agua/cemento frente a la resistencia a la compresión, que es normalmente

utilizada en el concreto convencional, no se aplica al concreto permeable (ACI 211.3R -02).

Volumen de vacíos en la mezcla (V_m): de acuerdo con el informe presentado por el ACI 522R-10, el volumen de vacíos que hay en la mezcla es altamente dependiente de varios factores: gradación del agregado, contenido de material cementante, relación agua-cemento (a/c) y esfuerzo de compactación. Para asegurar que el agua se filtre a través de la estructura del concreto permeable, se debe considerar o estimar un valor de volumen de vacíos en la mezcla, este contenido oscila entre 15% a 35%.

Factor de densificación (F_d): este concepto en dosificación indica el reacomodo de partículas cuando se realiza la compactación bien sea por varillado, vibrado o cualquier otro tipo de mecanismo utilizado haciendo que la mezcla sea más densa, esta acción provoca una eliminación de vacíos o aire atrapado naturalmente, pero no logra eliminarlos en su totalidad. El factor de densificación (F_d) depende de la granulometría, de la humedad y el grado de energía de compactación. De acuerdo a la evidencia experimental obtenida por los investigadores Chilenos a este factor lo denominan como *Factor de compactación*, y determinaron que este factor tiene un valor que varía entre 0.84 a 0.99, dependiendo fundamentalmente de la relación agua/cemento y de la granulometría escogida.

PASO 3: *Análisis para dosificar*

El sistema de dosificación aplicado para este trabajo de investigación, parte de la cantidad de vacíos disponibles originalmente en el agregado y que es reducido al agregar la pasta de cemento.

Castro Javier, et al. (2009) expone:

En teoría, si se utiliza un agregado con un elevado porcentaje de vacíos y se agrega un volumen de pasta de cemento que no sea superior al porcentaje de vacíos que contiene inicialmente el agregado, esta pasta de cemento llenara solo parcialmente los vacíos disponibles quedando un volumen de vacíos. Sin embargo, en la práctica, una vez que los materiales son mezclados y el concreto es compactado la pasta de cemento no solo llenara los vacíos entre los agregados sino que también recubrirá a las partículas del agregado, separándolas e incrementando el volumen original de este agregado, por lo que el volumen final será mayor por efecto de este “esponjamiento” de la mezcla (p. 272).

PASO 4: *Datos de partida estimados y conocidos*

✓ ESTIMADOS:

Relación agua/cemento (a/c): Valor entre 0.3 a 0.4.

Factor de densificación (Fd): Valor entre 0.84 a 0.99.

Volumen de vacíos en la mezcla (Vm): Valor entre 0.15 a 0.35.

✓ **CONOCIDOS:**

Volumen inicial de vacíos en el agregado (Va): Se lo obtiene a partir del procedimiento que indica la norma NTC 92 “Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados”.

$$\% \text{Vacíos} = \left[1 - \frac{\text{Peso unitario compactado}}{\text{Densidad aparente Agregado}} \right] * 100 \dots \text{Ec. 1}$$

La densidad aparente se determina de acuerdo como lo especifica la norma NTC 176 “Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso”.

Es importante tener en cuenta que para determinar el volumen inicial de vacíos o porcentaje de vacíos inicial en el agregado se debe tomar el valor del peso unitario en estado compactado, porque el análisis que se presenta más adelante parte del hecho que el concreto no se encuentra en estado suelto sino compactado.

PASO 5: Análisis para determinar la cantidad de cemento (C)

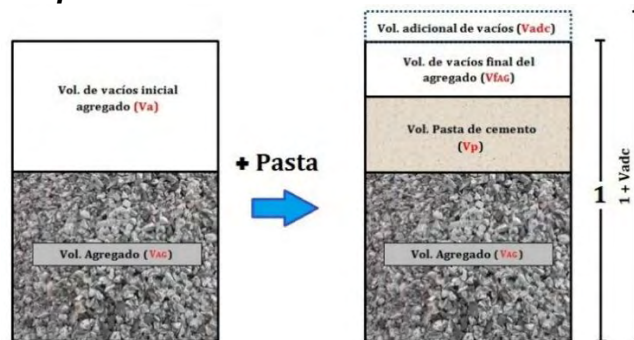


Imagen 7. Efecto de la inclusión de la pasta de cemento en el agregado con alto contenido inicial de vacíos.¹²

A partir del anterior esquema se realiza el siguiente análisis:

• **Volumen Inicial de vacíos en el agregado (Va):**

$$Va = \frac{Vf_{AG} + Vp}{1} \dots \text{Ec. 2}$$

¹² Estudios de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón. CASTRO Javier, et al. p.272. Copyright, 2009.

Donde:

Vf_{AG}: Volumen final de vacíos en el agregado.

Vp: Volumen de la pasta de cemento.

- **Volumen total de vacíos en la mezcla (Vm)**

$$Vm = \frac{Vf_{AG} + Vadc}{1 + Vadc} \dots \dots \dots \text{Ec. 3}$$

Donde:

Vadc: Volumen adicional de vacíos.

Despejando de la Ec.2 volumen final de vacíos en el agregado (Vf_{AG}) y reemplazando en la Ec.3.

$$Vf_{AG} = Va - Vp \dots \dots \dots \text{Ec. 4}$$

Reemplazando la Ec.4 en Ec.3.

$$Vm = \frac{Va - Vp + Vadc}{1 + Vadc} \dots \dots \dots \text{Ec. 5}$$

- **Volumen de la pasta de cemento (Vp)**

Despejando de la Ec.5 volumen de la pasta de cemento (Vp), se obtiene:

$$Vp = Va + Vadc - Vm * (1 + Vadc) \dots \dots \dots \text{Ec. 6}$$

- **Volumen adicional de vacíos (Vadc).**

Antes de realizar la dosificación y elaboración de la muestra, el valor de esta variable se desconoce.

El volumen adicional de vacíos (Vadc), es el volumen de vacíos inducido por la interface (matriz) pasta y/o mortero que se ubica entre los agregados generando una separación de éstos, dando origen así a la formación de este volumen de vacíos adicional.

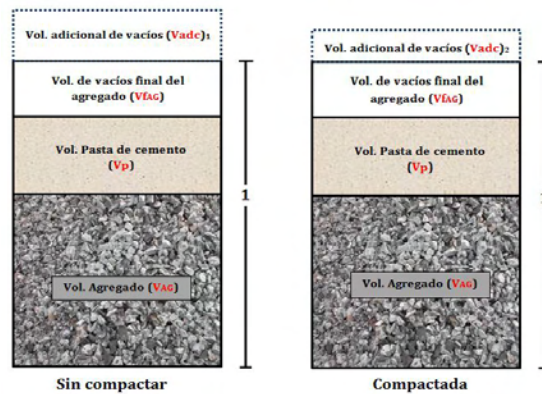


Imagen 8. Efecto de la compactación sobre una mezcla de concreto permeable.

A partir del esquema de la *Imagen 8*, se puede deducir que el factor de densificación F_d es igual a:

$$F_d = \frac{1}{1 + V_{adc}} \quad \text{Ec. 7}$$

Es decir, el factor de densificación es la relación entre el volumen total teórico de la muestra y el volumen total real de la muestra.

Como se ha descrito anteriormente el valor del volumen adicional de vacíos al inicio de la dosificación se desconoce, por esta razón es que se asume un valor empírico para el factor de densificación, para así calcular el contenido de volumen de pasta de cemento. Partiendo de lo anterior, de la Ec.7, despejando volumen adicional de vacíos (V_{adc}).

$$V_{adc} = \frac{1 - F_d}{F_d} \quad \text{Ec. 8}$$

Reemplazando la Ec.8 en la Ec.6, se obtiene el cálculo de contenido de pasta de cemento en términos del factor de densificación (F_d):

$$V_p = V_a - \frac{V_m}{F_d} + \frac{1}{F_d} - 1 \quad \text{Ec. 9}$$

• **Calculo del contenido de cemento (C)**

$$V_p = V_c + V_w + V_{adt} \quad \text{Ec. 10}$$

Dónde:

V_c: Volumen del cemento.

V_w: Volumen del agua.

V_{adt}: Volumen del aditivo.

Recordando que:

$$\text{Volumen} = \frac{\text{Masa}}{\text{Densidad}} \dots \dots \dots \text{Ec. 11}$$

$$V_p = \frac{C}{\delta_c} + \frac{a}{\delta_a} + \frac{D.Adt * C}{\delta Adt} \dots \dots \dots \text{Ec. 12}$$

Dónde:

C: Peso del cemento.

a: Peso de agua.

D.Adt: Dosificación aditivo.

δ_c : Densidad del cemento.

δ_a : Densidad del agua.

δAdt : Densidad del aditivo.

Despejando de la Ec. 12, peso del cemento (C), se obtiene:

$$\text{Peso Cemento (C)} = \frac{V_p}{\left(\frac{1}{\delta_c} + \frac{a/c}{\delta_a} + \frac{D.Adtiv}{\delta Adt}\right)} \dots \dots \dots \text{Ec. 13}$$

• **Calculo del volumen de vacíos conectados (Vcon)¹³**

En la práctica se debe considerar que en la mezcla de concreto habrá vacíos conectados y también se generaran algunos vacíos no conectados, de modo que el porcentaje interconectado de vacíos del concreto endurecido será menor.

Investigaciones previas han medido una relación entre el porcentaje teórico calculado en forma gravimétrica (Vm) y el porcentaje medido de vacíos conectados (Vcon), expresada en la siguiente ecuación:

$$Vcon = 0.898 * Vm - 3.1 \dots \dots \dots \text{Ec. 14}^{14}$$

• **Calculo del volumen del cemento (Vc):**

$$Vc = \frac{C}{\delta_c} \dots \dots \dots \text{Ec. 15}$$

• **Calculo cantidad de agua de diseño (a):**

$$\text{Agua de diseño (a)} = \text{Relación} \frac{a}{c} * \text{Peso de cemento (C)} \dots \dots \dots \text{Ec. 16}$$

• **Calculo volumen seco de los agregados (VAG):**

¹³ CASTRO, et al. Op. Cit., Pp. 271 – 284.

¹⁴ Ecuación determinada por investigaciones de FCPA, 1993 – “Portland Cement Pervious Pavement Manual” Florida Concrete and Products Association Inc.

$$V_{AG} = 1 - (V_c + V_w + V_m) \dots \dots \dots \text{Ec. 17}$$

• **Peso seco de los agregados (P_{AG}):**

$$\text{Peso seco}_{AGREGADOS} = V_{AG} * \text{Densidad del agregado} * \dots \dots \dots \text{Ec. 18}$$

Nota: Para la dosificación del CONCRETO MODIFICADO TIPO II, la densidad que se tiene en cuenta es la densidad promedio.

• **Calculo de la densidad promedio:**

$$\text{Densidad prom} = \frac{100\%}{\frac{\% \text{ Agregado fino}}{\text{Densidad Agregado fino}} + \frac{\% \text{ Agregado grueso}}{\text{Densidad Agregado grueso}}} \dots \dots \dots \text{Ec. 19}$$

• **Calculo del peso seco del agregado grueso y fino:**

$$\text{Peso seco}_{\text{Agregado fino}} = \text{Peso seco}_{AGREGADOS} * \frac{\% \text{ Agregado fino}}{100} \dots \dots \dots \text{Ec. 20}$$

$$\text{Peso seco}_{\text{Agregado grueso}} = \text{Peso seco}_{AGREGADOS} * \frac{\% \text{ Agregado grueso}}{100} \dots \dots \dots \text{Ec. 21}$$

• **Calculo del volumen seco de los agregados:**

$$\text{Volumen seco}_{\text{Agregado fino}} = \frac{\text{Peso seco}_{\text{Agregado fino}}}{\text{Densd. aparente}_{\text{Agregado fino}}} \dots \dots \dots \text{Ec. 22}$$

$$\text{Volumen seco}_{\text{Agregado grueso}} = \frac{\text{Peso seco}_{\text{Agregado grueso}}}{\text{Densd. aparente}_{\text{Agregado grueso}}} \dots \dots \dots \text{Ec. 23}$$

• **Ajuste de agua de diseño por humedad y absorción de los agregados (Agua efectiva):**

$$\text{Agua}_{\text{Grava}} = \text{Peso seco}_{\text{Agreg.grueso}} - \left[\frac{\% \text{ humedad}_{\text{Agreg.grueso}} - \% \text{ absorción}_{\text{Agreg.grueso}}}{100} \right] \dots \dots \dots \text{Ec. 24}$$

$$\text{Agua}_{\text{Arena}} = \text{Peso seco}_{\text{Agreg.fino}} - \left[\frac{\% \text{ humedad}_{\text{Agreg.fino}} - \% \text{ absorción}_{\text{Agreg.fino}}}{100} \right] \dots \dots \dots \text{Ec. 25}$$

$$\text{Agua efectiva} = \text{Agua de diseño} - (\text{Agua}_{\text{Grava}} + \text{Agua}_{\text{Arena}}) \dots \dots \dots \text{Ec. 26}$$

• **Peso húmedo de los agregados:**

$$\text{Peso húmedo}_{\text{Agregado grueso}} = \text{Peso seco}_{\text{Agregado grueso}} * (\text{humedad}_{\text{Agreg.grueso}} + 1) \dots \dots \dots \text{Ec. 27}$$

$$\text{Peso húmedo}_{\text{Agregado fino}} = \text{Peso seco}_{\text{Agregado fino}} * (\text{humedad}_{\text{Agreg.fino}} + 1) \dots \dots \dots \text{Ec. 28}$$

Nota: La humedad se la toma en tanto por uno, no en porcentaje.

• **Calculo de las proporciones en peso:**

$$\begin{array}{l} \text{Cemento} : \text{Agregado Fino} : \text{Agregado grueso} / \text{agua} \\ \frac{\text{Peso cemento}}{\text{Peso cemento}} : \frac{\text{Peso húmedo}_{\text{A.fino}}}{\text{Peso cemento}} : \frac{\text{Peso húmedo}_{\text{A.grueso}}}{\text{Peso cemento}} : \frac{\text{Agua efectiva}}{\text{Peso cemento}} \dots \dots \dots \text{Ec. 29} \end{array}$$

PASO 6: Consideraciones para el concreto modificado TIPO II

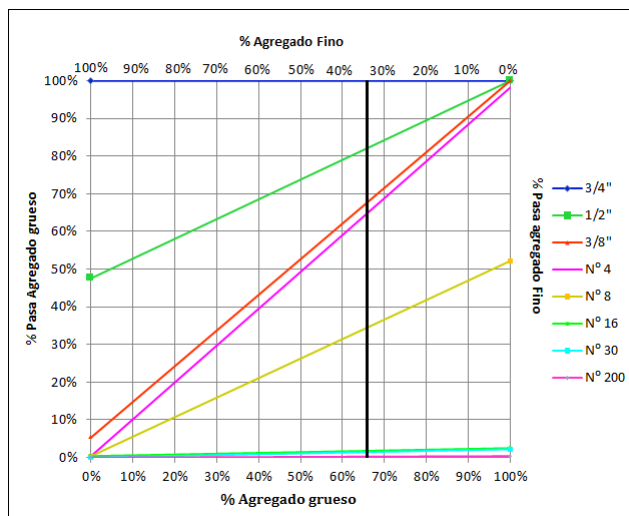
Se basa específicamente en el estudio de las proporciones de los materiales que se obtiene de su gradación granulométrica (método gráfico), con el fin de obtener una mejor proporción de agregado grueso y agregado fino. Es importante aclarar que la granulometría de los agregados es discontinua, puesto que se ha condicionado el tamaño de las partículas con el fin de lograr un porcentaje o contenido de vacíos inicial (Va) bastante considerable para garantizar la función principal de este tipo de concreto que es la permeabilidad. Partiendo del análisis granulométrico tanto para el agregado fino y grueso, véase *Tablas 1 y 2*, se realiza el procedimiento del método gráfico. Este método se usa con el fin de tener una aproximación o referente de cuál es la proporción más adecuada con las granulometrías que se está trabajando.

TAMIZ (in)	% PASA			
	Límite Inferior	Granulometría a comparar	Límite Superior	Verificación
GRAVA				
3/4"	90%	100%	100%	OK
1/2"	-	48%	-	-
3/8"	20%	5,34%	55%	NO
Nº 4	0%	0,40%	10%	OK
Nº 8	0%	0,39%	5%	OK
Nº 16	-	0,39%	-	-
ARENA				
3/8"	100%	100%	100%	OK
Nº 4	95%	98,20%	100%	OK
Nº 8	80%	52,18%	100%	NO
Nº 16	50%	2,51%	85%	NO
Nº 30	25%	2,21%	60%	NO
Nº 50	10%	2,12%	30%	NO
Nº 100	2%	1,45%	10%	NO
Nº 200	0%	0,37%	2%	OK

Tabla 5. Verificación especificación granulométrica. NTC 174.

TAMIZ (in)		% PASA			
		Granulometría Grava	Granulometría Arena	Límite Inferior	Límite Superior
3/4"	19,4	100%	100%	100%	100%
1/2"	12,7	48%	100%	90%	100%
3/8"	9,51	5,34%	100%	40%	70%
Nº 4	4,76	0,40%	98,20%	0%	15%
Nº 8	2,38	0,39%	52,18%	0%	5%
Nº 16	1,19	0,39%	2,51%		
Nº 30	0,595	0%	2,21%		
Nº 50	0,297	0%	2,12%		
Nº 100	0,149	0%	1,45%		
Nº 200	0,074	0%	0,37%		

Tabla 6. Límite superior e inferior.

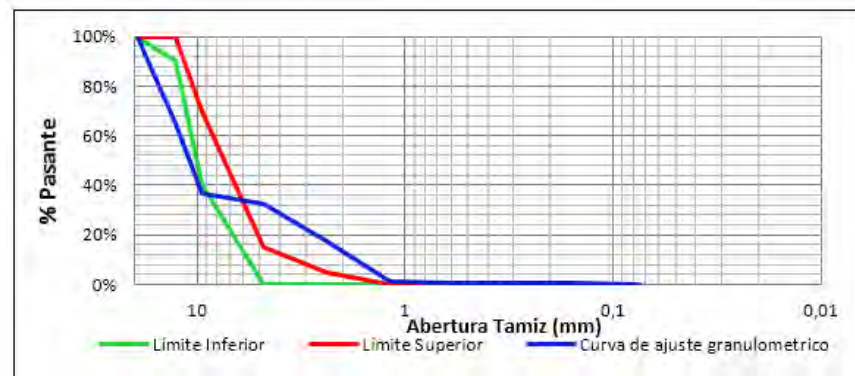


Gráfica 3. Proporción granulométrica para concreto modificado Tipo II.

TAMIZ		AGREGADO		PROPORCIONES		MEZCLA	LÍMITE GRANULOMÉTRICO MÉTODO GRÁFICO		
		AG	AF	AG 67%	AF 33%		INFERIOR	SUPERIOR	CUMPLE
3/4"	19,4	100%	100%	67%	33%	100%	100%	100%	OK
1/2"	12,7	48%	100%	32%	33%	65%	90%	100%	NO
3/8"	9,51	5,34%	100%	4%	33%	37%	40%	70%	NO
Nº 4	4,76	0,40%	98,20%	0%	32%	33%	0%	15%	NO
Nº 8	2,38	0,39%	52,18%	0%	17%	17%	0%	5%	NO
Nº 16	1,19	0,39%	2,51%	0%	1%	1%	0%	0%	NO
Nº 30	0,595		2,21%		1%	1%	0%	0%	NO
Nº 50	0,297		2,12%		1%	1%	0%	0%	NO
Nº 100	0,149		1,45%		0%	0%	0%	0%	NO
Nº 200	0,074		0,37%		0%	0%			

Tabla 7. Granulometría ajustada para proporción agregados concreto modificado Tipo II (con finos).

En la *gráfica 4*, se puede observar que de acuerdo con el tamaño de partículas de cada uno de los agregados, recordando que están condicionadas, se ajusta más a una proporción de 33% del agregado fino y 67% agregado grueso. Inicialmente se trabajó con la proporción 40% de agregado fino y 60% de agregado grueso, pero dada a la baja obtención de resistencia a la compresión, se optó por aumentar el porcentaje de proporción en el agregado grueso.



Gráfica 4. Ajuste curva granulométrica para proporción agregados del concreto modificado Tipo II (con finos).

Para obtener las proporciones de la mezcla para el CONCRETO MODIFICADO TIPO II (Con finos), se tiene en cuenta el procedimiento descrito en el numeral 2.4.1 “*Procedimiento de dosificación concreto permeable*”, teniendo en cuenta que el porcentaje de vacíos inicial en el agregado (V_a) es el calculado para la combinación de la siguiente manera.

- **Peso Unitario compactado promedio ponderado:**

$$P. U. C \text{ prom. pond} = \frac{100 \%}{\frac{\% \text{ Agregado fino}}{P. U. C_{\text{Agreg. fino}}} + \frac{\% \text{ Agregado grueso}}{P. U. C_{\text{Agreg. grueso}}}} \dots \dots \dots \text{Ec. 30}$$

- **Densidad aparente promedio ponderado:**

$$\text{Densidad prom. pond} = \frac{100\%}{\frac{\% \text{ Agregado fino}}{\text{Densidad Agregado fino}} + \frac{\% \text{ Agregado grueso}}{\text{Densidad Agregado grueso}}} \dots \dots \dots \text{Ec. 31}$$

- **Volumen de vacíos inicial en la combinación de los agregados (V_a):**

$$\% \text{Vacíos Combinación} = \left[1 - \frac{P. U. C \text{ Prom. ponderado}}{\text{Densidad aparente prom.ponderado}} \right] * 100 \dots \dots \dots \text{Ec. 32}$$

El cálculo para el contenido de cemento (C), se realiza mediante el análisis descrito para CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos).

2.5 DISEÑO DE MEZCLA

A continuación se presenta la aplicación del método de diseño que se ha establecido para este tipo de concreto. Tomando como ejemplo una de las muestras de prueba que se realizaron para cada tipo de concreto modificado. Para la elaboración de todas las mezclas se realizan bajo condiciones de laboratorio usando normativas NTC desarrolladas para concreto convencional, ya que no existe normativa específica para concreto permeable.

CONCRETO MODIFICADO TIPO I (SIN FINOS): MEZCLA DE PRUEBA

Compuestos:

- Cemento Portland Tipo I (uso general), marca Argos.
- Agregado grueso triturado, tamaño de partículas entre $\frac{1}{2}$ in a TN4.
- Agua

Con base en las ecuaciones deducidas y especificadas en la sección 2.4.1 (*Procedimiento de dosificación concreto permeable*) del presente documento, se da inicio a calcular la dosificación requerida y de esta manera dar inicio con una mezcla de prueba para el CONCRETO MODIFICADO TIPO I (Sin finos). Ver en ANEXO B – *Procedimiento matemático de dosificación*.

• PROCEDIMIENTO ELABORACIÓN DE LA MEZCLA

a. *Determinación de la humedad del agregado grueso.*

Se toma una muestra de agregado grueso, se determina su peso con una aproximación de 0.1%. A continuación, se seca totalmente la muestra en el recipiente, por medio de la fuente de calor seleccionada, teniendo la precaución de evitar perder partículas durante el secado. Una vez determinada la humedad del agregado se realiza todos los cálculos pertinentes (*Ver Sección 2.4.1 - Paso 3. Análisis para dosificar*), con el fin de obtener las proporciones de cada material de acuerdo al volumen a realizar.

En la fabricación de los moldes para la preparación de especímenes cilíndricos de concreto permeable, se tiene en cuenta las especificaciones de la norma ASTM C 470 “Especificación estándar para moldes para encofrado vertical de cilindros de concreto”. Se establece usar un molde cilíndrico de 4 x 8 pulgadas porque el tamaño máximo del agregado a usar dentro de esta investigación no excede de $\frac{3}{4}$ de pulgada, por lo tanto de acuerdo a la norma NTC 1377 “Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio”, permite usar este tipo de moldes. Para la elaboración de la mezcla de concreto permeable, se trabaja con las especificaciones y procedimientos establecidos en la NTC 1377.

b. Asentamiento

Una vez la mezcla este homogenizada, se mide el asentamiento de acuerdo a la norma NTC 396 “*Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto*”. Como se ha mencionado anteriormente el concreto permeable tiene por característica especial de presentar un asentamiento de cero (0) a 1” (pulgada), como se puede apreciar en la *Imagen 9*.



Imagen 9. MEZCLA DE PRUEBA: Concreto modificado Tipo I (sin finos) a/c = 0.3. asentamiento = 0.

c. Elaboración de muestras

Se impregna las paredes internas del molde con ACPM, con el fin de evitar que la mezcla se adhiera a la superficie de éste, se llena el cilindro en tres capas iguales, se apisona cada capa 25 veces con una distribución uniforme sobre la sección transversal, con la punta redondeada de la varilla lisa de 5/8 in (16 mm) de diámetro.

Los cilindros recién elaborados se dejan en un lugar fresco y seco dentro del laboratorio para que fragüen por lo menos 24 horas ($24h \pm 8 h$). Una vez cumplidas las 24 horas de elaboración se desencofran, se tiene especial cuidado al realizar esta operación puesto que por su condición porosa es muy propenso a sufrir daños en su estructura. Una vez desencofrados se marcan claramente con pintura para poder identificarlos posteriormente. Inmediatamente desencofrados y marcados, los cilindros de concreto permeable pasan a ser curados, se los almacena en un tanque con agua libre sobre la superficie de estos, el agua debe estar saturada con cal (3 gramos de cal hidratada por litro de agua).

Durante el proceso de elaboración de las pruebas iniciales de la muestra de prueba, en un lote de especímenes del CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos) y CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos), en el proceso de curado no se le agregó cal en los tanques, observándose al día siguiente la aparición de pequeños cristales que son más evidentes a simple vista en el concreto permeable TIPO I (sin finos) como se puede observar en la *imagen 10*.



Imagen 10. Fenómeno de lixiviación por hidróxido de calcio - concreto Tipo I (sin finos).

Como es de conocimiento, los fenómenos que ocurren durante la hidratación del cemento son sumamente complejos. Pueden considerarse como principales reacciones de hidratación del clinker las correspondientes a la hidratación de los silicatos y aluminatos de calcio. Durante la reacción con el agua los silicatos y aluminatos liberan hidróxido de calcio Ca(OH)_2 . Los cristales que se forman se presentan alargados, prismáticos o en agujas, de monosilicato de calcio hidratado y de aluminatos hidratados. Estos cristales se van entrelazando a medida que avanza el proceso de hidratación, dando lugar a una estructura que va a garantizar la resistencia del concreto.¹⁵

Con base en la explicación que da el autor Diego Sánchez de Guzmán con respecto a las reacciones de hidratación, se puede indicar que el fenómeno que se presenta es lixiviación por hidróxido de calcio como consecuencia a la ausencia de cal en el agua de curado. Esto es producto, de que el PH del agua potable generalmente se encuentra entre un valor de 6.5 a 9 y el PH del concreto es mayor a 12 (alcalino), por lo tanto, lo que se busca al adicionar cal es aumentar el PH al agua hasta un rango de 13 o 14, con el fin de no quitar hidróxido de calcio que el concreto libera y de esta forma no afectar la reducción de la resistencia¹⁶. Que para este caso al tratarse de un concreto con alta porosidad resulta ser más evidente que en un concreto convencional.

Para profundizar más en éste fenómeno se requiere de apoyo y evaluación en la parte química, para lo cual ya se sale de propósito fundamental de este trabajo de grado que consiste en el diseño de una mezcla para concreto permeable con agregados de las fuentes de abastecimiento del municipio de Ipiales; pero si se deja la inquietud para ser estudiado en futuras investigaciones, puesto que el tema de curado de especímenes en la actualidad ha restado importancia especialmente en obra.

¹⁵ SÁNCHEZ DE GUZMÁN Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero - Las reacciones de hidratación. Pág 39.

¹⁶ GASTAÑADUI RUIZ Fernando. Control de calidad del concreto.

d. Prueba de resistencia a la compresión (f'_c)

La prueba de resistencia a la compresión es la más usada en laboratorios de control de calidad, para los trabajos de rutina. Norma NTC 673 “*Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto*”.

Procedimiento:

- Se mide el diámetro y altura del cilindro, con el fin de calcular el área transversal del cilindro y también para determinar la relación de esbeltez (altura/diámetro) la cual no debe ser menor de 1.8, caso contrario se debe corregir el resultado obtenido de la resistencia multiplicándolo por el factor de corrección de esbeltez requerido.



Imagen 11. Medición de diámetro y altura.

- Se pesa el cilindro.
- Se coloca sobre la plataforma de la prensa el cilindro, colocándole los aditamentos necesarios para que el cilindro quede bien cabeceado.
- Se centra bien el cilindro cuidando de que la placa de carga resulte perfectamente axial. Se hace funcionar el mecanismo de aplicación de carga.
- Lectura de carga.

CONCRETO MODIFICADO TIPO II (CON FINOS): MEZCLA DE PRUEBA

Compuestos:

- Cemento Portland Tipo I (uso general), marca Argos.
- Agregado grueso, triturado, tamaño de partículas entre ½ pulgada a TN4.
- Agregado fino, tamaño de partículas pasante tamiz 3/8 pulgada hasta retenido en tamiz N16.
- Agua.

Con base en las ecuaciones deducidas y especificadas en la sección 2.4.1 (*Procedimiento de dosificación concreto permeable*) del presente documento y teniendo en cuenta las consideraciones expuestas en la misma sección para la

dosificación del CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos), se da inicio a calcular la dosificación requerida y de esta manera dar inicio con una mezcla de prueba para éste tipo de concreto. Ver en *ANEXO B - Procedimiento matemático de dosificación*.

- **PROCEDIMIENTO ELABORACIÓN DE LA MEZCLA**

El procedimiento a desarrollar para este tipo de mezcla es el mismo contemplado para el CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos) pero teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente descritas en este documento para CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos).

a. Asentamiento



Imagen 12. MEZCLA DE PRUEBA: Concreto modificado Tipo II (con finos) $a/c = 0.3$. asentamiento = 0, proporción AF/AG: 40/60.

b. Prueba de resistencia a la compresión (f'_c)



Imagen 13. Colocación del cilindro concreto modificado Tipo II, sobre la plataforma de la prensa. Edad 7 días.

2.6 PERMEABILIDAD

El rasgo más distintivo del concreto permeable es su alta permeabilidad, que es una medida de la facilidad con la cual un líquido puede fluir a través del material bajo un gradiente de presión. El coeficiente de permeabilidad para un concreto permeable es un dato cuya determinación correcta es fundamentalmente importante a tener en cuenta. Hay varios procedimientos para la determinación de

la permeabilidad unos son *directos*, así llamados porque se basan en pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición de dicho coeficiente; y otros *indirectos*, proporcionados, en forma secundaria, por pruebas y técnicas que primariamente persiguen otros fines¹⁷.

DIRECTOS:

- Permeámetro de carga constante
- Permeámetro de carga variable
- Prueba In Situ

INDIRECTOS:

- Cálculo de la prueba de consolidación
- Cálculo a partir de la curva granulométrica
- Cálculo con la prueba horizontal de capilaridad

2.6.1 Permeámetro de carga variable. Para las pruebas de permeabilidad se construye un permeámetro de carga variable tomando como referencia el modelo que presenta el comité ACI 522R-10 permeámetro de Neithalath, *et al.* (2003). Sin embargo, para esta investigación se realizó una modificación en cuanto a la eliminación del tubo de drenaje que posee el presentado por el ACI, dado que en las mediciones de prueba se observa que la columna de agua en este tubo provoca una disminución en la velocidad de descargue; se justifica esta eliminación con el hecho de que dentro de esta investigación lo que se busca es analizar la velocidad de flujo del agua que se presenta únicamente en la muestra, por lo tanto el tubo de drenaje presentado en el permeámetro de Neithalath se lo reemplaza por el piezómetro obteniendo así una mejor medición de la diferencia de niveles en el tubo alimentador bajo la *ecuación 33*, que se obtiene a partir de la calibración del equipo.

En este tipo de permeámetro se mide la cantidad de agua que atraviesa, por diferencia de niveles en un tubo alimentador.

Para el montaje del permeámetro de carga variable se requiere de las siguientes piezas:

- ✓ 1 tubo en acrílico transparente de 4 in de diámetro con una longitud de 42 cm.
- ✓ 2 uniones sanitarias de PVC de diámetro de 4 in.
- ✓ 1 racor de diámetro de 3/8 in con salida a 1/4 in.
- ✓ Válvula de PVC tipo globo de diámetro 3/4 in.
- ✓ 1 tubo sanitario de PVC de 4 in, con una longitud de 20 cm.

¹⁷ SOUTO Gabriela, 2009. ENSAYOS DE PERMEABILIDAD. Geotecnia.

- ✓ 1 tubo de PVC de presión, diámetro $\frac{3}{4}$ in.
- ✓ 1 manguera de nivel de diámetro $\frac{1}{4}$ in.

Se realiza el respectivo montaje de cada una de las piezas; para este permeámetro se colocó un piezómetro para tener una mejor precisión de la lectura de la altura.



Imagen 14. Permeámetro de carga variable elaborado para esta investigación.

• **MONTAJE PERMEÁMETRO DE CARGA VARIABLE**

Para el montaje del permeámetro a continuación se presenta un resumen del procedimiento:

- ✓ La muestra a ensayar previamente saturada, la muestra es introducida en un tubo de PVC para evitar que el agua fluya a lo largo del costado de la muestra. A este tubo se le realizó un corte longitudinal con el fin de facilitar la colocación de la muestra y así evitar posibles daños a esta.



Imagen 15. Colocación de la muestra a ensayar.

- ✓ Sellado con masilla al corte longitudinal del tubo de PVC que contiene la muestra, esto con el fin de evitar posibles fugas de agua a través de este, y para garantizar una mayor hermeticidad se le coloca una abrazadera de tipo industrial. Se coloca la muestra sobre la base del permeámetro y se ensambla del tubo en acrílico sobre la parte superior de la muestra.



Imagen 16. Sellado de tubo de PVC, empate sobre la base del permeámetro y ensamble total.

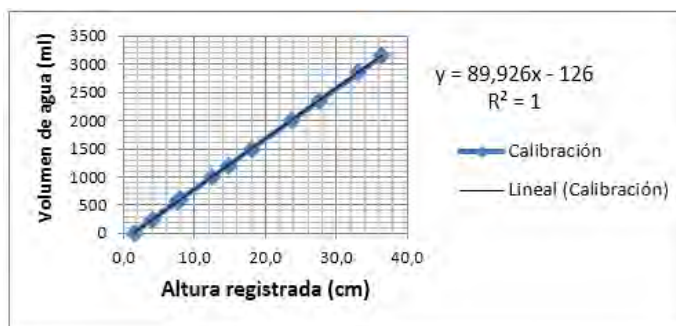
• CALIBRACIÓN PERMEÁMETRO DE CARGA VARIABLE

Para la calibración del permeámetro y medición de la permeabilidad se agrega agua al tubo en acrílico para lograr saturar la muestra y la base de drenaje. La muestra se saturara de agua hasta que aflore sobre la superficie de ésta. Se agrega un poco más de agua y posteriormente se abre la válvula se deja drenar un poco el agua sin permitir que baje más de la superficie de la muestra a ensayar, esto con el fin de reducir las bolsas de aire que se hayan formado en la muestra y así se asegura que este completamente saturada.

Con la válvula cerrada y asegurándose que el agua aflore sobre la superficie de la muestra se inicia a agregar un volumen determinado de agua y se registra la altura que marco este volumen en el piezómetro, para posteriormente mediante procesos matemáticos se evalúa la correlación que existe entre los datos de entrada y la ecuación de la línea de tendencia. Y de esta forma mediante la ecuación poder determinar el volumen de agua según la altura registrada en el tubo de acrílico graduado.

Volumen (ml)	0	250	550	600	1000	1200	1500	2000
Registro lectura (cm)	1,5	4,15	7,49	8,05	12,5	14,73	18,07	23,64

Tabla 8. Registro de datos para calibración del permeámetro de carga variable.



Gráfica 5. Calibración permeámetro: volumen de agua agregada vs. altura.

De acuerdo al coeficiente de correlación (R) que se obtiene mediante la regresión lineal es el que más se acerca al valor de uno (1), lo cual significa que para este permeámetro de carga variable la ecuación lineal presenta mayor grado de correlación entre las dos variables, y por lo tanto la ecuación que se emplea para la medición del volumen de acuerdo al registro de altura que se obtenga es la siguiente:

$$\text{Volumen} = 89.926 * \text{Altura} - 126 \quad [\text{cm}^3] \dots\dots\dots \text{Ec. 33}$$

Verificación de la *Ecuación 33*.

Para una altura de 15 cm: $\text{Volumen} = 89.926 * 15 - 126 = 1223 \text{ cm}^3$

En el permeámetro de carga variable, con un volumen de 1223 cm^3 se debe registrar una altura de 15 cm.

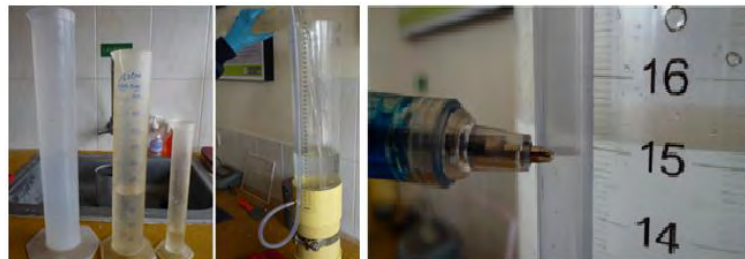


Imagen 17. Verificación ecuación de calibración permeámetro de carga variable.

2.6.2 Cálculo coeficiente de permeabilidad “K”. Las características del movimiento de agua a través de un medio poroso se expresan con la ley de Darcy, y se expresa mediante la *Ecuación 34*, para un permeámetro de carga variable.

$$K = \frac{L * a}{A * t} \ln \left(\frac{h1}{h2} \right) \dots\dots\dots \text{Ec. 34}$$

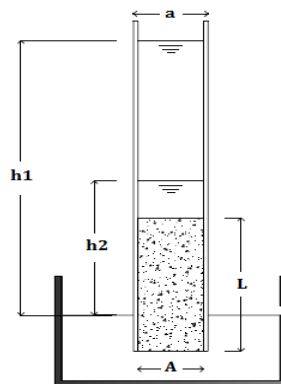


Imagen 18. Esquema permeámetro de carga variable.

Dónde:

a: Área del tubo vertical de carga.

A: Área de la muestra.

L: Longitud de la muestra.

h1: Carga hidráulica al principio de la prueba.

h2: Carga hidráulica al final de la prueba.

t: Tiempo requerido para que la carga hidráulica pase de h1 a h2.

El procedimiento que se debe llevar a cabo para la medición de permeabilidad es el siguiente:

- ✓ Con la válvula cerrada el tubo de acrílico graduado se llena con agua hasta la altura de 20cm. Posteriormente la válvula se abre y se toma el tiempo (t) en segundos necesario para que la caída de la carga hidráulica inicial (h1) termine en la carga hidráulica (h2).
- ✓ El registro de tiempo que se tiene para las muestras tanto para CONCRETO MODIFICADO TIPO I (Sin finos) y CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos) se inicia desde la altura de 20 cm, se registra los tiempos en las alturas 15, 10 y 5 cm y hasta que el agua haya desaparecido de la superficie de la muestra.

3. MUESTRA PILOTO

Para llevar a cabo esta investigación se precisa realizar la toma de una muestra piloto con el objeto de adquirir una muestra de análisis final representativa.

3.1 CONCRETO MODIFICADO TIPO I (SIN FINOS)

Con el fin de determinar el tamaño muestral, se precisa realizar una muestra piloto a partir de una población de 20 especímenes para una relación $a/c = 0.34$, para analizar estadísticamente y así determinar el número de unidades de muestreo que van a constituir la muestra definitiva para cada relación agua/cemento.

3.1.1 Dosificación muestra piloto. Los datos y procedimiento matemático de dosificación de diseño de mezcla de la muestra piloto para una relación agua/cemento de 0.34, se encuentra registrado en el *ANEXO C*.

3.1.2 Estimación del porcentaje del contenido de vacíos. El contenido de vacíos del concreto permeable no se puede medir con la prueba típica que se le realiza al concreto convencional mediante la norma NTC 1028 (ASTM C 173) "*Determinación del contenido de aire en el concreto fresco método volumétrico*", ya que la capacidad del medidor de aire no es lo suficientemente grande como para medir el contenido de aire, esto debido al alto contenido de vacíos que naturalmente presenta el concreto permeable.

Por lo tanto, el contenido de vacíos del concreto permeable para esta investigación se calcula utilizando el método práctico que se propone en la Norma Chilena Oficial NCh 1326 Of.77 "*Porcentaje de huecos en áridos – Determinación práctica de huecos en gravas*". Este método propuesto en la norma NCh 1326 Of.77 es adaptado a la necesidad que presenta este trabajo de investigación. Es un método rápido y un valor más exacto se obtiene con la muestra en estado saturado y superficialmente seco (sss).

Para este ensayo se requiere de:

- ✓ 1 tubo sanitario de PVC de diámetro de 4 in.
- ✓ 1 vidrio de 4mm de espesor
- ✓ Masilla
- ✓ Probeta

Procedimiento:

La muestra debe estar es estado sss (saturado superficialmente seco), para esto al momento de sacar los cilindros del curado se les deja escurrir el agua, el tiempo que se utiliza es de 15 minutos para todos los cilindros a ensayar, tiempo que se ha estimado de acuerdo a la experiencia que se adquirió durante la elaboración de las diferentes muestras de prueba previas a la muestra piloto.

Se introduce la muestra en el tubo de PVC, y posteriormente se la coloca sobre el vidrio. Con la masilla se sella la base entre el tubo y el vidrio, asegurando hermeticidad para evitar cualquier fuga de agua.

Con una probeta se vacía agua hasta que aflore sobre la muestra registrando así la cantidad de agua usada.



Imagen 19. Ensayo para determinar el porcentaje de vacíos.

El volumen de agua empleada representa el contenido de vacíos, expresado en porcentaje resulta la siguiente expresión:

$$\% \text{ Vacíos} = \frac{\text{Volumen de agua empleada}}{\text{Volumen de la muestra}} * 100 \dots \dots \dots \text{Ec. 35}$$

• **Resultados: % de vacíos muestra piloto**

El porcentaje de vacíos de la muestra piloto para el CONCRETO MODIFICADO TIPO I (Sin finos) se encuentra en un promedio de 21.4%, lo cual indica que se está dentro del rango que propone el ACI de 15% a 35%. Para observar con más detalle los resultados del ensayo ver en ANEXO C – Muestra piloto: Resultados % de vacíos CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos).

3.1.3 Cálculo coeficiente de permeabilidad “K”. Procedimiento de ensayo:

- Ajustar la muestra dentro del permeámetro de carga variable.
- Con la válvula cerrada, verter agua dentro de la muestra hasta una altura de 15 centímetros (150 mm) medida en el tubo de acrílico graduado. Abrir la válvula y dejar descargar un poco de agua, este paso se realiza con el fin de eliminar

cualquier bolsa de aire que se haya formado mientras se realiza la saturación de la muestra dentro del permeámetro.

- Cerrar la válvula, y verter nuevamente agua hasta la altura de 20 centímetros (200 mm) del tubo en acrílico graduado.
- A partir de la altura de 20 cm se inicia a medir los tiempos con la ayuda de un cronometro, para las alturas 15, 10 y 5 cm, y hasta que el agua desaparezca de la superficie de la muestra.
- Registrar los tiempos por cada altura, con su respectiva información de número de cilindro, relación a/c y tipo de concreto modificado.
- Los pasos 3 y 4 se repite 6 veces por cada muestra, para luego obtener la medía.

Los tiempos registrados para cada muestra para este ensayo se encuentran en el *ANEXO C – Registro de tiempos y tiempo promedio, ensayo permeabilidad*.

Para el cálculo del coeficiente de permeabilidad (K) se obtiene a partir de la *Ecuación 34*.

Por lo tanto teniendo en cuenta los siguientes datos, se procede a calcular el coeficiente de permeabilidad para cada muestra.

<i>Información Permeámetro</i>			<i>Información muestra</i>		
ÁREA promd.	91,57	cm ²	DIÁMETRO	10,7	Cm
DIÁMETRO TUBO ACRIL.	10,80	Cm	LONGITUD	20,1	Cm
DIÁMETRO TUBO ACRIL.	4,3	In	ÁREA	89,9	cm ²

Tabla 9. Información permeámetro y muestra.

A partir de la *Ecuación 33*, se determina el volumen de agua de acuerdo a la lectura que se realice en el permeámetro.

Los valores de carga hidráulica inicial **h1** y carga hidráulica final **h2**, se toman las alturas de 15 cm y 5 cm respectivamente, para lo cual el volumen de la altura h1 es 1223 cm³ y para la altura h2 324 cm³.

El coeficiente de permeabilidad “K” promedio que se obtiene para esta muestra piloto es de 6 cm/s, es importante destacar que la permeabilidad puede variar por el tamaño del agregado y la densidad de la mezcla. Para observar con mayor detalle los datos obtenidos de este ensayo dirigirse al *ANEXO C – Coeficiente de permeabilidad “K”, Muestra piloto, CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos). Relación a/c = 0.34*.

3.1.4 Evaluación resistencia a la compresión. Para la resistencia a la compresión, los 20 cilindros fueron fallados a la edad de 14 días. Los registros referentes se encuentran en el *Anexo C*.

MUESTRA PILOTO : Resistencia a la compresión f'c	
Identificación cilindro	f'c (14 días) PSI
OT: 1-1	1174
OT: 1-2	1552
OT: 1-3	1392
OT: 1-4	1190
OT: 1-5	1418
OT: 1-6	1511
OT: 1-7	1147
OT: 1-8	1213
OT: 1-9	1634
OT: 1-10	1248

MUESTRA PILOTO : Resistencia a la compresión f'c	
Identificación cilindro	f'c (14 días) PSI
OT: 1-11	1019
OT: 1-12	1369
OT: 1-13	1084
OT: 1-14	1550
OT: 1-15	1395
OT: 1-16	1487
OT: 1-17	1282
OT: 1-18	1132
OT: 1-19	1374
OT: 1-20	1495

Tabla 10. Resistencia a la compresión (14 días). Concreto modificado Tipo I
(sin finos) relación a/c = 0.34.

3.1.5 Cálculo del tamaño muestral. A partir de los ensayos realizados a la muestra piloto y datos recogidos se procede a realizar el cálculo del tamaño muestral. Para determinar este tamaño se tomara como variables la resistencia a la compresión y el coeficiente de permeabilidad “K”.

• **PARÁMETROS ESTADÍSTICOS¹⁸**

A partir de los ensayos realizados sobre las muestras se procede a realizar el tratamiento de datos estadísticamente con el fin de determinar el tamaño de la muestra definitiva.

Para calcular el tamaño de la muestra se debe distinguir entre **poblaciones infinitas** (de tamaño muy grande, indefinido, cuyo tamaño exacto se desconoce) y **poblaciones finitas** (tamaño más reducido y que se conoce).

TAMAÑO MUESTRAL PARA POBLACIONES INFINITAS

Para extrapolar poblaciones muy grandes se utiliza la siguiente ecuación para obtener el tamaño de la muestra:

$$n = \frac{Z^2 pq}{e^2} \dots \dots \dots \text{Ec. 35}$$

Dónde:

Z: Valor de Z correspondiente al nivel de confianza.

Un nivel de confianza del 95% (también lo expresan así: $\alpha = 0.05$) corresponde a $Z = 1.96$ sigmas o errores típicos; $Z = 2$ (dos sigmas) corresponde a un 95.5% (aproximadamente $\alpha = 0.045$).

¹⁸ MORALES Pedro. (2012).TAMAÑO NECESARIO DE LA MUESTRA: ¿Cuántos sujetos necesitamos?.

Con $Z = 2.57$ el nivel de confianza sube al 99% (es decir se equivocaría una vez por cada 100), pero como aumenta el numerador aumenta el cociente, que es N , y por lo tanto hará falta más sujetos (implica más trabajo y lo más importante aumenta más el costo).

pq: Varianza de la población.

Dónde:

p = proporción de respuestas en una categoría (*Síes*, respuestas correctas).

q = proporción de respuesta en la otra categoría (*Noes*, *ceros*).

La varianza de la población se desconoce, se asume la *varianza mayor posible* porque a mayor varianza hará falta una muestra mayor. En las fichas técnicas de la mayoría de las encuestas indican que la muestra ha sido escogida partiendo de la hipótesis de que $p = q = 0.50$.

El suponer que **p = q** quiere decir que para escoger la muestra se pone la hipótesis de que en la población hay una máxima diversidad posible: un 50% va a decir que *sí* y el otro 50% va decir que *no*, de esta manera, y por lo que respecta a la varianza de la población, no se corre el riesgo de quedarse corto en el número de sujetos. $pq = 0.25$.

Cuando se conoce la proporción de respuesta verdadera **p** se puede calcular **q**.

$q = (1 - p)$ **Ec. 36**

e: Error muestral. El error muestral se representa con la letra **e** (no es el único símbolo que se utiliza) significa *error* o *desviación posible* cuando se *extrapola* los resultados. Es el *margen de error* que se acepta. Si el margen de error es de 3.16% en la formula va $e = 0.0316$. Si *dice que sí* un 64.3% en la muestra, se entiende que *dice que sí* en la población entre (64.3% - 3.16%) y un (64.3% + 3.16%).

Las formulas anteriores se refieren a poblaciones grandes, de tamaño indefinido que no se puede conocer con exactitud. Más o menos a partir de los cien mil (100.000) sujetos ya se está hablando de ese tipo de población.

Para determinar el tamaño muestral definitivo para llevar a cabo los objetivos planteados dentro de este trabajo de grado, la determinación del tamaño muestral se lo realizó mediante las formulas planteadas para un **población infinita**.

Antes de iniciar a aplicar la fórmula es necesario calcular la **proporción verdadera “p”**. Para esto se tiene en cuenta el siguiente indicador que establece el código del ACI de las *estructuras* ACI 318, y las *especificaciones normativas para el concreto estructural*, ACI 301, los cuales reconocen que ocurrirán

resultados de baja resistencia. *El rango de dos o tres cilindros preparados a partir de la misma muestra raramente debe exceder del 8% o 9.5% del promedio de la resistencia, respectivamente*¹⁹.

Para este trabajo de investigación se tomaran los resultados de resistencia a la compresión que no difieran en un 10% por encima o debajo del valor de la resistencia promedio. Y este mismo rango se lo aplica a los resultados del coeficiente de permeabilidad.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN f'c				COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD "K"			
Relación a/c	RESISTENCIA PROMEDIO	%	Edad	Relación a/c	Promedio coeficiente de permeabilidad	%	Edad
0,34	1333	100%	14 días	0,34	6	100%	14 días
IDENTIFICACIÓN CILINDRO	RESISTENCIA (PSI)	%	Diferencia	IDENTIFICACIÓN CILINDRO	Coeficiente de permeabilidad (cm/seg)	%	Diferencia
OT: 1-1	1174	88%	-11,90%	OT: 1-1	6,6	110%	10%
OT: 1-2	1552	116%	16,40%	OT: 1-2	5,79	96%	-4%
OT: 1-3	1392	104%	4,40%	OT: 1-3	6,6	110%	10%
OT: 1-4	1190	89%	-10,70%	OT: 1-4	6,17	103%	3%
OT: 1-5	1418	106%	6,30%	OT: 1-5	6,6	110%	10%
OT: 1-6	1511	113%	13,30%	OT: 1-6	5,82	97%	-3%
OT: 1-7	1147	86%	-14,00%	OT: 1-7	5,99	100%	0%
OT: 1-8	1213	91%	-9,00%	OT: 1-8	6,6	110%	10%
OT: 1-9	1634	123%	22,50%	OT: 1-9	5,38	90%	-10%
OT: 1-10	1248	94%	-6,40%	OT: 1-10	5,81	97%	-3%
OT: 1-11	1019	76%	-23,60%	OT: 1-11	5,83	97%	-3%
OT: 1-12	1369	103%	2,70%	OT: 1-12	5,37	89%	-11%
OT: 1-13	1084	81%	-18,70%	OT: 1-13	5,79	96%	-4%
OT: 1-14	1550	116%	16,20%	OT: 1-14	6,69	111%	11%
OT: 1-15	1395	105%	4,60%	OT: 1-15	5,98	100%	0%
OT: 1-16	1487	112%	11,50%	OT: 1-16	5,99	100%	0%
OT: 1-17	1282	96%	-3,80%	OT: 1-17	6,29	105%	5%
OT: 1-18	1132	85%	-15,10%	OT: 1-18	5,4	90%	-10%
OT: 1-19	1374	103%	3,10%	OT: 1-19	5,4	90%	-10%
OT: 1-20	1495	112%	12,10%	OT: 1-20	6	100%	0%

Tabla 11. Número de muestras dentro del rango, para resistencia a la compresión y permeabilidad, concreto modificado Tipo I (sin finos).

VARIABLE	TAMAÑO MUESTRA PILOTO	MUESTRAS DENTRO DEL RANGO	% DE RESPUESTA
Resistencia	20	8	0,4
Permeabilidad	20	11	0,55

Tabla 12. Porcentaje de respuesta.

• **Calculo de la media de dos proporciones:**

$$p = \frac{p_1 + p_2}{2} \dots \dots \dots \text{Ec. 37}$$

Proporción verdadera **p = 0.48**

¹⁹ Concreto en la obra. PROBLEMAS, CAUSA Y SOLUCIONES. Baja resistencia en los resultados de ensaye de cilindros de concreto. 2006.

Como resulta imposible producir un concreto completamente homogéneo dadas las diferentes causas de variación en sus propiedades se determina un valor de Z (seguridad o nivel de confianza con el que se desea trabajar) teniendo en cuenta la *Tabla 13*.

<i>Porcentajes de pruebas que caen dentro de los límites $X \pm t\sigma$</i>	<i>Probabilidad de caigan por debajo del límite inferior</i>	<i>t</i>
40	3 en 10	0,52
50	2,5 en 10	0,67
60	2 en 10	0,84
68,27	1 en 6,3	1
70	1,5 en 10	1,04
80	1 en 10	1,28
90	1 en 20	1,65
95	1 en 40	1,96
95,45	1 en 44	2
98	1 en 100	2,33
99	1 en 200	2,58
99,73	1 en 741	3

Tabla 13. Valores de Z (nivel de confianza)²⁰.

Reemplazando valores en la *Ec.35*. Tamaño de muestra población infinita.

Porcentajes de pruebas que caen dentro de los límites $X \pm t\sigma$	Z	80%
Seguridad	t	1,28
Proporción verdadera	p	0,48
Complemento de p	q	0,53
Error de muestra	e	0,25
<i>Tamaño muestral</i>	n	7

Tabla 14. Cálculo tamaño de la muestra definitiva concreto modificado Tipo I.

3.2 CONCRETO MODIFICADO TIPO II (CON FINOS)

Se precisa realizar una muestra piloto a partir de una población de 20 especímenes para una relación a/c = 0.34, para analizar estadísticamente y así determinar el número de unidades de muestreo que van a constituir la muestra definitiva para cada relación agua/cemento, para este tipo de concreto.

Los datos y procedimiento matemático de dosificación de diseño de mezcla de la muestra piloto para una relación agua/cemento de 0.34, se encuentra registrado en el *ANEXO C*.

3.2.1 Estimación del porcentaje del contenido de vacíos. El procedimiento para determinar el contenido de vacíos es el mismo que se realiza para el CONCRETO

²⁰ SÁNCHEZ DE GUZMÁN Diego. (1996). TECNOLOGÍA DEL CONCRETO Y DEL MORTERO, p. 199.

MODIFICADO TIPO I (Sin finos), procedimiento que se encuentra detallado en la sección 3.1.2 del presente documento.

- **Resultados: % de vacíos muestra piloto:**

El porcentaje de vacíos de la muestra piloto para el CONCRETO MODIFICADO TIPO II (Con finos) se encuentra en un promedio de 10.40%. Para observar con más detalle los resultados del ensayo ver en *ANEXO C – Muestra piloto: Resultados % de vacíos CONCRETO MODIFICADO TIPO II (Con finos)*.

3.2.2 Cálculo coeficiente de permeabilidad “K”. El procedimiento de ensayo para obtener el coeficiente de permeabilidad de este tipo de concreto es el mismo procedimiento utilizado para el CONCRETO MODIFICADO TIPO I (Sin finos) referido en la Sección 6.1.3 del presente documento. Los tiempos registrados para cada muestra para este ensayo se encuentran en el *ANEXO C – Registro de tiempos y tiempo promedio, ensayo permeabilidad*.

Para el cálculo del coeficiente de permeabilidad (K) se obtiene a partir de la Ecuación 34. Por lo tanto, teniendo en cuenta los siguientes datos, se procede a calcular el coeficiente de permeabilidad para cada muestra. A partir de los datos registrados en la *Tabla 10. (Información permeámetro y muestra)* y reemplazando en la Ecuación 33, se determina el volumen de agua de acuerdo a la lectura que se realice en el permeámetro. Los valores de carga hidráulica inicial **h1** y carga hidráulica final **h2**, son tomados los de las alturas de 15 cm y 5 cm, respectivamente.

El coeficiente de permeabilidad “K” promedio que se obtiene para esta muestra piloto es de 2.1 cm/s. Para observar con mayor detalle los datos obtenidos de este ensayo dirigirse al *ANEXO C – Coeficiente de permeabilidad “K”, Muestra piloto, CONCRETO MODIFICADO TIPO II (Con finos). Relación a/c = 0.34*.

3.2.3 Evaluación resistencia a la compresión. Para la resistencia a la compresión, los 20 cilindros fueron fallados a la edad de 14 días. Los registros referentes se encuentran en el *ANEXO C*. A continuación, se presenta un resumen de las resistencias a la compresión **f’c**, que se obtuvo para cada muestra.

MUESTRA PILOTO : Resistencia a la compresión f’c		MUESTRA PILOTO : Resistencia a la compresión f’c	
Identificación cilindro	f’c (14 días) PSI	Identificación cilindro	f’c (14 días) PSI
OT: 2-1	2040	OT: 2-4	1976
OT: 2-2	2557	OT: 2-5	2300
OT: 2-3	2274	OT: 2-6	1981

Tabla 15. Resistencia a la compresión (14 días). Muestra piloto, concreto modificado Tipo II (con finos). Relación a/c = 0.34.

Continuación - **Tabla 15.** Resistencia a la compresión (14 días). Muestra piloto, concreto modificado Tipo II (con finos). Relación a/c = 0.34.

MUESTRA PILOTO : Resistencia a la compresión f'_c		MUESTRA PILOTO : Resistencia a la compresión f'_c	
Identificación cilindro	f'_c (14 días) PSI	Identificación cilindro	f'_c (14 días) PSI
OT: 2-7	2382	OT: 2-14	1927
OT: 2-8	2298	OT: 2-15	2278
OT: 2-9	2553	OT: 2-16	2476
OT: 2-10	2131	OT: 2-17	2165
OT: 2-11	2331	OT: 2-18	1997
OT: 2-12	2252	OT: 2-19	2257
OT: 2-13	1987	OT: 2-20	2539

3.2.4 Cálculo tamaño muestral. Para la determinación del tamaño de muestra definitivo para el CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos), se tiene en cuenta los mismos criterios, conceptos de los parámetros estadísticos y lineamientos especificados a tener en cuenta en la Sección 3.1.5 del presente documento referente al tamaño de muestra para el CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos).

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN				COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD K			
RELACIÓN a/c	RESISTENCIA PROMEDIO	%	Edad	RELACIÓN a/c	Promedio coef. permeabilidad	%	Edad
0,34	2235	100%	14 días	0,34	2,1	100%	14 días
IDENTIFICACIÓN CILINDRO	RESISTENCIA	%	Diferencia	IDENTIFICACIÓN CILINDRO	Coeficiente de permeabilidad	%	Diferencia
OT: 2-1	2040	91%	-8,70%	OT: 2-1	1,72	82%	-18%
OT: 2-2	2557	114%	14,40%	OT: 2-2	1,97	94%	-6%
OT: 2-3	2274	102%	1,80%	OT: 2-3	1,72	82%	-18%
OT: 2-4	1976	88%	-11,60%	OT: 2-4	1,72	82%	-18%
OT: 2-5	2300	103%	2,90%	OT: 2-5	1,72	82%	-18%
OT: 2-6	1981	89%	-11,40%	OT: 2-6	2,52	120%	20%
OT: 2-7	2382	107%	6,60%	OT: 2-7	2,02	96%	-4%
OT: 2-8	2298	103%	2,80%	OT: 2-8	2,12	101%	1%
OT: 2-9	2553	114%	14,20%	OT: 2-9	1,83	87%	-13%
OT: 2-10	2131	95%	-4,70%	OT: 2-10	2,52	120%	20%
OT: 2-11	2331	104%	4,30%	OT: 2-11	1,97	94%	-6%
OT: 2-12	2252	101%	0,70%	OT: 2-12	1,97	94%	-6%
OT: 2-13	1987	89%	-11,10%	OT: 2-13	2,52	120%	20%
OT: 2-14	1927	86%	-13,80%	OT: 2-14	1,97	94%	-6%
OT: 2-15	2278	102%	1,90%	OT: 2-15	2,51	120%	20%
OT: 2-16	2476	111%	10,80%	OT: 2-16	2,52	120%	20%
OT: 2-17	2165	97%	-3,20%	OT: 2-17	2,21	105%	5%
OT: 2-18	1997	89%	-10,70%	OT: 2-18	2,52	120%	20%
OT: 2-19	2257	101%	1,00%	OT: 2-19	1,97	94%	-6%
OT: 2-20	2539	114%	13,60%	OT: 2-20	1,97	94%	-6%

Tabla 16. Número de muestras que están dentro del rango, para resistencia a la compresión y permeabilidad, concreto modificado Tipo II (con finos).

VARIABLE	TAMAÑO MUESTRA PILOTO	MUESTRAS DENTRO DEL RANGO	% DE RESPUESTA
Resistencia	20	11	0,55
Permeabilidad	20	9	0,45

Tabla 17. Porcentaje de respuesta.

- **Cálculo de la media de dos proporciones:**

Calculando mediante la Ec.38.

$$p = \frac{p_1 + p_2}{2}$$

Proporción verdadera **p = 0.5**

Reemplazando valores en la Ec.35. Tamaño de muestra población infinita y teniendo en cuenta los valores de la *Tabla 14* (valores de Z) para determinar el nivel de confianza o seguridad con el que se desea trabajar. Se procede a calcular el tamaño de muestra definitivo.

Porcentajes de pruebas que caen dentro de los límites $\bar{X} \pm t\sigma$	z	80%
Seguridad	t	1,28
Proporción verdadera	p	0,50
Complemento de p	q	0,50
Error de muestra	e	0,25
<i>Tamaño muestral</i>	n	7

Tabla 18. Cálculo tamaño de la muestra definitiva, concreto modificado Tipo II (con finos).

4. DISEÑO DE MEZCLAS

El diseño de mezcla del concreto permeable dentro de este trabajo de investigación consta de dos grupos como se ha venido mencionando a lo largo del documento y descripción de procesos realizados, que es el CONCRETO MODIFICADO TIPO I (Sin finos) y CONCRETO MODIFICADO TIPO II (Con finos). Dentro de cada tipo de concreto permeable se encuentran subgrupos de mezclas condicionadas bajo cinco (5) relaciones agua/cemento 0.38, 0.36, 0.34, 0.32 y 0.30; explícitamente diseñadas para evaluar el efecto que produce cambiar las proporciones en cuanto a cantidad de cemento y agua, sobre la resistencia a la compresión y coeficiente de permeabilidad. De acuerdo al análisis, procedimiento y cálculos efectuados para determinar el tamaño de muestra, se establece que por cada relación agua/cemento se elabora 14 cilindros distribuidos de la siguiente forma: 7 cilindros para prueba de resistencia a la compresión a 14 días y los otros 7 cilindros para pruebas de estimación del porcentaje de vacíos, determinación del coeficiente de permeabilidad y resistencia a la compresión a 28 días.

Los tiempos referentes al ensayo de permeabilidad, procesos y cálculo de la resistencia a la compresión de cada una de las mezclas se encuentran registrados en el *ANEXO D*.

4.1 CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos)

Los datos, procedimiento y resultados obtenidos para la relación agua/cemento de 0.38, 0.36, 0.34, 0.32, 0.30 se encuentran consignados en el *ANEXO D*.

Ver *Tabla 19* el resumen de los resultados obtenidos para las dosificaciones de relación agua/cemento analizadas en esta investigación.

4.2 CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos)

Los datos, procedimiento y resultados obtenidos para la relación agua/cemento de 0.38, 0.36, 0.34, 0.32, 0.30 se encuentran consignados en el *ANEXO D*. En la *Tabla 20* se encuentra el resumen de los resultados obtenidos para las dosificaciones de relación agua/cemento analizadas en esta investigación. Para la relación a/c de 0.38 a 0.36 se observa un cambio de asentamiento, esto como resultado del efecto de la cantidad de agua sobre la estabilidad de la mezcla.

RESUMEN DATOS: CONCRETO MODIFICADO TIPO I (Sin finos)

CONCRETO MODIFICADO TIPO	Relación a/c	Asentamiento in	Cemento Kg/m ³	Agregado grueso Kg/m ³	Agregado fino Kg/m ³	Agua Kg/m ³	Volumen pasta de cemento m ³	% de vacíos medidos	Coeficiente de permeabilidad cm/s	Resistencia compresión promedio (PSI)	
										14 días	28 días
TIPO I	0,30	0	422	1356	0	126	0,27	23,4%	8,4	1434	1736
	0,32	5 ¼	409	1356	0	131	0,27	22,2%	6,7	1540	1764
	0,34	7	396	1356	0	135	0,27	22,2%	6,6	1376	1741
	0,36	7	385	1356	0	139	0,27	21,7%	5,4	1197	1546
	0,38	7 ¼	374	1356	0	142	0,27	22,5%	5,9	1168	1349

Tabla 19. Resumen datos: concreto modificado Tipo I (sin finos).

RESUMEN DATOS: CONCRETO MODIFICADO TIPO II (Con finos)

CONCRETO MODIFICADO TIPO	Relación a/c	Asentamiento in	Cemento Kg/m ³	Agregado grueso Kg/m ³	Agregado fino Kg/m ³	Agua Kg/m ³	Volumen pasta de cemento m ³	% de vacíos medidos	Coeficiente de permeabilidad cm/s	Resistencia compresión promedio (PSI)	
										14 días	28 días
TIPO II	0,30	0	375	830	409	113	0,24	10,35%	2,85	2505	2642
	0,32	0	364	830	409	116	0,24	10,31%	2,54	2376	2602
	0,34	0	353	830	409	120	0,24	10,2%	2,05	2240	2591
	0,36	0	342	830	409	123	0,24	10,1%	1,87	2144	2499
	0,38	6	333	830	409	126	0,24	10,0%	1,78	1843	2131

Tabla 20. Resumen datos: concreto modificado Tipo II (con finos).

5. PROCESAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

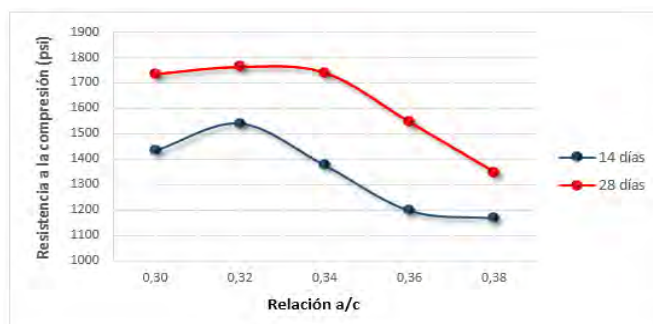
Con el fin de establecer los posibles efectos de las variables como son resistencia a la compresión, coeficiente de permeabilidad “k”, porcentaje de vacíos, relación agua/cemento sobre las mezclas de CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos) y CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos), se estableció en un principio dentro de la metodología que este análisis se lo llevaría a cabo mediante la herramienta estadística *análisis de varianza (ANOVA) de 2 vías*; para lo cual se procedió a filtrar los datos obtenidos de laboratorio para cada una de las muestras de los concretos modificados en estudio.

Se obtuvo como resultado que no existe diferencia significativa entre las variables analizadas, es decir que los resultados a analizar no tienen repercusión estadísticamente significativa en la valoración de las variables, llevando así directamente a una hipótesis nula que para este caso niega que haya diferencia entre los grupos que se compararon. Pero de acuerdo a la evidencia muestral sugiere que esta hipótesis nula es incorrecta.

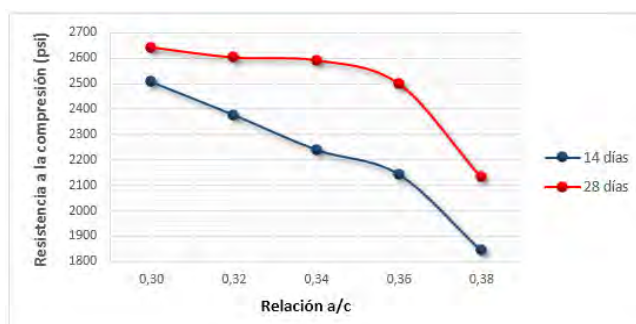
Este error se debe a que cuando se analizó y calculó el tamaño de la muestra para esta investigación, éste número de especímenes para la aplicación correcta de esta herramienta estadística resultó ser insuficiente y a esto se le suma que el rango de la relación agua/cemento analizadas comprenden valores muy inmediatos o contiguos (0.38, 0.36, 0.34, 0.32 y 0.30), para lo cual esta herramienta estadística en este caso no alcanza a detectar los cambios o diferencias que puedan generar las variables analizadas y de esta forma tomando a las mezclas como si se tratase de una misma mezcla. Por lo tanto, mediante esta herramienta estadística no se logra obtener conclusiones sobre el comportamiento de las variables para los concretos modificados Tipo I (sin finos) y Tipo II (con finos).

En vista de lo anterior se procede a realizar un procesamiento de datos y análisis de resultados mediante graficas que ofrece el programa Excel, donde se puede apreciar el efecto de las variables para cada tipo de concreto modificado.

5.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN: EDAD 14 Y 28 DÍAS



Gráfica 6. Concreto modificado tipo I: relación a/c y f'_c (edad 14 y 28 días).



Gráfica 7. Concreto modificado Tipo II: relación a/c y f'_c (edad 14 y 28 días).

En las *gráficas 6 y 7* se observa, para los dos tipos de concreto permeable estudiados con arena y sin arena las curvas de desarrollo de la resistencia a la compresión hasta la edad de 28 días, en general presentan un comportamiento similar en cuanto al desarrollo de la resistencia a la compresión en el tiempo, conforme con lo que sucede en un concreto convencional.

CONCRETO MODIFICADO		
Edad (días)	TIPO I (Sin finos)	TIPO II (Con finos)
	% de resistencia promedio alcanzada	
14	83	89
28	100	100

Tabla 21. Porcentaje de resistencia a la compresión promedio alcanzado.

En promedio la mezcla de CONCRETO MODIFICADO TIPO I (Sin finos) alcanza una resistencia a la compresión de un 83% a los 14 días y en el CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos) alcanza una resistencia a la compresión de un 89% a los 14 días.

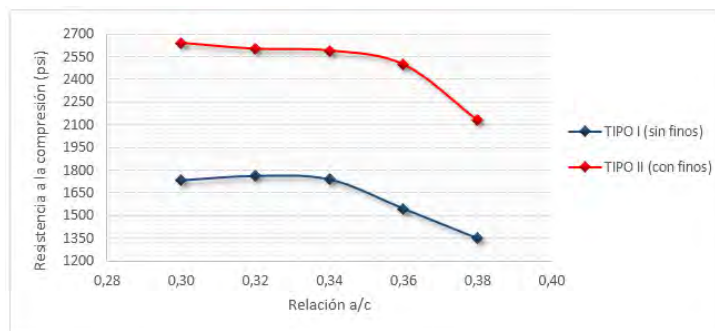
5.2 PORCENTAJE DE VACÍOS



Gráfica 8. Concreto modificado Tipo I y Tipo II. Porcentaje promedio de vacíos.

La *gráfica 8*, muestra el porcentaje de vacíos promedio medidos para cada tipo de concreto permeable estudiado. De acuerdo con el informe presentado por el comité ACI 522R-10, indica que el porcentaje de vacíos es fuertemente dependiente de la gradación del agregado, del contenido de material cementante, de la relación agua/cemento y del esfuerzo de compactación. La mezcla de concreto permeable TIPO I (sin finos) presenta un porcentaje de vacíos promedio de 22.4%, para este estudio el porcentaje de vacíos promedio que presenta un menor valor de 10.18% es en el concreto permeable TIPO II (con finos). Los resultados indican que el porcentaje de vacíos depende del tamaño de los agregados, los agregados más pequeños tienden a acumular más eficientemente el rendimiento reduciendo los espacios vacíos.

5.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DÍAS

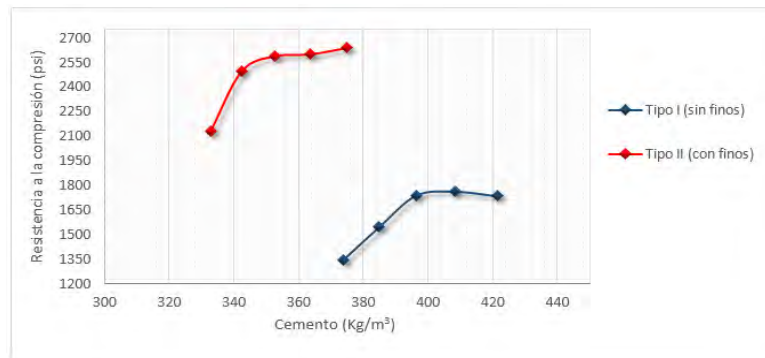


Gráfica 9. Concreto modificado Tipo I y Tipo II, relación a/c y $f'c$ (28 días).

En la *gráfica 9* se observa, la relación entre la resistencia a la compresión (28 días) entre el CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos) y CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos). En el caso de la resistencia a la compresión, la mezcla de concreto permeable TIPO II presenta valores mayores que en la mezcla de concreto permeable TIPO I. Este comportamiento es el esperado, puesto que la mezcla de concreto TIPO II presenta un menor porcentaje de vacíos porque dispone de una dotación de arena que también se encuentra condicionada en su granulometría, la adición de este agregado fino ayuda a que se presente una

mayor cantidad de superficies de contacto de la matriz lo cual genera mayor trabazón dando como resultado un mejoramiento en la resistencia a la compresión.

5.4 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y CONTENIDO DE CEMENTO

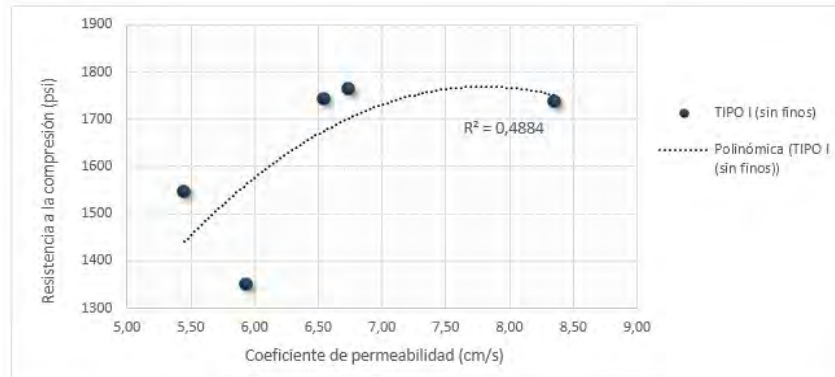


Gráfica 10. Concreto modificado Tipo I y concreto modificado Tipo II, relación entre resistencia a la compresión (28 días) y contenido de cemento.

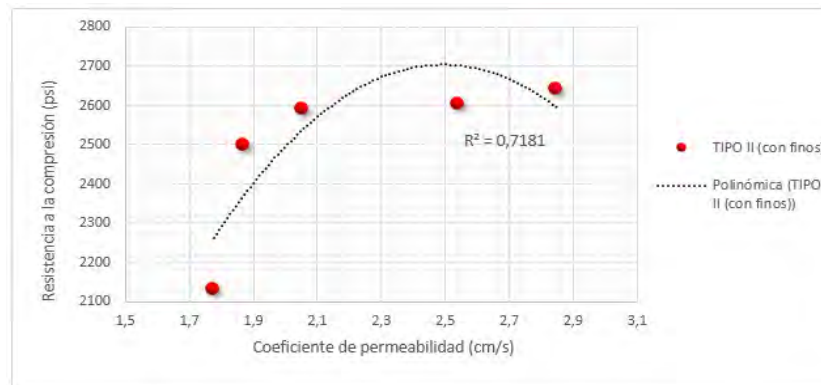
En la *gráfica 10*, se muestra la relación entre la resistencia a la compresión (28 días) y el contenido de cemento para cada tipo de concreto permeable. A medida que se aumenta la cantidad de cemento la resistencia a la compresión se incrementa entre la relación a/c de 0.38 a 0.34 para los dos tipos de concreto, pero posteriormente en la relación a/c de 0.34 y 0.32 la resistencia a la compresión tiende a estabilizarse.

A partir de la *gráfica 10*, se puede apreciar en el CONCRETO MODIFICADO TIPO II (Con finos) que requiere de menor cantidad de cemento en comparación con el CONCRETO MODIFICADO TIPO I (Sin finos). Esto se debe a que en el concreto permeable TIPO I el esqueleto granular presenta un mayor porcentaje de vacíos, lo cual hace que se requiera de una mayor cantidad de pasta de cemento, mientras que en el concreto permeable TIPO II la combinación de los dos agregados (fino y grueso) hace que se presente un menor porcentaje de vacíos y por ende requiere de menor cantidad de pasta de cemento.

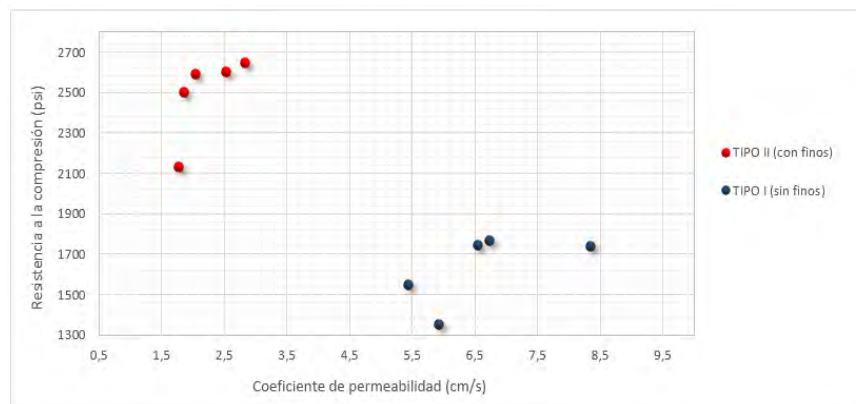
5.5 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD “K”



Gráfica 11. Concreto modificado Tipo I, relación entre resistencia a la compresión (28 días) y coeficiente de permeabilidad “K”.



Gráfica 12. Concreto modificado Tipo II, relación entre resistencia a la compresión (28 días) y coeficiente de permeabilidad “K”.

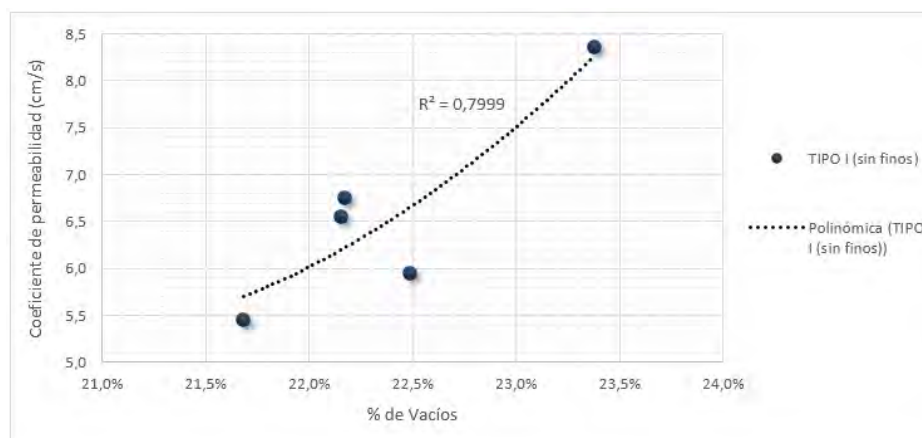


Gráfica 13. Relación entre resistencia a la compresión (28 días) y coeficiente de permeabilidad “K” entre concreto modificado Tipo I y Tipo II.

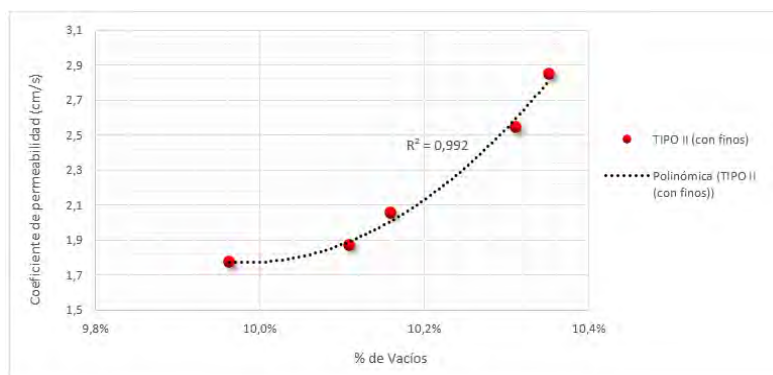
En las *gráficas 11 y 12*, se muestra la relación entre la resistencia a la compresión y coeficiente de permeabilidad. Cuando se analiza la gráfica independientemente para cada tipo de concreto permeable, se aprecia que entre la relación a/c de 0.36 a 0.32 para el concreto permeable Tipo I (sin finos) y hasta la relación a/c de 0.30 para el concreto permeable Tipo II (con finos), la resistencia a la compresión aumenta y de igual forma el coeficiente de permeabilidad a medida que se disminuye la relación a/c. Cuando se presenta una mayor relación agua/cemento se produce un escurrimiento de la pasta hacia la parte inferior del espécimen, colmatando u obstruyendo algunas zonas y por lo tanto ocasionando en la base del espécimen baja permeabilidad y dejando la parte superior de éste desprotegida dando lugar a una baja resistencia. Al disminuir la relación agua/cemento, la pasta es más estable como producto de una mayor cantidad de cemento y menor cantidad de agua va mejorando su propiedad cohesiva y hay mejor recubrimiento de los agregados; para el caso del concreto permeable Tipo I (sin finos) en la relación a/c de 0.30 se observa que la resistencia a la compresión decae por la mayor cantidad de vacíos que se formaron lo cual ya desestabiliza su estructura.

Más sin embargo, en la *gráfica 13* cuando se compara los dos tipos de concreto permeable TIPO I (sin finos) y TIPO II (con finos), se observa que a mayor resistencia a la compresión el coeficiente de permeabilidad disminuye, esto ocasionado por el menor contenido de porcentaje de vacíos que se presenta en el concreto permeable TIPO II con respecto al concreto permeable TIPO I.

5.6 RELACIÓN ENTRE COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD Y PORCENTAJE DE VACÍOS



Gráfica 14. Concreto modificado Tipo I, relación entre coeficiente de permeabilidad “K” y porcentaje de vacíos.

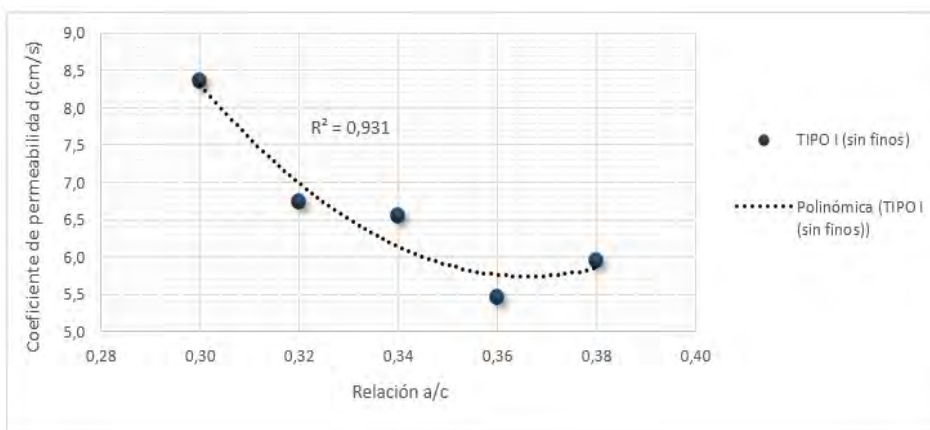


Gráfica 15. Concreto modificado Tipo II, relación entre coeficiente de permeabilidad “K” y porcentaje de vacíos.

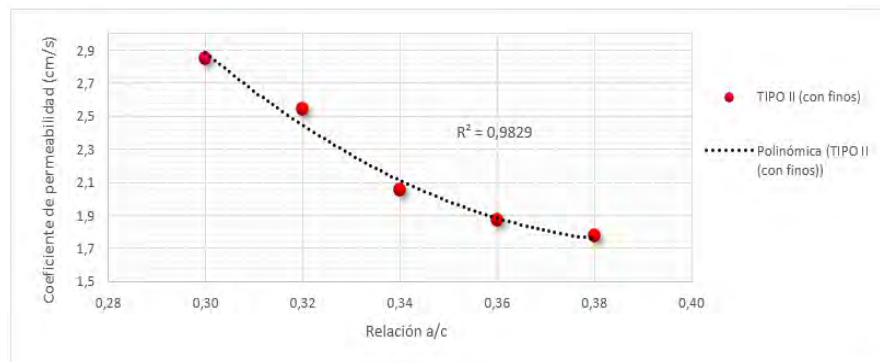
Las *gráficas 14 y 15* muestran, la relación entre el coeficiente de permeabilidad “K” y el porcentaje de vacíos, evidentemente se aprecia que el coeficiente de permeabilidad ha mejorado en función del porcentaje de vacíos, tanto para el concreto permeable TIPO I (sin finos) y TIPO II (con finos).

El CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos), presenta mayor porcentaje de vacíos y por lo tanto mayor coeficiente de permeabilidad en comparación con el CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos), esto como producto de su condición en el esqueleto granular o matriz que presenta cada tipo de concreto permeable estudiado.

5.7 RELACIÓN ENTRE COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD Y RELACIÓN AGUA/CEMENTO



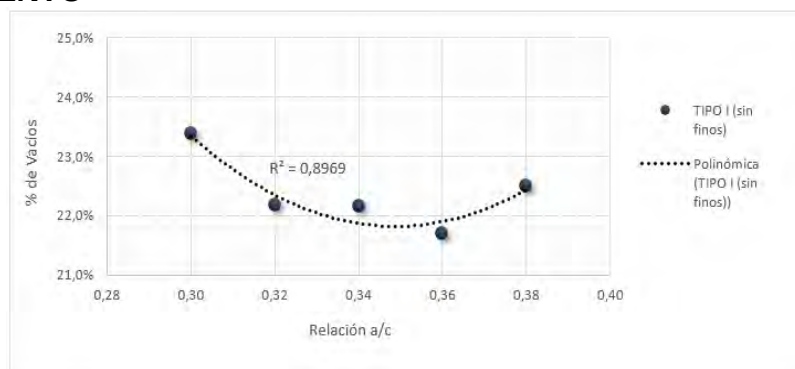
Gráfica 16. Concreto modificado Tipo I, relación entre coeficiente de permeabilidad y relación agua/cemento.



Gráfica 17. Concreto modificado Tipo II, relación entre coeficiente de permeabilidad y relación agua/cemento.

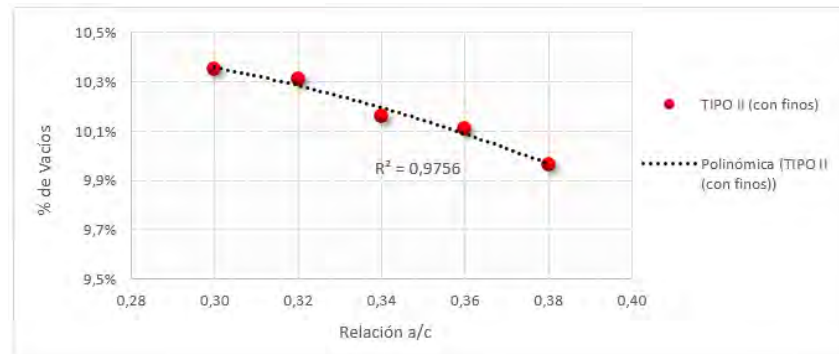
En las *gráficas 16 y 17*, se muestra la relación entre el coeficiente de permeabilidad y la relación agua/cemento. Conforme disminuye la relación agua/cemento aumenta el coeficiente de permeabilidad esta tendencia se observa tanto el concreto permeable TIPO I (Sin finos) y TIPO II (Con finos), esta condición se presenta porque al aumentar la relación agua/cemento se produce un efecto de escurrimiento de la pasta alterando así la distribución de vacíos en el concreto permeable generando la obstrucción de algunos poros y aumentando la cantidad de vacíos no conectados. Pero como se ha mencionado anteriormente la permeabilidad del concreto estudiado TIPO I y TIPO II no se ve significativamente alterada puesto que las relaciones agua/cemento escogidas en esta investigación van de 0.30 a 0.38 y con base en el informe presentado por el comité del ACI 522R-10, indica que de acuerdo a experiencias se ha demostrado que la relación agua/cemento de 0.25 a 0.45 proveen un buen revestimiento del agregado y presentan una pasta de cemento estable.

5.8 RELACIÓN ENTRE PORCENTAJE DE VACÍOS Y RELACIÓN AGUA/CEMENTO



Gráfica 18. Concreto modificado Tipo I, relación entre porcentaje de vacíos y relación agua/cemento.

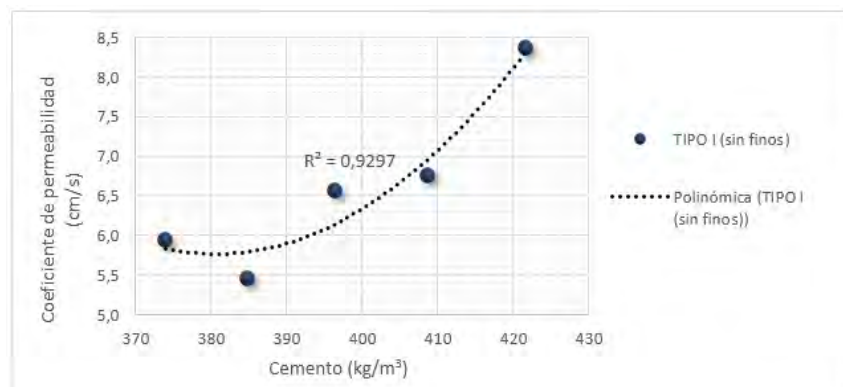
En la *gráfica 18*, se muestra la relación entre el porcentaje de vacíos y la relación agua/cemento para el CONCRETO MODIFICADO TIPO I (Sin finos). Se puede observar que tanto para la relación agua/cemento baja y alta (0.30 y 0.38) presentan un mayor porcentaje de vacíos y como se puede apreciar en la *gráfica 6*, estas dos relaciones agua/cemento presentan una baja resistencia a la compresión en comparación con las del nivel intermedio como resultado del incremento en el porcentaje de vacíos.



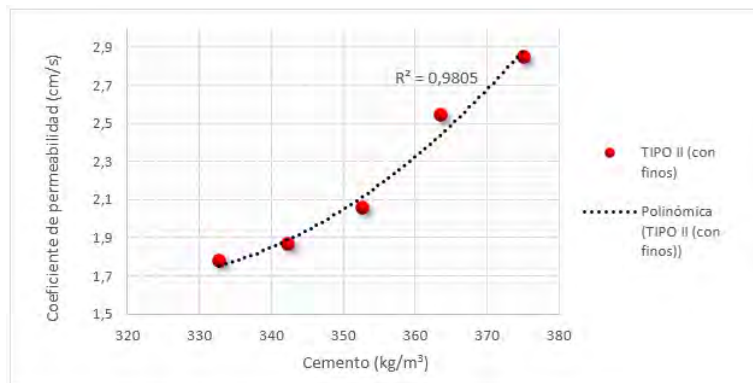
Gráfica 19. Concreto modificado Tipo II, relación entre porcentaje de vacíos y relación agua/cemento.

En la *gráfica 19*, se observa la relación entre el porcentaje de vacíos y relación agua/cemento para CONCRETO MODIFICADO TIPO II (Con finos), en este tipo de concreto permeable se observa un comportamiento más estable del porcentaje de vacíos en comparación con el CONCRETO MODIFICADO TIPO I (Sin finos). Se aprecia un leve incremento del porcentaje de vacíos conforme la relación agua/cemento disminuye.

5.9 RELACIÓN ENTRE EL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD Y CONTENIDO DE CEMENTO



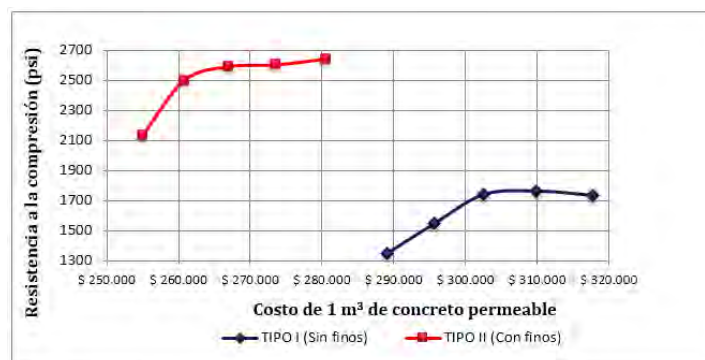
Gráfica 20. Concreto modificado Tipo I, relación entre coeficiente de permeabilidad “K” y contenido de cemento.



Gráfica 21. Concreto modificado Tipo II, relación entre coeficiente de permeabilidad “K” y contenido de cemento.

En las *gráficas 20 y 21*, se muestra la relación entre el coeficiente de permeabilidad “K” y contenido de cemento para CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos) y CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos). Se aprecia un incremento del coeficiente de permeabilidad a medida que aumenta el contenido de cemento, tanto para el concreto permeable TIPO I (sin finos) y TIPO II (con finos). Este fenómeno se presenta porque a medida que se disminuye la relación agua/cemento presenta una menor cantidad de agua logrando así una mejor estabilidad de la pasta de cemento, poco fluida, favoreciendo la formación de vacíos conectados y consecuentemente presentando un aumento en el coeficiente de permeabilidad “K”.

5.10 RELACIÓN ENTRE COSTO DE 1 m³ DE CONCRETO PERMEABLE Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN²¹



Gráfica 22. Concreto modificado Tipo I y concreto modificado Tipo II, relación entre resistencia a la compresión (28 días) y costo de 1m³ de concreto permeable.

²¹ Cálculo del costo de 1m³ de concreto permeable modificado TIPO I (sin finos) y TIPO II (con finos), se encuentra establecido en el ANEXO E.

La *gráfica 22*, muestra la relación entre la resistencia a la compresión obtenida a los 28 días y el costo de 1 m³ de concreto permeable para CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos) y CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos). Se puede apreciar que el CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos) requiere de una menor inversión de dinero y alcanzando una mayor resistencia a la compresión en comparación con el CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos). Este efecto es el resultado del alto contenido de vacíos que presenta el CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos) generando como consecuencia la utilización de mayor cantidad de cemento y a su vez el incremento en el costo en cuanto a la elaboración de este tipo de concreto permeable analizado en esta investigación.

6. CONCLUSIONES

Durante el proceso y tiempo que se llevó a cabo este trabajo de grado se realizó una revisión bibliográfica existente sobre concreto permeable a nivel nacional e internacional hasta la fecha, y se concluye que ya es una realidad el interés en este tipo de concreto como una solución a urbanizaciones sustentables.

Dentro de los requisitos generales de diseño de un concreto permeable, de principio, no es una sola exigencia que se sitúe en primer lugar, puesto que junto a la resistencia, y con el mismo rango debe figurar la permeabilidad, dándose el caso, y esto es quizás lo más importante de que ambas propiedades son antagónicas, en el sentido de que la mejora de una de ellas se logra, generalmente, en detrimento de la otra. Todo esto conduce que para lograr un adecuado diseño de mezcla de concreto permeable no es el resultado de maximizar ninguna propiedad, si no el de conjugarlas, para alcanzar un determinado equilibrio.

Cuando se realiza el análisis entre resistencia a la compresión frente al coeficiente de permeabilidad independientemente para cada tipo de concreto modificado, gráficas 10 y 11, se observa entre la relación a/c de 0.36 a 0.32, que a medida que disminuye la relación agua/cemento hay a la vez un incremento en las variables resistencia a la compresión y coeficiente de permeabilidad, lo cual a primera vista va en contra de lo intuitivo, puesto que un material entre más poroso es menos resistente. No obstante, esta situación nos ayuda a comprender mejor como influye la cantidad de agua de mezclado sobre la permeabilidad, al tener una mayor relación a/c afecta la estabilidad de la pasta de cemento porque hace que sea más fluida y por acción de la gravedad ocasiona el escurrimiento de ésta y posterior obstrucción de los poros interconectados. A medida que se disminuye la relación agua/cemento se disminuye la cantidad de agua y se incrementa la cantidad de cemento, generando sobre la pasta una mayor estabilidad y por ende mejorar su propiedad cohesiva, lo cual hace que garantice un mayor recubrimiento del agregado en toda la sección del espécimen, mejorando los puentes de adherencia entre agregados y que los poros interconectados no sean obstruidos.

La resistencia a la compresión aumenta con el contenido de cemento siguiendo la misma tendencia que se presenta en un concreto convencional, asimismo cuando se realiza el análisis de resistencia a la compresión y coeficiente de permeabilidad del CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos) presenta una mejor resistencia a la compresión a la edad de 28 días alcanzando su máximo valor en la relación a/c de 0.30 de 2642 psi (18.2 MPa), frente al CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos) donde su máximo valor de resistencia a la compresión a la edad de 28

días se presenta en la relación a/c de 0.32 con un valor de 1764 psi (12.2 MPa); por lo tanto lleva a concluir que la resistencia a la compresión presenta cierta dependencia a mejorar con respecto a la adición de agregado fino y disminución de coeficiente de permeabilidad, como se indica en la gráfica 13.

En el CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos) el efecto de la combinación de agregado fino y agregado grueso, cada uno condicionado en su granulometría para garantizar que la permeabilidad no se vea afectada y con una proporción en peso de 67% de agregado grueso y 33% de agregado fino, presento resultados adecuados frente a la resistencia a la compresión con respecto a la del CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos) sin presentar un efecto negativo considerable en la permeabilidad.

A partir de los resultados obtenidos y de la experiencia, se logra observar que la mezcla de CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos) requiere de menor cantidad de cemento en comparación con la mezcla de CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos), por lo tanto el CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos) representa más costos debido a la cantidad de cemento que se emplea, y el desempeño observado en cuanto a la resistencia a la compresión resultante no justifica su empleo para pavimentos permeables con la granulometría empleada en esta investigación.

7. RECOMENDACIONES

Diseñar las mezclas del CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos) con una permeabilidad menor por medio de un ajuste granulométrico, aumentando un porcentaje mayor de participación de tamaño de partículas al que se utilizó, como puede ser del TN4 (porcentaje parcial retenido 4.94% utilizado en esta investigación) y de esta forma obtener mejores resultados frente a la resistencia a la compresión al disminuir el porcentaje de vacíos, dado que la granulometría del agregado grueso escogida para esta investigación presenta mejor comportamiento frente a la permeabilidad.

Utilizar una granulometría de agregado grueso que contenga un menor porcentaje de vacíos en estado compactado, pero, que no comprometa significativamente la permeabilidad, esto con el fin de disminuir la cantidad de cemento, puesto que se observó en el CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos) la utilización de mayor cantidad de cemento en comparación con el CONCRETO MODIFICADO TIPO II (con finos) y aun así persistió la dificultad en alcanzar valores elevados de la resistencia a la compresión.

Ejecutar ensayos adicionales como la determinación del módulo de rotura, porcentaje de desgaste y la exposición a la acción de sulfatos para hallar mayor justificación del empleo de este tipo de concreto.

Continuar en futuras investigaciones, un estudio que lleve a encontrar la expresión que permita correlacionar el módulo de rotura y la resistencia a la compresión para este tipo de concreto con materiales de la región.

Realizar un estudio de comparación entre los agregados de canto rodado y el agregado triturado, igualmente condicionados en su granulometría, de las fuentes que abastecen la región, con el fin de establecer qué forma de agregado es el más idóneo para este tipo de concreto.

Tomar un mayor número de relaciones a/c para apreciar mejor la incidencia sobre la resistencia a la compresión y la permeabilidad.

Incrementar el tamaño de las muestras para futuras investigaciones, con el fin de ser más precisos al estimar los parámetros o variables en estudio y así evitar como resultado en la parte estadística que no se encuentra diferencias significativas, cuando en realidad si existen, como sucedió en este caso al utilizar la herramienta estadística ANOVA, la cual no logro detectar diferencia o asociación por ser muy pequeñas entre las variables, conduciendo a una hipótesis nula (que no existe relación entre las variables) y que cualquier diferencia o

asociación puede ser estadísticamente significativa si se dispone del suficiente número de muestras.

Analizar en futuras investigaciones el efecto que causa la ausencia de cal en el proceso de curado para los especímenes de concreto, puesto que durante el proceso que se llevó a cabo en este estudio se observó que la ausencia de cal en el agua de un lote de cilindros, presentó lixiviación de hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , siendo más visible en los cilindros del CONCRETO MODIFICADO TIPO I (sin finos) para la relación agua/cemento 0.30 y 0.38. Se sabe que cuando el concreto presenta alta permeabilidad puede ser alcanzado por este fenómeno de lixiviación de hidróxido de calcio, provocando una reducción de la resistencia en la mayoría de los casos. Por lo tanto se considera importante realizar un análisis exhaustivo del proceso de curado especialmente del concreto permeable y así lograr estandarizar este proceso tanto para laboratorio como en obra, con el fin de reducir cualquier diferencia de resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI COMMITTEE 211.3R-02. Guide for selecting proportions for no-slump concrete. January 11 2002.

ACI COMMITTEE 522(2010). 522R-10. pervious concrete. Florida, Estados Unidos: ACI.

AGUADO Antonio, et al. Un material permeable y resistente – Aproximación al hormigón poroso. Universidad Politecnica de Cataluña.

AZAÑEDO Wiston., CHAVEZ Helard., MUÑOZ Richard. Tesis “Diseño de mezcla de concreto poroso con agregados de la cantera La Victoria, cemento portland Tipo I, con adición de tiras de plástico, y su aplicación en pavimentos rígidos, en la ciudad de Cajamarca”. Universidad Nacional de Cajamarca. Facultad de Ingeniería. Escuela Académico profesional de Ingeniería Civil. Cajamarca, Perú, 2007.

BOQUÉ Ricard., MAROTO Alicia. El análisis de la varianza (ANOVA), Comparación de múltiples poblaciones. Universidad Rovira i Virgili. Cataluña.

CASTRO Javier., De SOLMINIHAC Hernán. Pavimentos porosos de hormigón: Una opción para mitigar los efectos de aguas lluvias. En: Revista BIT, Junio de 2002, pág. 35-38.

CASTRO Javier., De SOLMINIHAC Hernán., VIDELA Carlos., FERNÁNDEZ Bonifacio. Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón. En: Revista de Ingeniería y Construcción. Vol. 24 – Nº3, Diciembre de 2009- pág. 271-284.

FERGUSON Bruce K. Pavimentos permeables. Universidad de Georgia de la Escuela de Diseño Ambiental. 2005.

FERNÁNDEZ Bonifacio. Uso de pavimentos permeables. Pontificia Universidad Católica de Chile PUC. Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería hidráulica y ambiental. Santiago, Chile. Octubre de 2003.

FERNÁNDEZ Bonifacio. Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos. Guía de diseño. Ministerio de vivienda y urbanismo (MINVU). Pontificia Universidad Católica de Chile PUC. Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería hidráulica y ambiental. Santiago, Chile. Santiago, Chile, Noviembre de 1996.

FCPA, 1993 – Portland cement pervious pavement manual. Florida Concrete and Products Association Inc.

GUZMÁN Lientur. Guía de laboratorio de materiales. Universidad Santiago de Chile. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería en obras civiles. 2008.
IMCYC, Instituto Mexicano del cemento y del concreto. El concreto en la obra – Problemas, causas y soluciones. Gabinetes, cuartos húmedos y tanques de almacenamiento. Sección Coleccionable. No.11, Julio 2008.

KOSMATKA Steven H., KERKFHOFF Breatrix., PANARESE William C., TANESI Jussara. Diseño y control de mezclas de concreto. PCA Portland cement association. Skokie, Illinois, EE.UU. 2004. 456 pág.

MORALES Pedro. Tamaño necesario de la muestra: ¿Cuántos sujetos necesitamos?. 2012.

Normas Técnicas Colombianas. NTC. ICONTEC.

REYES Fredy., I.C. TORRES Andrés. Pavimentos drenantes en concreto con adiciones de plástico. Grupo CECATA Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia, 2008.

REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE. NSR-10.

RODRIGUEZ Javier. Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráfico ligero. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria. 2008.

SÁNCHEZ DE GUZMÁN Diego. Tecnología del concreto y del mortero.

SOUTO Gabriela. Ensayos de permeabilidad. Geotecnia. 2009.

UNIDAD CIVIL GEOMINERA – Nuevas tecnologías de construcción para pavimentos. 2008.

ANEXOS