

**ANÁLISIS DEL DISEÑO ÓPTIMO PARA REJILLAS CON CONCRETO
PERMEABLE**

**ANDRÉS FELIPE ARDILA ARANGO
JAIRO ALONSO ZAMBRANO ZAMBRANO
DIEGO FELIPE CABRERA ZAMORA**



**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2016**

**ANÁLISIS DEL DISEÑO ÓPTIMO PARA REJILLAS CON CONCRETO
PERMEABLE**

**ANDRÉS FELIPE ARDILA ARANGO
JAIRO ALONSO ZAMBRANO ZAMBRANO
DIEGO FELIPE CABRERA ZAMORA**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de
ingeniero civil

**Asesor Disciplinar: Arnold Giuseppe Gutiérrez
Ingeniero civil
Asesor Metodológico: Lic. Laura Milena Cala Cristancho**

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ 2016**

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
3. JUSTIFICACIÓN	12
4. OBJETIVOS	14
4.1. OBJETIVO GENERAL	14
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
5. ANTECEDENTES	15
6. MARCO REFERENCIAL	19
6.1 MARCO CONCEPTUAL	19
6.1.1 Cemento	19
6.1.2 Agua	19
6.1.3 Agregados	19
6.1.4 Concreto	21
6.1.4. Propiedades Mecánicas del concreto	23
6.1.5 Permeabilidad	26
6.1.6 Los sumideros	28
6.1.7 Captaciones de agua.....	30
6.2 MARCO LEGAL	30
7. DISEÑO METODOLÓGICO	32
7.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	32
7.2 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	32
7.3 TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	32
7.4 OPERACIONALIZACION DE LAS VARIABLES.	33
7.4.1 Variables independientes.....	33
7.4.2 Variables dependientes	33
7.4.3 Variables Intervinientes.....	33
7.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN	33
7.6 FASES DE LA INVESTIGACIÓN	34
7.6.1 Fase I. Diseño de mezclas para concreto permeable.	34

7.6.2 Fase II. Evaluación de parámetros físico-mecánicos	34
7.6.3 Fase III. Determinación de parámetros de diseño hidráulicos	35
7.6.4 Fase IV. Comparación y ajuste del modelo	35
8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	36
8.1 DETERMINACIÓN DEL DISEÑO DE MEZCLA ÓPTIMO	36
8.1.2 RELACION AF/AG.....	36
8.1.3 ADITIVOS.....	37
8.1.4 CEMENTO.....	37
8.1.5 DISEÑO DE MEZCLA.....	37
8.1.6 EVALUACIÓN DE DISEÑO DE MEZCLA	38
8.1.7 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS DE MATERIALES....	40
8.1.7 CANTIDADES DE MATERIALES	47
8.2 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO MECÁNICOS DEL CONCRETO PERMEABLE.....	47
8.2.1 MATRIZ DE ENSAYOS	47
8.2.2 ENERGIA DE COMPACTACIÓN.....	48
8.2.3 ANALISIS DE MUESTRAS EN FUNCION DE ENERGIAS DE COMPACTACIÓN	50
8.2.4. DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD.....	69
8.2.6 DETERMINACIÓN DE MÓDULO DE ROTURA	74
8.3 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO HIDRÁULICOS	80
8.3.1 DETERMINACIÓN DE CAUDALES DE DISEÑO	80
8.4 DISEÑO DE LA REJILLA.....	83
9. CONCLUSIONES.....	86
10. RECOMENDACIONES	87
11. BIBLIOGRAFÍA	88
ANEXOS.....	89

Tabla de Figuras

Figura 1. Modelo Hidráulico.....	18
Figura 2. Tenacidad en Concreto.....	20
Figura 3. Permeabilidad.....	23
Figura 4. Descripción de Ensayos Resistencia a la Tracción.....	25
Figura 5. Descripción de aplicación de cargas que provocan flexión.....	26
Figura 6. Permeámetro de carga constante.....	27
Figura 7. (A) Sumidero Lateral de sardinel, (B) Sumidero de fondo (C) Sumidero mixto o combinado.....	28
Figura 8. Detalle de sumidero sin depresión, conectado a una cámara. Corte longitudinal.....	29
Figura 9. Líneas de energía en sumideros, detalle de captación.....	30
Figura 10. Comparación de valores de resistencia a la compresión según la la relación w/c.....	38
Figura No. 11 Prueba de asentamiento.....	40
Figura No 12. Modelo utilizado para Mediciones de Velocidades de Infiltración.....	70
Figura No 13. Dresser-Mckee, Report N Master Plan For Sewage Works, (1962), Figura 15 Empresa De Acueducto Y Alcantarillado De Bogotá.....	81
Figura No. 14. Dresser-Mckee, Report N Master Plan For Sewage Works, (1962), Figura 16 Empresa De Acueducto Y Alcantarillado De Bogotá.....	82
Figura 15. Esquema de rejilla con secciones de concreto permeable.....	85

Tabla de Tablas

Tabla 1. Coeficientes de permeabilidad.....	27
Tabla No 2. Diseño de mezcla óptimo de concreto permeable.....	36
Tabla No 3. Comparación de valores de resistencia a la compresión según la procedencia de los agregados gruesos.....	37
Tabla No 4. Determinación de diseño de mezcla óptimo.....	38
Tabla No 5. Especificaciones Técnicas Cemento gris de uso general Argos.....	40
Tabla No. 6 Análisis Granulométrico agregado grueso.....	41
Tabla No. 7 Rangos máximos y mínimos Para agregado grueso.....	42
Tabla No. 8 Análisis Granulométrico agregado fino.....	43
Tabla No. 9 Rangos máximos y mínimos para agregado fino.....	43
Tabla 10. Absorción agregado grueso.....	45
Tabla No. 11 Absorción agregado fino.....	45
Tabla No. 12 Contenido de Humedad Natural.....	46
Tabla No. 13 Cuadro resumen contenido de humedad y absorción de agregado..	46
Tabla No. 14 Dosificación en diseño de mezcla de concreto permeable.....	47
Tabla No. 15 Matriz De Ensayos Y Número De Elementos.....	48
Tabla No. 16. Energía De Compactación Utilizada En Proceso Constructivo De Prismáticos.....	49
Tabla No 17 Relación En Porcentaje De Las Energías De Compactación.....	50
Tabla No. 18 Energía De Compactación Alta.....	51
Tabla No 19. Energía De Compactación Media.....	51
Tabla No. 20 Energía De Compactación Baja.....	52
Tabla No. 21 Esfuerzo Vs Deformación.....	54
Tabla No 22. Energía De Compactación Alta.....	56
Tabla No 23. Energía De Compactación Media.....	56
Tabla No. 24. Energía De Compactación Baja.....	57
Tabla No. 25 Nivel De Compactación Alta.....	59

Tabla No 26. Nivel De Compactación Medio.....	60
Tabla No. 27. Nivel De Compactación Bajo.....	60
Tabla No. 28. Energía De Compactación Alta.....	63
Tabla No 29 Energía De Compactación Media.....	64
Tabla No 30. Energía De Compactación Baja.....	64
Tabla No 31 Módulos De Elasticidad Por Energías De Compactación.....	67
Tabla No 32. Relación De Poisson En Función De La Energía De Compactación...	68
Tabla No 33. Variación De La Permeabilidad Según Energía De Compactación...	71
Tabla No. 34. Variación Del Esfuerzo Máximo En Función De La Permeabilidad...	72
Tabla No. 35. Relación Entre Permeabilidad Y Modulo de Young.....	73
Tabla No. 36 Matriz de ensayo para resistencia a la flexión.....	75
Tabla No. 37 Dimensiones promedio de viguetas.....	76
Tabla No. 38 Cálculo de módulos de rotura según matriz de ensayo.....	76
Tabla No. 39 Valores promedio resistencia a flexión.....	79
Tabla No 40. Determinación De Capacidad Máxima De Los Sumideros Estándar..	83

Tabla de Gráficos

Gráfica No. 1 Granulometría Agregado Grueso.....	42
Gráfico No. 2 Granulometría agregado fino	44
Gráfico No. 3 Curva Esfuerzo Deformación A Los 7 Días Para Muestras Curadas..	53
Gráfico No 4. Curva Esfuerzo Deformación, Zona Elástica.....	55
Gráfico No. 5 Curva Esfuerzo Vs Deformación A Los 14 Días Para Muestras Curadas.....	58
Gráfico No. 6 Curva Esfuerzo Vs Deformación A Los 28 Días Para Muestras Curadas.....	61
Gráfico No. 7 Comportamiento Elástico del Concreto Permeable.....	62
Gráfico No 8. Curva Esfuerzo Vs. Deformación. Descripción Del Comportamiento Elástico Del Concreto Permeable No Sometido A Procesos De Curado.....	65
Gráfico No 9. Relación Entre Comportamientos Elásticos De Concretos Permeables Curados Y No Curados.....	66
Gráfico No 10. Variación Del Módulo De Elasticidad Por Energía De Compactación.....	68
Gráfico No. 11. Variación De La Relación De Poisson Energía De Compactación.....	69
Gráfico No 12. Variación De La Permeabilidad Según La Energía De Compactación Utilizada Para La Construcción De Cada Muestra.....	71
Gráfico No. 13. Permeabilidad Vs Esfuerzos Máximos.....	72
Gráfico No. 14. Permeabilidad Vs Módulo De Elasticidad.....	73
Gráfico No. 15 Resistencia a la flexión Vs. Permeabilidad.....	79
Gráfico No 16. Dimensionamiento de secciones en concreto permeable para rejillas.....	84

1. INTRODUCCIÓN

Esta investigación está enfocada a la aplicabilidad del concreto permeable como materia prima para rejillas en sumideros, dados los problemas que presenta el modelo actual estandarizado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Los sumideros con el paso del tiempo se ven nocivamente afectados por los distintos materiales transportados por el agua lluvia en el proceso natural de precipitaciones, llevando a una serie de inconvenientes de tipo socio-económico, que se podrían aliviar si dichos residuos no logran llegar a las redes de alcantarillado pluvial.

Lo anterior nos lleva a evaluar desde la perspectiva de la ingeniería civil, en nuevos modelos que optimicen los sistemas actuales, teniendo en cuenta los progresos en cuanto a nuevos y mejores materiales que nos brinda el avance de la tecnología. El concreto permeable se presenta como una posible solución dadas sus propiedades hidráulicas.

Se evaluarán las propiedades físico mecánicas del concreto permeable, junto con sus materiales compositivos, de forma que se pueda proponer una alternativa de rejilla implementada usando este material, de forma que se pueda evitar el paso de residuos sólidos de gran tamaño, y así reducir costos de mantenimiento y aumentar el tiempo de funcionalidad o vida útil de los alcantarillados en la ciudad de Bogotá.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad las empresas que prestan el servicio público de acueducto y alcantarillado invierten altos porcentajes de sus presupuestos, recaudados de los cobros a los usuarios del servicio por su uso, para dar solución a las problemáticas de mantenimiento que dichas redes generan.

Esta problemática se debe a diversos factores, pero fundamentalmente a que los sistemas de alcantarillado destinados a permitir la recolección, transporte y disposición final de las aguas servidas, requieren de mantenimientos cuyos costos son muy elevados debido a la gran cantidad de desperdicios generados por las industrias, viviendas y actividades comerciales.

El sistema de alcantarillado pluvial se alimenta de las aguas lluvias canalizadas en cuanto a vías se refiere, a través de los bombeos, las pendientes y las cunetas (todas variables según el diseño geométrico de la vía urbana) incluidos los sumideros que cumplen la función de captar las aguas lluvias y en otras ocasiones las aguas residuales generadas por la limpieza de los corredores urbanos.

El modelo de sumideros que se utiliza hoy en día está basado en una o más rejillas cuya geometría puede variar (según requiera la especificación del estudio hidráulico); dichas rejillas están constituidas por orificios de áreas superiores a 0.72 m^2 los cuales permiten el paso de residuos sólidos y finos que se encuentran en las calles, materiales de arrastre de las aguas lluvias; con el pasar de los días estos materiales se van acumulando hasta el punto que generan taponamientos que no permiten la circulación o flujo libre del agua, dando origen a depósitos de aguas estancadas.

Las aguas estancadas producen un sin número de problemas, por ejemplo, teniendo en cuenta el pésimo manejo de aguas y la escasa capacidad hidráulica que poseen algunas vías urbanas de la ciudad de Bogotá, generan que las capas de pavimento, bien sea articulado, flexible, rígido o semi-rígido se erosionen, generando grandes pérdidas en la capacidad de rodamiento que tiene la vía; Del mismo modo se aumentan ostensiblemente los gastos de mantenimiento a la infraestructura vial de la ciudad.

Por otra parte, la aparición de enfermedades (por la generación de hongos, parásitos y algunos virus), los malos olores, que de por sí son muy molestos para la comunidad en general son otros de las problemáticas que presenta el modelo recolección de aguas lluvias en las vías actual.

Como ya se indicó, el mantenimiento de las redes de acueducto y alcantarillado es muy costoso, por lo que actualmente las empresas prestadoras de estos servicios invierten altos rubros en la realización de actividades de limpieza y adecuación de tuberías en general, todo en consecuencia de la forma en cómo está concebido el sistema; por ejemplo La Empresa De Acueducto Y Alcantarillado de Bogotá invierte periódicamente la suma de 4.300 millones de pesos con el fin de realizar la limpieza de los 147 mil sumideros con los que aproximadamente cuenta la zona norte de la capital según datos reportados por La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá¹; dicha empresa celebró el convenio 9-07-32100-966 en el año 2013 con el Instituto Distrital para la Protección de la Niñez y la Juventud, IDIPRON, que tuvo como objeto la realización de dichas actividades de limpieza, garantizando diez cuadrillas con un total de 150 operarios, que trabajaron extensas jornadas, y mantuvieron sus labores durante dos años (marzo de 2013 hasta marzo de 2015)² para lograr el objetivo de devolver la funcionalidad a las rejillas del sistema hidráulico actual, lo que a grandes luces no son soluciones de fondo que permitan optimizar recursos, tiempo y en consecuencia el modelo como tal.

En la actualidad, el estudio de materiales como el concreto permeable es muy limitado, y consecuentemente no se tienen documentación ni experimentación que permita determinar la implicación que podría presentar la variación de los niveles de la energía de compactación al momento de reproducir muestras físicas, y más aún si se tiene en cuenta que esto podría evidenciar importantes variaciones en cuanto a sus propiedades físicas y mecánicas se refiere, mejorando los resultados que se pudiesen obtener.

De lo anteriormente expuesto surge la siguiente pregunta:

¿Cuál es el diseño de sumideros prefabricados en concreto permeable que permita optimizar los diseños establecidos por la norma técnica “rejillas y tapas para sumideros (NP-023 versión 2)” elaborada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá?

¹ EMPRESA DE ACUEDUCTO DE BOGOTÁ [en línea] <<http://goo.gl/4EgkIG>> [citado el 17 de febrero de 2016]

² DIARIO EL ESPECTADOR, Noticias BOGOTÁ [en línea] <<http://goo.gl/U27Zq9>> [citado el 17 de febrero de 2016]

3. JUSTIFICACIÓN

Debido a que el modelo de rejillas y tapas para sumideros, utilizado actualmente en la ciudad de Bogotá, tiene varias falencias, como por ejemplo el hecho de que estas rejillas permitan el paso de residuos sólidos tanto orgánicos como inorgánicos, a mediano plazo favorece la generación de focos de acumulación que conllevan a problemas ambientales y socio-económico, como lo son los costos en que incurre el distrito para la realización de limpieza y destaponamiento de sumideros.

Por otro lado, cuando las aguas grises rebosan por un sumidero se generan vectores negativos de salubridad como lo son la aparición de plagas de roedores e insectos, que llevan consigo la transmisión de enfermedades; por ejemplo, las ratas y ratones tienen la capacidad de transmitir hasta 26 enfermedades, entre las más comunes encontramos: Leptospirosis (La presencia de orina en las aguas grises y entrar en contacto directo e indirecto con las mismas), Salmonelosis (La presencia de heces fecales en las aguas grises y entrar en contacto directo e indirecto) y fiebre por la mordedura de ratón.

Adicionalmente, es claro que la forma en que se diseñaban los alcantarillados no solo en Bogotá sino en toda Colombia, según la RAS 2000³ es un modelo obsoleto y poco funcional; dado que esta propone que las aguas residuales sean conducidas por redes independientes a las aguas grises, lo que claramente no ha sido implementado en el modelo de alcantarillado de la ciudad de Bogotá en su totalidad. La dificultad de disponer de un presupuesto e infraestructura suficiente para ejecutar la totalidad de las obras que implicaría cambiar el actual sistema, hace que la norma se quede solo en supuestos teóricos, dejando en evidencia las falencias que presenta como los malos olores y/o la elevación de los niveles de contaminación en los puntos de vertimiento, de las aguas servidas, que no son otra cosa que los ríos y quebradas del país.

Los residuos sólidos orgánicos en el agua producen el fenómeno de eutrofización, es decir que en los litorales del río sea el Tunjuelito, Bogotá o Magdalena (siendo estos puntos de vertimiento se producen ciertas algas que generan cambios bruscos en la temperatura de los ecosistemas causando la migración de algunas especies, esto debido principalmente a la falta de plantas de tratamiento que minimicen la carga contaminante, hasta llegar a los niveles solicitados por el decreto 3930 de 2010, es por esto que analizando una línea de disposición de residuos, es fundamental reducir la cantidad de residuos que llegan a las fuentes hídricas en etapas iniciales de la línea de disposición.

³ RAS 2000, Título D, Parágrafo 7.6 Sumideros.

Los concretos permeables son un campo en la ingeniería de materiales que en cuanto a la construcción se refiere, ha sido poco explorado, pero en cuanto a tecnología verde, en la construcción brinda soluciones eficientes cuando nos referimos a términos de conservación del medio ambiente, a partir de la implementación de este material, se pueden lograr elementos que suplan necesidades en cuanto al manejo de aguas superficiales provenientes de las lluvias o de fenómenos de escorrentía aplicadas al diseño hidráulico de pavimentos y estructuras en concreto.

La necesidad de dar soluciones ambientalmente sostenibles a los problemas que se presentan en la sociedad, ha llevado a proponer el uso de nuevos materiales de construcción, en este caso en específico el uso de elementos prefabricados en concreto permeable que se adecuen de manera eficiente al manejo de aguas superficiales mediante la implementación de rejillas prefabricadas en concreto permeable para sumideros.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

- Determinar el diseño óptimo para rejillas con concreto permeable, que permita drenar de manera eficiente las aguas lluvias de la ciudad de Bogotá.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar el diseño de mezcla óptimo para una muestra de concreto permeable.
- Analizar la influencia que tiene el nivel de compactación en las propiedades físico-mecánicas del concreto permeable.
- Establecer el caudal de diseño para las rejillas del modelo convencional de alcantarillado pluvial, con el fin de dar cumplimiento a la normatividad de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.
- Proponer el diseño de una rejilla con concreto permeable, que permita drenar las aguas lluvias de la ciudad de Bogotá.

5. ANTECEDENTES

Las precipitaciones que se producen de manera natural en el planeta, han sido uno de los principales objetos de estudio en cuanto a la ingeniería civil se refiere, no solo porque es parte vital para la existencia, sino por los grandes problemas que puede acarrear su mal manejo.

Desde la antigüedad, junto con la construcción de las grandes civilizaciones el manejo del agua se encontraba implícito en los requerimientos propios de calidad de vida de los asentamientos humanos. La evolución de las tecnologías y modelos de construcción ha permitido llegar al modelo de redes subterráneas que se tiene en la actualidad, que se basa en drenajes por medio de tuberías que conducen bien sea las aguas residuales, industriales o pluviales a las fuentes naturales de vertimiento.

En cuanto a vías se refiere, al momento de generarse la lluvia esta se conduce por acción de la gravedad hacia los sardineles, debido al bombeo de las calzadas, para finalmente ser evacuada a través de las redes de drenaje por medio de sumideros que permiten la transición del agua en superficie a la conducción por tubería. Los sumideros anteriormente mencionados, son elementos en concreto cuya finalidad es evitar el paso de residuos sólidos de gran tamaño a las estructuras de captación, sino únicamente el agua generada por las precipitaciones.

El concreto hidráulico o concreto permeable es uno de los nuevos materiales de construcción más innovadores en la actualidad; las primeras investigaciones de las que se tiene documentación y sustento técnico tienen sus inicios hace cerca de 12 años, cuando se empezó a utilizar en la fabricación de pisos y pavimentos de concreto 100% permeables, con el fin de permitir el paso de las aguas lluvias, de modo que se pudieran aprovechar con fines ecológicos y a su vez, sirvieran como estructuras de drenaje, aunque se tiene documentación de concretos con cierto grado de permeabilidad desde el siglo XIX, los cuales se lograron para fines netamente arquitectónicos.

Este tipo de concreto es el resultado de desarrollar un diseño de mezcla no convencional mediante el uso de aditivos, que aumentan la fuerza de cohesión del cemento, que es un elemento de la mezcla aglutinante de agregado pétreo, agua, cemento y aditivo⁴, que, aunque bien reduce en cierto grado su resistencia y

⁴ SAUCEDO, Artemio, Concreto hidráulico permeable, una alternativa para la recarga de los mantos acuíferos del valle de México. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México – México. P 10

propiedades mecánicas, por sus bondades hidráulicas dependiendo del caso en que sea usado puede brindar amplios beneficios.

El concreto permeable ha sido uno de los principales campos de acción en cuanto al ingeniería civil se refiere en los últimos tiempos; una de los principales factores a tener en cuenta, en el momento de evaluar las variables más importantes para los diseños de mezclas en este tipo de concreto, por ser un importante factor a la hora de obtener resistencias óptimas de diseño es la relación agua/cemento.

En el artículo “Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad”⁵ los investigadores basaron la búsqueda de resistencias a compresión y flexión que permitieran un concreto permeable con características estructurales óptimas, en la variación de la relación agua/cemento, para lo cual realizaron 19 diseños de mezclas distintos. Como parámetro fundamental se partió de la relación agua/cemento, pero también se hizo necesario evaluar entre otros factores la granulometría de los agregados usados en la mezcla, obteniendo un rango de resistencias entre los 12 y 21 Mpa; trabajo importante de cara al uso de este tipo de materiales en el día a día de la construcción, ya que es claro que inducir en el concreto los vacíos que permiten el paso del agua a través de la muestra sólida reduce su resistencia, pero como vemos se puede hablar de un material con características propias de mezclas usadas para fines netamente estructurales.

El concreto permeable no ha sido solo materia de estudio para suplir y/o mejorar los requerimientos de obras en hormigón convencionales, como se sabe los pavimentos son estructuras que durante su vida útil se ven principalmente afectadas por malos manejos de agua; de por sí, la ingeniería vial esta intrínsecamente ligada al manejo y drenaje de aguas lluvias para lograr obras que cumplan con su vida útil de diseño, sin que pierdan su capacidad de operación y funcionalidad, de allí que también se haya estudiado el uso de este concreto en lozas que se puedan usar para pavimentos. Someter las estructuras de pavimento a efectos de congelamiento en invierno y a altas temperaturas en tiempos de verano, además de las variaciones climáticas diarias bruscas que pueden presentar países como Colombia por encontrarse en zona tropical pueden resultar demasiado nocivas para estructuras de pavimento convencionales; las condiciones de “fragilidad” del concreto permeable por tener fisuras si se antoja inducidas para permitir el paso del agua,

⁵ FERNÁNDEZ, Roberto J. Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad. Laboratorio Hidrosistemas Ven Te Chow. Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. 2011. P. 41-49

son un importante parámetro de revisión si se quiere llegar a hacer de este tipo de material funcional, con condiciones óptimas de desempeño. ⁶

Todo lo anterior nos lleva a pensar que la dificultad para el uso del concreto permeable radica en las características mecánicas que pueda llegar a tener; Øyvind André Hoff Torsvik⁷ en su tesis Pervious Concrete determinó que las principales variables a evaluar para óptimas resistencias en este tipo de concretos son los vacíos que en este se produzcan y los porcentajes de arena que incluya el diseño de mezclas ya que se obtuvieron las mayores resistencias a compresión cuando los diseños de mezclas tenían bajos contenidos de arenas, bajas relaciones agua/cemento y vacíos moderados. Por otra parte, en su investigación menciona que el diseño de mezcla no es el único factor determinante a la hora de realizar concretos permeables estructurales.

La colocación y la compactación en este tipo de mezclas debe ser llevado a cabo con mayor rigurosidad que en mezclas que se usarán para hormigón, dado que las normas que actualmente se tienen, intentan evitar los vacíos que el concreto permeable busca.

El análisis hidráulico para las rejillas en sumideros que se buscan producir en concreto permeable, debe estar ligado a la concepción misma de su forma y de los requerimientos de diseño que las precipitaciones nos generen. El ingeniero Luis Ayala⁸ en su artículo Eficiencia en cunetas de sección triangular mediante ecuaciones de Chezy-Manning y Darcy –Colebrook en un modelo físico, evaluó las condiciones de servicio de sumideros en vías mediante un modelo físico (ver figura 1) que simuló las características hidráulicas de captación de sumideros a partir de la eficiencia de captación del sumidero mediante la ecuación:

⁶ HENDERSON, Vimy. Evaluation of the Performance of Pervious Concrete Pavement in the Canadian Climate. Doctorado en Ingeniería Civil. Ontario. Universidad de Waterloo. 2012. P 218-228

⁷ HOFF. Øyvind. Pervious Concrete. Maestría en Ingeniería Civil. Noruega. Norwegian University of Science and Technology. 2012. P 53-65

⁸ AYALA. Luis Efrén. Eficiencia en cunetas de sección triangular mediante ecuaciones de Chezy-Manning y Darcy-Colebrook en un modelo físico. Facultad de Ingeniería. Universidad de la Salle. 2014. P 105- 125

Ecuación 1.

$$ef = \frac{Q_{cap}}{Q_t}$$

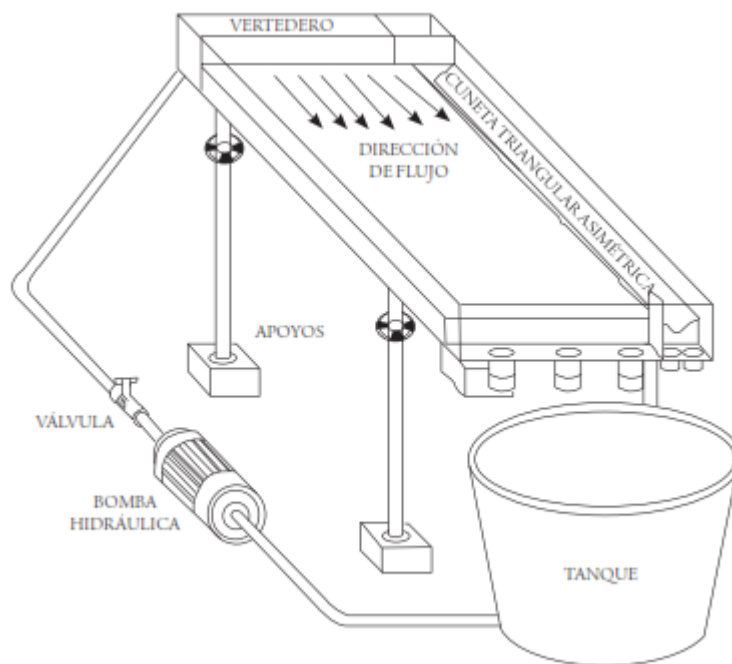
Donde

ef = eficiencia

Q_{cap} = Caudal Captado

Q_t = Caudal Total

Figura 1. Modelo Hidráulico 1



Fuente. Ayala, Eficiencia de cunetas.

6. MARCO REFERENCIAL

6.1 MARCO CONCEPTUAL

En cuanto a la utilización de nuevos materiales de construcción y el uso de tecnologías innovadoras, se hace necesario que estos sean estudiados y se identifiquen la totalidad de sus propiedades bien sea físicas, químicas o mecánicas para que quien los desee utilizar sepa lo que dicho material es capaz de realizar y soportar hablando en ámbitos de la ingeniería civil.

6.1.1 Cemento, es este el ingrediente principal para la elaboración de un concreto, es un material fino que se obtiene a partir de calentar la combinación de piedra caliza, arcilla y mineral de hierro, dicho proceso es conocido como la calcinación. El producto del proceso de calcinación es el Clinker, siendo este el principal ingrediente del cemento, una vez obtenido este material se procede a molerlo finalmente con yeso y una serie de agregados químicos dando origen al cemento. Es el material de construcción más utilizado en el mundo dado que aporta propiedades útiles y deseables, tales como la resistencia a la compresión, durabilidad, estética y acústica dejando por sentado una alta gama de aplicaciones en el sector de la construcción.⁹

6.1.2 Agua, es un elemento natural que se encuentra generalmente en estado líquido, no tiene sabor ni olor y es representada químicamente por el símbolo (H₂O); es un componente esencial en las mezclas de concreto y morteros, dado que permite que el cemento desarrolle su capacidad ligante, es decir, la generación de fuerzas de atracción entre las partículas que conforman el concreto, la cantidad de agua que se utilice para la realización de un concreto dependerá de su uso, por ejemplo, el cálculo de la cantidad de agua que tenga el diseño de mezclas dependerá de lo que se quiera lograr con él.

6.1.3 Agregados, son materiales generalmente naturales que se obtienen de la excavación tanto manual como mecánica de canteras o zonas de depositación de los ríos, son granulares y se adecuan para ser utilizados en el concreto.

Se considerará agregado grueso a toda roca cuyo tamaño sea mayor a 3/8" y cualquier tamaño menor al mencionado anteriormente se considerará agregado fino; dichos agregados tienen una influencia notable en el concreto, ya que participan en grandes proporciones y por esto contribuyen a las propiedades del concreto, algunas de estas propiedades son:

⁹ [Citado el 28 de marzo de 2016] Disponible en < <http://goo.gl/YbCRK9>>

6.1.3.1 Propiedades físicas como por ejemplo la densidad, la porosidad, la forma, la compacidad, el color entre otras.

6.1.3.2 Propiedades Químicas, se refieren a la composición química del agregado y de cómo el contenido de ciertas sustancias puede producir reacciones de tipo expansivo como lo son la reacción alcali-silice (RAS), reacción álcali-carbonato (RAC)

6.1.3.3 Propiedades Mecánicas, se refiere netamente a la constitución del material, entre las más conocidas se encuentran:

- La resistencia, la cual dependerá de la composición mineralógica y la forma en como están acomodados dichos minerales, es decir, entre más compactas estén las partículas, mayor será la resistencia del elemento.
- Tenacidad, este término hace referencia al comportamiento del material ante la presencia de cargas relacionando la capacidad que tiene de resistir con su deformación.

Figura 2. Tenacidad En Concreto



Fuente. Materiales Solidos, facultad de ingeniería civil "Santiago Antúñez de Mayolo.

- Forma, este término hace referencia a la geometría que presenta el agregado, por ejemplo, esférica, irregular, muy irregular, plana, elongada, cubica entre otras.

- Durabilidad, hace referencia a la resistencia que tiene el agregado en términos de tiempo ante la exposición a ambientes naturales, por ejemplo, la forma en que el material tolera el hecho de pasar por periodos de lluvia y sequia o de congelamiento y deshielo.
- Contenido de agua, como la palabra lo indica es la capacidad que tiene el material de almacenar agua.
- Dureza, es la resistencia que tiene el material ante fenómenos de erosión y desgaste.

6.1.3.4. Propiedades térmicas, son todas aquellas que identifican el comportamiento del material ante la variación de la temperatura en la que se encuentra en su estado natural, algunas de ellas son los coeficientes de expansión (lineal y volumétrico), el calor específico, la conductividad térmica y difusividad¹⁰

De la unión de los materiales anteriormente mencionados se obtiene:

6.1.4 Concreto, es un material de construcción formado a partir de la unión del cemento, el agua, agregados (sea fino o grueso) y según el caso o la manera en que se desea emplear aditivos, cada uno de los elementos anteriormente mencionados utilizados en diferentes proporciones hasta formar una masa homogénea de propiedades óptimas.

Dicha mezcla se puede moldear en diferentes formas, es duradera y muy atractiva para ser usada por sus altas resistencias y su costo moderado, siendo este el concepto fundamental de construcciones sustentables.

Los expertos en tecnología del concreto pueden modificar las propiedades del concreto mediante el uso de innovadoras mezclas químicas. Por ejemplo, dependiendo del tipo de aplicación y los requerimientos de la obra, si es el caso que tenga la capacidad de desarrollar altas resistencias iniciales o que sean trabajables durante más tiempo.¹¹

Según sea la modificación de las cualidades del concreto se pueden identificar los siguientes tipos:

6.1.4.1 Concreto Estándar, es el concreto fundamental en su forma más común se prepara en el sitio de la obra o de ser el caso puede ser premezclado en una planta

¹⁰ [Citado el 28 de marzo de 2016] Disponible en < <http://goo.gl/z6q0WS> > Diapositiva No. 27.

¹¹ Ibíd., p13

para ser colocado en obra, siendo el segundo el preferido por que garantiza la calidad del concreto.

6.1.4.2 Concretos Arquitectónicos, son todos aquellos concretos que además de generar un acabado estético y decorativo a la obra (diversidad de colores) tienen la capacidad de desempeñar funciones estructurales.

6.1.4.3 Concreto de Fraguado Rápido, está diseñado para desarrollar resistencias muy altas en periodos de tiempo muy cortos, es llamativo en la forma en que permite acelerar los procesos constructivos o por otra parte realizar reparaciones rápidamente.

6.1.4.4 Concreto reforzado con fibras, a una mezcla convencional de concreto se le adicionan fibras (metálicas, plásticas entre otras), que disminuyen la utilización de acero de refuerzo en las estructuras haciendo de esta manera las estructuras más livianas e incrementando propiedades como la ductilidad y la resistencia.

6.1.4.5 Concretos fluidos, son llamados de esta manera por las altas cantidades de agua dentro de la mezcla, son utilizados con frecuencia para realizar recubrimientos de materiales como tuberías, como concreto de limpieza (solados) entre otros.

6.1.4.6 Concreto Autocompactante, es un concreto fluido auto nivelante, lo que elimina la necesidad de realizar vibrados y garantizan excelentes acabados y resistencias.

6.1.4.7 Concreto poroso o concreto permeable, siendo este el objeto de estudio de esta investigación, es un concreto de cualidades muy similares al concreto convencional, cuya característica principal es permitir el paso del agua, esto debido a la poca o nula presencia de agregado fino dentro de mezcla de esta forma adquiriendo una textura porosa; la comunicación de dichos poros permite que el agua fluya libremente a través del elemento¹².

Para que exista dicha comunicación entre los poros es necesario hacer un diseño de mezclas estricto que permita generar una masa con altos porcentajes de vacíos que oscilen entre el 15% y 35%, es decir, entre más vacíos tenga la mezcla, permitirá un paso rápido del agua dentro del concreto, por ejemplo, en un concreto poroso bien logrado pueden pasar entre 122 y 204 litros de agua por minuto en un metro cuadrado de superficie.¹³

¹² Grupo CECATA. Efecto de las fibras plásticas en la flexión de estructuras de pavimentos drenantes, revista ingeniería de construcción volumen 17 No.2

¹³ Cerdas, Cindy. Análisis de la flexo tracción del concreto permeable. Instituto tecnológico de Costa Rica. 2009.

Figura 3. Permeabilidad



Fuente. Southeast Cement Association.

El concreto permeable se debería utilizar porque:

- Hace las vías más seguras, según el estudio realizado por los ingenieros del grupo CECATA¹⁴, la eliminación de los charcos y/o empozamientos de agua evitan el hidroplaneo de los vehículos, haciendo más segura la vía.
- Que las estructuras no requieren inclinación para la captación de agua, disminuyendo drásticamente las dificultades en los procesos constructivos.
- Adquieren las resistencias máximas en un periodo muy corto, dado que el elemento puede ser puesto en servicio entre las 24 y 72 horas, luego de fundido.
- Su costo es reducido
- Reduce las temperaturas superficiales
- Reduce los picos de caudal de escorrentía generados por el agua lluvia en áreas urbanas.

6.1.4. Propiedades Mecánicas del concreto, en el estudio de los materiales de construcción es necesario medir las siguientes características, esto con el fin de determinar las condiciones sobre las cuales se deben utilizar.

6.1.4.1 Resistencia a la compresión, es la cuantificación de la resistencia máxima que tiene un elemento en concreto ante cargas impuestas, obteniendo de esta

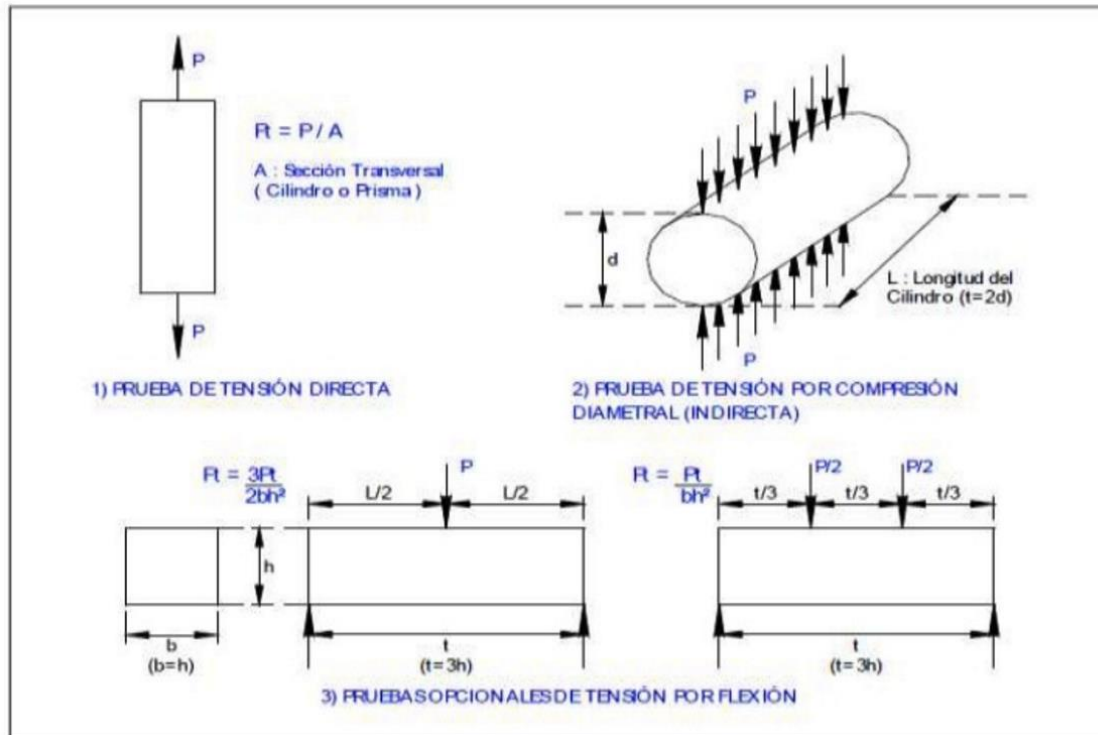
¹⁴ Ibíd. P4

manera la condición de carga en la que el concreto muestra la mayor capacidad de soportar esfuerzos de compresión, los parámetros para la realización de este tipo de pruebas están normalizadas en Colombia tal y como se desarrolla en el capítulo 5.3.

6.1.4.2 Resistencia a la Tracción o tensión, es un parámetro mecánico que depende de las resistencias propias de los elementos que conforman la mezcla (cemento y agregados), esto refiriéndose a la adherencia que genera en la interacción de dichos materiales, dicha resistencia se puede obtener a la partir de la realización de:

- Una prueba de tensión directa, en la cual se utiliza un espécimen cilíndrico, que posteriormente es sometido a esfuerzos de tensión.
- Prueba de tensión Indirecta, es también conocido como el método brasilero, consiste en tomar un espécimen cilíndrico y generarles cargas perimetrales (compresión diametral)
- Prueba de tensión o flexión en especímenes prismáticos, generalmente viguetas, las cuales pueden ser ensayadas por dos métodos, el primero de ellos aplicando una carga axial en el centro de la luz y el otro aplicando dos cargas ubicadas a $1/3$ de la longitud total del elemento.

Figura 4. Descripción De Ensayos Resistencia A La Tracción.



Fuente: disponible en <http://goo.gl/oTL98u> Propiedades mecánicas del concreto 4

6.1.4.3 Resistencia a la flexión, es la medida de la deformación máxima que alcanza un material, en este caso concreto en una dirección perpendicular al eje longitudinal, para general la deformación es necesario aplicar una fuerza tal y como se muestra en la figura No. 5; el esfuerzo generado es conocido como el momento flector.

6.1.4.4 Parámetros. A partir de la cuantificación de las resistencias anteriormente descritas y aplicando las teorías básicas de la resistencia de los materiales se pueden calcular los siguientes parámetros:

- Módulo de Young (E), también conocido como el módulo de elasticidad el cual es la relación existente entre los esfuerzos y las deformaciones unitarias axiales, se calcula a partir de la realización del ensayo de la resistencia a la compresión.
- Relación de Poisson (μ), es la relación existente entre las deformaciones transversales y longitudinales al estar el elemento en concreto sometido a

esfuerzos de compresión en una zona elástica, a partir de la realización del ensayo de resistencia a la compresión y realizando la instalación de deformímetros.

- Módulo de rigidez, es una medida que define la capacidad que tiene un material de doblarse o torcerse, es decir, caracteriza el cambio de forma de un material elástico, este parámetro se calcula a partir de la correlación de los dos datos anteriores mediante el uso de la siguiente ecuación:

Ecuación 2.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

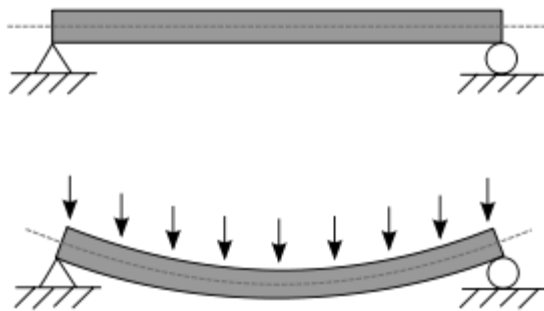
Donde:

(G) es el módulo de rigidez.

(E) es el módulo de elasticidad.

(u) es la relación de Poisson.

Figura 5. Descripción de aplicación de cargas que provocan flexión.



Fuente: Disponible en <https://goo.gl/AVw4R5> Ensayo de flexión.

6.1.5 Permeabilidad, es una propiedad hidráulica que hace referencia a la capacidad que tiene el material, en este caso en concreto de permitir el flujo libre de un fluido, específicamente agua; la velocidad con la que el fluido atraviese el medio

dependerá de la fluidez del líquido y de la cantidad de poros comunicados, dicha velocidad también se puede ver afectada por la temperatura o viscosidad del fluido.

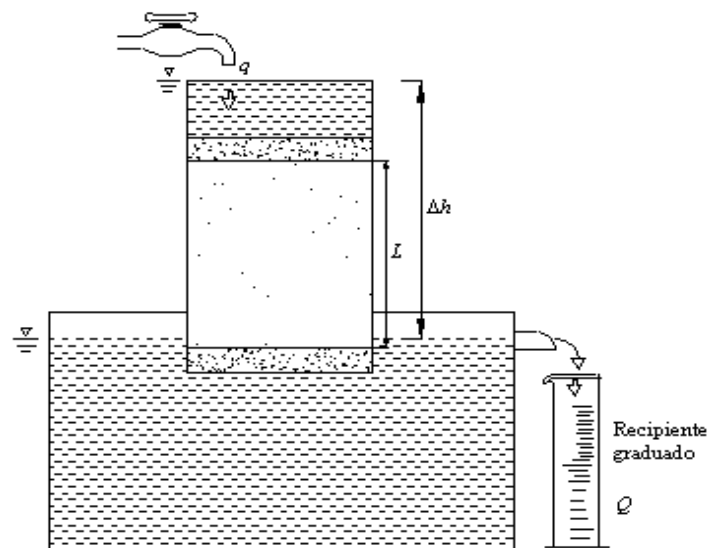
La permeabilidad en el concreto se puede medir utilizando los métodos utilizados para medir la permeabilidad en los suelos, por ejemplo, mediante la utilización de un permeámetro de cabeza constante, adaptado al tamaño de la muestra de concreto permeable, toda esta teoría basada en el concepto de que el flujo que llega es constante; este ensayo se realiza con el fin de calcular el coeficiente de permeabilidad K (velocidad de infiltración); la siguiente tabla ilustra los grados de permeabilidad.

Tabla 1. Coeficientes de permeabilidad

Grado de permeabilidad	Valor de k (cm/s)
Elevada	Superior a 10^{-1}
Media	10^{-1} a 10^{-3}
Baja	10^{-3} a 10^{-5}
Muy baja	10^{-5} a 10^{-7}
Práctic. Impermeable	Menor de 10^{-7}

Fuente: <http://goo.gl/IRqHzd>, permeabilidad por cabeza variable.

Figura 6. Permeámetro de carga constante

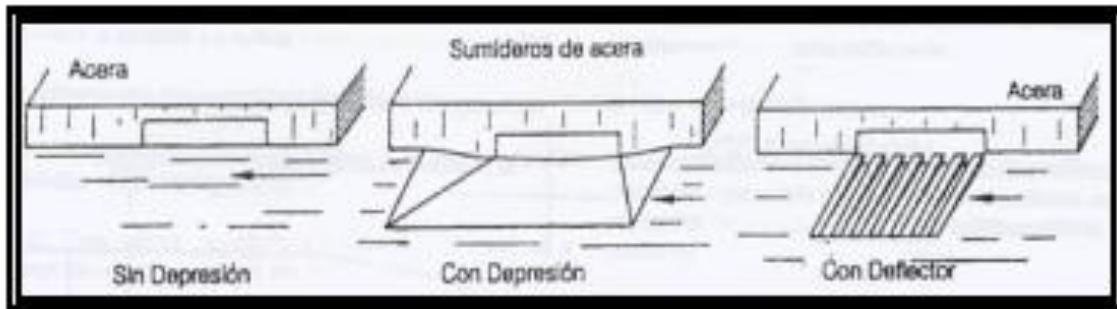


Fuente: <http://goo.gl/xT55F6>, estudios geotécnicos.

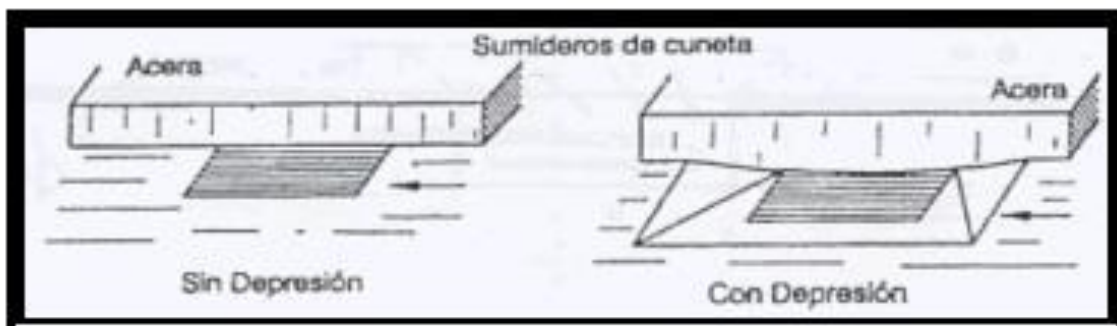
6.1.6 Los sumideros, son obras de ingeniería que conducen las aguas lluvias y de escorrentía a las redes de alcantarillado, existen varios tipos de sumideros como, por ejemplo: el sumidero lateral de sardinel, el sumidero de fondo y el sumidero mixto o combinado tal y como se muestra en la siguiente figura.

Figura 7. (A) Sumidero Lateral de sardinel, (B) Sumidero de fondo (C) Sumidero mixto o combinado.

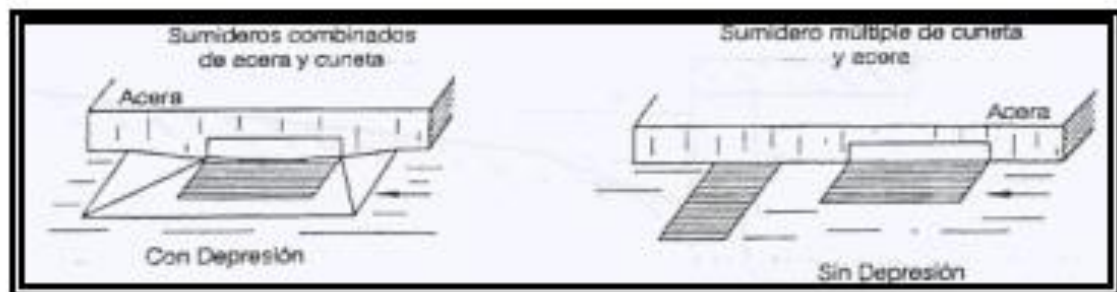
(A)



(B)



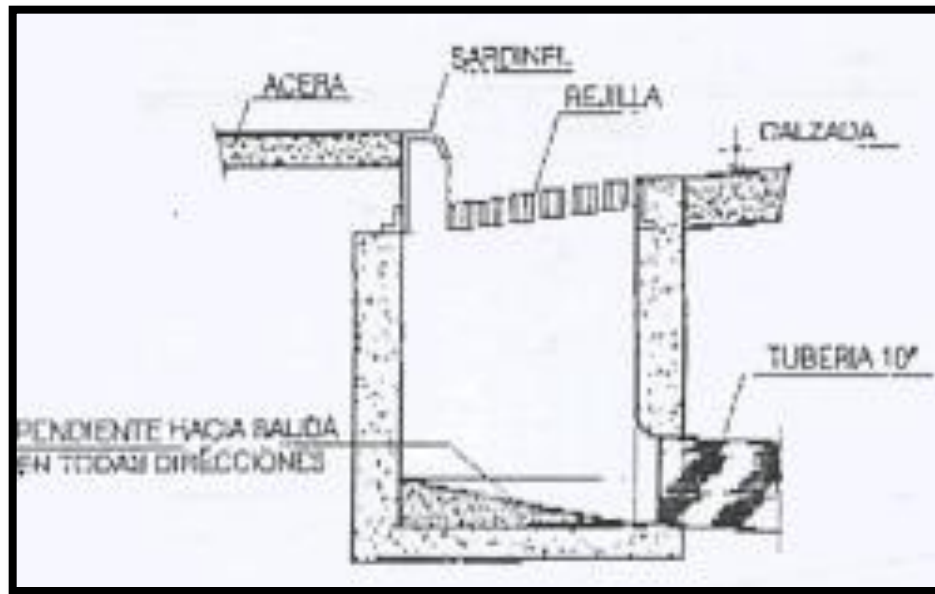
(C)



Fuente. Diseño de sumideros en sistemas de alcantarillados en Colombia.

Como se puede observar los sumideros de cuneta sin depresión, son los más utilizados en el manejo de aguas superficiales de la ciudad de Bogotá, según datos reportados por la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá¹⁵.

Figura 8. Detalle de sumidero sin depresión, conectado a una cámara. Corte longitudinal.



Fuente. Diseño de sumideros en sistemas de alcantarillados en Colombia.

Dichos elementos se tapan con una rejilla en concreto convencional reforzada en dos direcciones, que tiene un funcionamiento similar a una placa en concreto reforzado armada en dos direcciones.

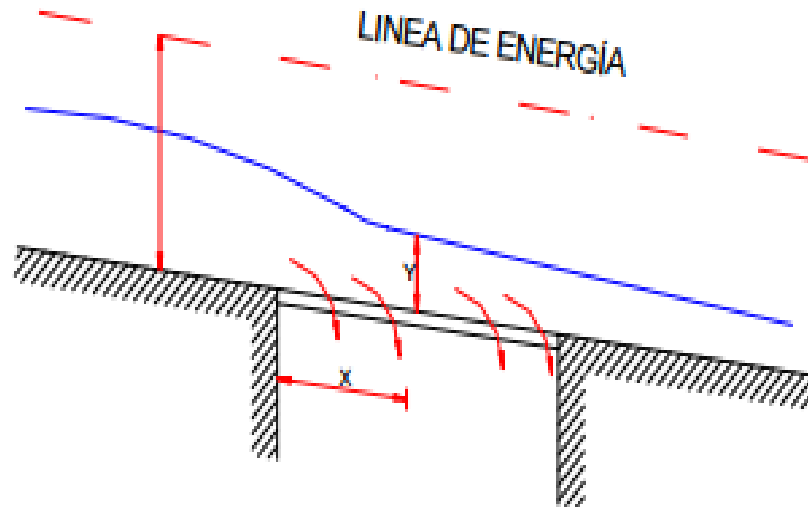
Esta rejilla cuenta con un número determinado de orificios (que permiten el paso del agua), el número de orificios y la geometría de los mismos dependerá del método que se utilice para calcularlos; en la ciudad de Bogotá el método utilizado es el de DRESSER-MCKEE¹⁶, el cual permitió estandarizar los sumideros utilizándose hoy en día las rejillas propuestas en la Norma NP-023 versión 2.

¹⁵ PRADA, Oscar. Estado del arte de diseño de sumideros en sistemas de alcantarillados en Colombia. Universidad de La Salle, 2009. P 133

¹⁶ DRESSER-MCKEE. Reporto n Master Plan for Sewage Works (1992) m Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

6.1.7 Captaciones de agua, la forma más rápida y efectiva de realizar captación de aguas lluvias es la utilización de la pendiente, tal y como se muestra en la siguiente figura.

Figura 9. Líneas de energía en sumideros, detalle de captación.



FUENTE. STEPHENSON, D. Storm water Hydroly and Drainaga,¹⁷

6.2 MARCO LEGAL

Teniendo en cuenta los requerimientos técnicos establecidos para el desarrollo de la ingeniería civil y la ingeniería de materiales en general, se requiere establecer la normatividad que rige la presente investigación; lo anterior para dar cumplimiento a cabalidad de las metodologías estandarizadas para la determinación bien sea de los modelos y/o parámetros físicos o mecánicos que se requirieran en esta investigación.

¹⁷ STEPHESON, D. Stormwater Hydroly and Drainaga , Developmens in wáter Science, Elsevier Scientific publishing Company, Amsterdam-Oxford-New york (1981)

NORMA	DESCRIPCION	APLICACIÓN
ACI 522 R-06	American Concrete Institute	Proporciona información técnica en la aplicación de concreto permeable, métodos de diseño, materiales, propiedades, mezcla proporcional, construcción los métodos, las pruebas y la inspección.
ASTM C1688	American Society for Testing Materials	Método de prueba estándar para la densidad y contenido del Concreto permeable de Recién Mezclado
NTC-1299	Norma Técnica Colombiana	Aditivos químicos para concreto
NTC-3459	Norma Técnica Colombiana	Agua apta para la elaboración del concreto
NTC-673	Norma Técnica Colombiana	Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros de concreto.
NTC-174	Norma Técnica Colombiana	Establece requisitos de gradación y calidad para los agregados finos y gruesos para uso en concreto.
NTC-30	Norma Técnica Colombiana	Cemento Portland, su clasificación y nomenclatura
NTC-3502	Norma Técnica Colombiana	Aditivos incorporadores de aire para concreto
NP-023 (VERSIÓN 2)	Norma Técnica Colombiana	Rejillas y tapas para sumideros del proceso de normalización técnica de la EAAB-ESP
RAS 2000	Reglamento Técnico Del Sector De Agua Potable Y Saneamiento Básico	Sistemas de acueducto y alcantarillado.
NS-047	Norma Técnica de Producto	Sumideros, Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB. Colombia 2020
NTC 396	Norma Técnica Colombiana	Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto

NORMA	DESCRIPCION	APLICACIÓN
NTC-176	Norma Técnica Colombiana	Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso.
NTC-237	Norma Técnica Colombiana	Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino
NTC 1776	Norma Técnica Colombiana	Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados

7. DISEÑO METODOLÓGICO

7.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.

7.2 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

Este proyecto de investigación es netamente cuantitativo, dado que el modelo permite comparar y analizar los datos obtenidos a lo largo de la ejecución de esta investigación, específicamente por que se realizará un diseño de mezclas en concreto permeable que supla los requerimientos de un modelo hidráulico establecido, permitiendo determinar la eficiencia y ajustar las variables del diseño que intervienen en dicho proceso.

7.3 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Se resalta que la investigación es de tipo experimental comparativo, debido a que se desea desarrollar un diseño de mezclas de concreto permeable que se ajuste a las solicitudes de drenaje que se propongan, además, de realizar la comparación entre las rejillas exigidas por la norma NP-023 (Versión 2) y las propuestas dentro del desarrollo de la investigación.

Lo anterior con la ayuda de un modelo hidráulico ajustado a los requerimientos de la investigación en el que intervienen tres variables definidas: bombeo, caudal de diseño y permeabilidad.

7.4 OPERACIONALIZACION DE LAS VARIABLES.

En el desarrollo de esta investigación se presentan una gran cantidad de variables en cuanto a las variables que intervienen en la realización de los ensayos de permeabilidad y resistencia a la compresión tenemos que:

7.4.1 Variables independientes, son todas aquellas que fueron manejadas a gusto, por ejemplo, el nivel de compactación o energía de compactación utilizada para fundir los elementos que permitieron medir otras propiedades fue manipulada a gusto.

7.4.2 Variables dependientes, el hecho de haber tenido como variable independiente el nivel de compactación implica que parámetros como el esfuerzo máximo a la falla del material, el módulo de elasticidad, la relación de poisson, el módulo de rigidez, la permeabilidad entre otras, van a depender de ella, es decir, se obtuvieron datos en función de la energía de compactación empleada.

7.4.3 Variables Intervinientes, dado que uno de los objetivos de la investigación es determinar la variación de la resistencia a la compresión y/o esfuerzo máximo del concreto permeable en función del tiempo, la variación de este puede afectar los datos obtenidos.

7.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Los instrumentos a utilizar en el desarrollo de este proyecto son:

- Instrumentos de laboratorio que permiten hacer la medición de parámetros de identificación física y mecánica de los materiales utilizados. Para efectos de esta investigación se usarán instrumentos que permitan obtener mediciones directas como masa y volumen; además de mediciones indirectas como la permeabilidad entre otros.
- Formaleta para elemento prefabricado.
- Deformímetro para evaluar variaciones volumétricas de las muestras sometidas a cargas.

7.6 FASES DE LA INVESTIGACIÓN

7.6.1 Fase I. Diseño de mezclas para concreto permeable.

- Recolección de información que permita evaluar los diseños de mezcla que han sido usados a lo largo diversas investigaciones del concreto permeable.
- Establecer el diseño de mezclas óptimo.
- Análisis de factores favorables de los diseños de mezcla óptimos que puedan brindar mejores resultados para la elaboración de rejillas para sumideros en concreto permeable
- Evaluar las propiedades físicas de los materiales usados en la mezcla de diseño.

7.6.2 Fase II. Evaluación de parámetros físico-mecánicos

- Reproducir muestras con el diseño de mezcla óptimo, para la evaluación y revalidación de sus parámetros físico-mecánicos.
- Determinar la variación en los niveles de compactación para fundir elementos en concreto permeable.
- Cálculo de la resistencia a la compresión del concreto permeable y verificación de la variación según el nivel de compactación utilizado.
- Determinación y análisis de la curva esfuerzo vs. Deformación para los distintos niveles de compactación.
- Cálculo de la permeabilidad del concreto y verificación de la variación según el nivel de compactación utilizado.
- Cálculo de la resistencia a la flexión del concreto permeable, a partir de la determinación del módulo de rotura (MR.) y verificación de la variación según el nivel de compactación utilizado.

7.6.3 Fase III. Determinación de parámetros de diseño hidráulicos

- Evaluar la capacidad de captación hidráulica de los sumideros en vías, según la metodología DRESSER-MCKEE para cálculo de sumideros en la ciudad de Bogotá.

7.6.4 Fase IV. Comparación y ajuste del modelo

- Determinación del área efectiva en concreto permeable que deberá tener el prefabricado.
- A partir de la eficiencia de captación de la rejilla Vs el modelo convencional establecer el esquema óptimo de la rejilla prefabricada en concreto permeable.

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

8.1 DETERMINACIÓN DEL DISEÑO DE MEZCLA ÓPTIMO

En el desarrollo de la primera fase metodológica, partimos de la información obtenida de los antecedentes. En el estudio del ingeniero Roberto Fernández¹⁸ se elaboraron 19 diseños de mezclas distintos, variando la relación agua/cemento, procedencia de los agregados junto con sus dosificaciones y por consiguiente sus propiedades mecánicas dentro de la mezcla de concreto.

El diseño de mezcla óptimo que se propone en dicha investigación es el siguiente:

Tabla No 2. Diseño de mezcla óptimo de concreto permeable.

DISEÑO DE MEZCLA ÓPTIMO						
Parámetro	Relación Agua/cemento a/c	Relación Ag/c (Kg/Kg)	Plastificante/c (cc/Kg)	Af/Ag (%)	T Máx.	Procedencia
Valor recomendado	0,28 - 0,3	4,1/1 - 4,5/1	2 - 3 cm ³ / Kg de Cemento	<10%	12mm	Rio

Fuente. Fernández. Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad.

8.1.2 RELACION AF/AG

Para efecto del diseño de mezcla a emplear en esta investigación, se usaron parámetros conservadores de las relaciones antes mostradas de acuerdo a los resultados presentados en el trabajo del ingeniero Fernández¹⁹. Se estima que la relación entre los agregados (Af/Ag) deberá ser del 8% y que la procedencia del agregado será de rio, ya que los valores de resistencia a compresión y la permeabilidad tienden a tener mejor comportamiento.

¹⁸ Ibíd. P4

¹⁹ Ibíd. P4

Tabla No 3. Comparación de valores de resistencia a la compresión según la procedencia de los agregados gruesos.

		Procedencia	
		Río	Cantera
Resistencia	Promedio	10.5	5.30
	Mínima	3.33	4.12
	Máxima	17.8	7.16
	Desv. estándar	4.31	1.67
Permeabilidad (cm/s)	Promedio	1.50	1.49
	Mínima	1.27	1.39
	Máxima	1.77	1.63
	Desv. estándar	0.14	0.13

Fuente. Fernández, Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad.

8.1.3 ADITIVOS

La dosificación teórica que tenemos dentro de rango de 2 – 3 cm³/Kg de Cemento, se encuentra supeditada a las especificaciones de los fabricantes de aditivos para Colombia, por lo que para efectos del plastificante de la empresa Toxement - Eucon 300, la dosificación será de 2.5 cm³/Kg de Cemento.

8.1.4 CEMENTO

Por otra parte, la resistencia a compresión para muestras de concreto permeable encuentra su pico teórico en un rango de 0.28 – 0.30 en su relación agua cemento, como lo indica el estudio del ingeniero Fernández, y adicionalmente se estableció que la permeabilidad no se ve drásticamente afectada cuando se disminuye el parámetro A/c. por lo que el valor de la relación a/c será de 0.30.

8.1.5 DISEÑO DE MEZCLA

A partir de estos indicadores antes evaluados y determinados se llega al diseño de mezcla usado en esta investigación:

Tabla No 4. Determinación de diseño de mezcla óptimo

Parámetro	Relación Agua/cemento a/c	Relación Ag/c (Kg/Kg)	Plastificante/c (cc/Kg)	Af/Ag (%)	T máx.	Procedencia Agregado
Valor a usar	0,28	4,5	2,5 cm ³ / Kg de Cemento	8%	12mm	Rio

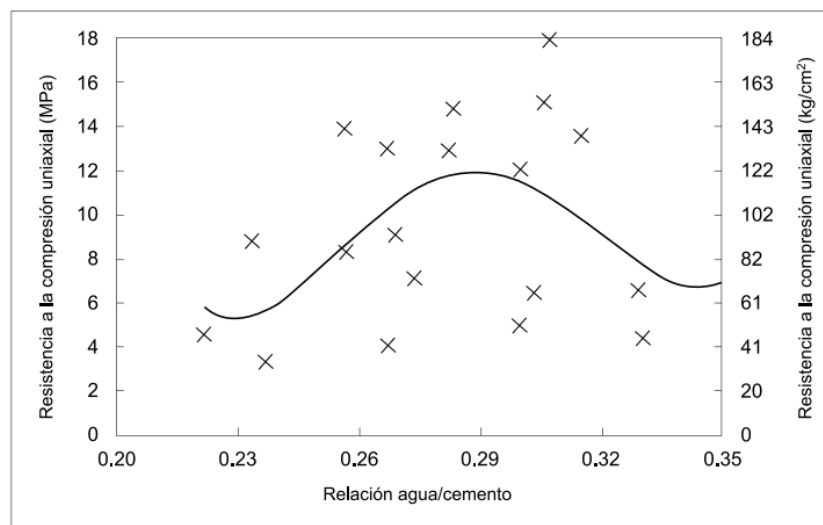
Fuente. Propia

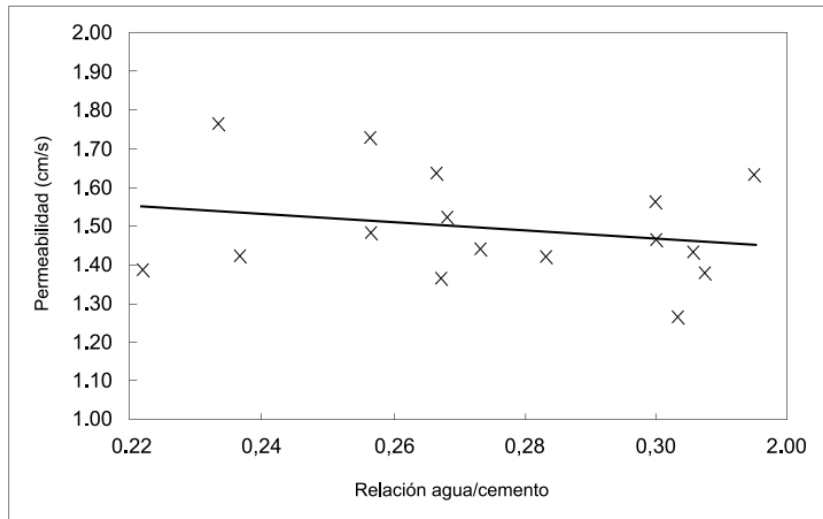
8.1.6 EVALUACIÓN DE DISEÑO DE MEZCLA

8.1.6.1 Antecedentes

El diseño de mezcla antes presentado, brinda la posibilidad de pensar en valores cercanos a los 21 Mpa en cuanto a resistencia a compresión se refiere para los prefabricados que se pretenden lograr, por lo que los valores propuestos de dosificación cumplen con las expectativas de funcionalidad del proyecto. Es claro que lograr resistencias altas, teniendo en cuenta las limitaciones de este tipo de material determina la viabilidad del concreto permeable como modelo útil de manejo hidráulico en vías.

Figura 10. Comparación de valores de resistencia a la compresión según la la relación w/c.





Fuente. Fernández. Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad.

Será alcance de otra investigación evaluar las demás variaciones que se puedan presentar dentro de los rangos establecidos para el diseño de mezcla óptimo, por lo que en la siguiente etapa de la investigación se determinarán las propiedades físicas de los materiales usados.

8.1.6.2 Trabajabilidad

Para determinar cómo será la trabajabilidad de la muestra y su consistencia, se realizó al diseño de mezcla la prueba de asentamiento por medio del cono de abrams; siguiendo los lineamientos de la NTC 396, se evidencio que la muestra posterior al retiro del cono permaneció en su posición.

Tener una relación agua/cemento tan baja hace que la trabajabilidad de la muestra sea muy mínima, y en este punto es importante decir que para poder configurar un elemento solido con concreto permeable, la compactación cumple un papel protagónico.

Figura No. 11 Prueba de asentamiento



Fuente. Propia

8.1.7 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS DE MATERIALES

8.1.7.1 Especificaciones del Cemento

El cemento usado en esta investigación es el que comercializa la empresa Cementos Argos con las siguientes especificaciones técnicas descritas en la tabla No. 5.

Tabla No 5. Especificaciones Técnicas Cemento gris de uso general Argos.

PARÁMETROS QUÍMICOS	ESPECIFICACIONES ARGOS	NTC 321 Tipo I	ASTM C-1157 TIPO GU.
Óxido de magnesio, MgO, máximo (%)	6.00	7.00	–
Trióxido de azufre, SO ₃ , máximo (%)	3.50	3.50	–
PARÁMETROS FÍSICOS	ESPECIFICACIONES ARGOS	NTC 121 Tipo I	ASTM C-1157 TIPO GU.
Fraguado inicial ⁽¹⁾ , mínimo (minutos)	45	45	45
Fraguado final ⁽¹⁾ , máximo (minutos)	420	480	420
Expansión autoclave, máximo (%)	0.8	0.8	0.8
Expansión en agua ⁽²⁾ , máximo (%)	0.02	–	0.02
Resistencia a 3 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	9.0	8.0	13.0
Resistencia a 7 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	16.0	15.0	20.0
Resistencia a 28 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	26.0	24.0	28.0
Blaine, mínimo (cm ² /gr)	2800	2800	–

(1) Ensayo con aguja de Vicat según NTC 118 (ASTM C191)

(2) Ensayo en barras de mortero a 14 días según NTC 4927 (ASTM 1038)

(3) Ensayo a compresión sobre cubos de mortero con arena normalizada según NTC 220 (ASTM C109)

Fuente: disponible en <http://goo.gl/dqhka8> Ficha técnica cemento gris de uso general.

8.1.7.2 Especificaciones Aditivo

Del mismo modo, el aditivo usado para la muestra, que es de tipo plastificante, comercializado por la empresa Toxement, será el Eucon 300 con especificaciones técnicas anexas a este documento.

8.1.7.3 Propiedades de los agregados.

- Granulometría

Los agregados a usar como se había especificado anteriormente, serán de procedencia de río, y con un tamaño máximo nominal de 12 mm. La gradación del material se realizó siguiendo el procedimiento establecido en la NTC 174. Para la determinación de la granulometría del agregado grueso, se realizaron las tomas de muestras pertinentes obteniendo los siguientes resultados:

Tabla No. 6 Análisis Granulométrico agregado grueso

Tamiz #	Tamaño en mm	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que pasa
3/4"	19	0	0	0	100
1/2"	12,7	50,4	5,04	5,04	94,96
3/8"	9,5	528,6	52,86	57,9	42,1
NO. 4	4,75	306,2	30,62	88,52	11,48
No. 8	2,36	114,8	11,48	100	0

Fuente. Propia

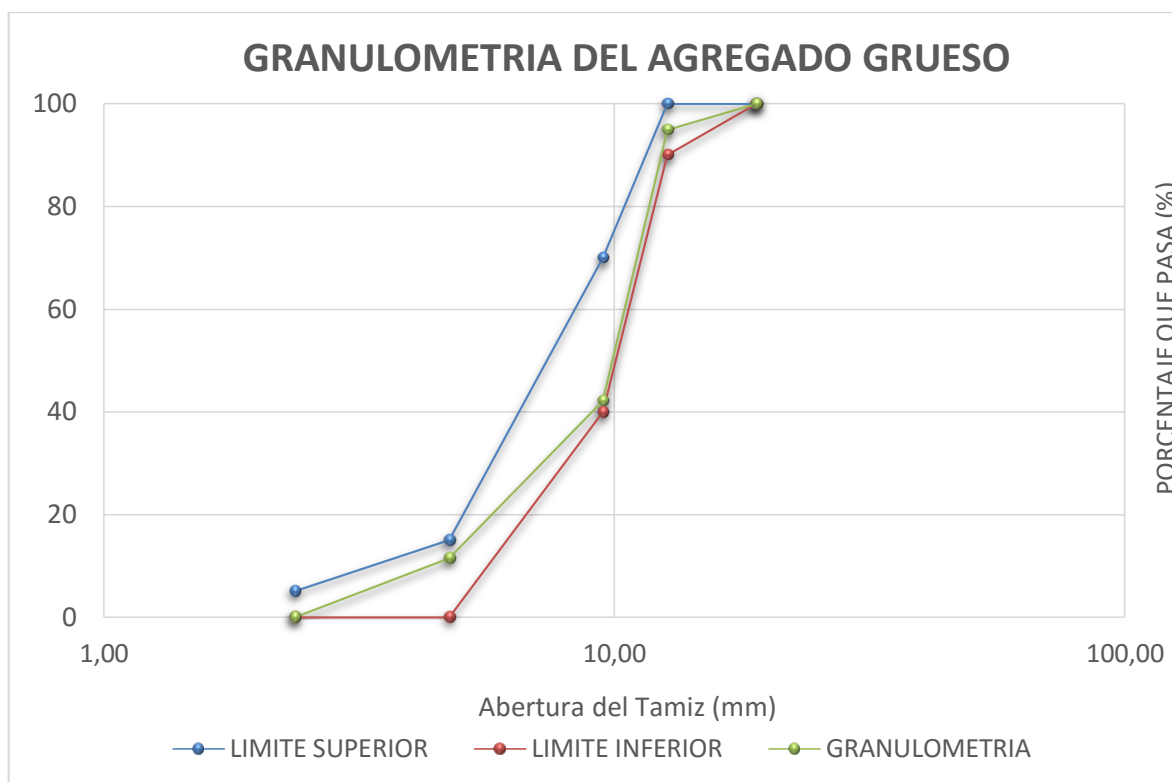
La NTC 174 exige que la granulometría para muestras de concreto, en cuanto a agregado grueso de refiere, se encuentre dentro de los siguientes límites:

Tabla No. 7 Rangos máximos y mínimos Para agregado grueso.

Tamiz	Abertura (mm)	Límite Superior	Límite Inferior
3/4"	19	100	100
1/2"	12,7	100	90
3/8"	9,5	70	40
NO. 4	4,75	15	0
No. 8	2,36	5	0

Fuente. Norma Técnica Colombiana, NTC 174.

Gráfica No. 1 Granulometría Agregado Grueso



Fuente propia.

En la gráfica no. 1 se observa que la granulometría cumple los estándares exigidos por la norma, y se procederá a evaluar el agregado fino. Para ello se determinó la granulometría obteniendo los siguientes resultados:

Tabla No. 8 Análisis Granulométrico agregado fino

Tamiz #	Tamaño en mm	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
3/8"	9,5	0	0	0	100
NO. 4	4,75	42,3	4,23	4,23	95,77
No. 8	2,36	155,2	15,52	19,75	80,25
No. 16	1,18	150,3	15,03	34,78	65,22
No. 30	0,6	245,2	24,52	59,3	40,7
No. 50	0,3	134,8	13,48	72,78	27,22
No. 100	0,15	173,3	17,33	90,11	9,89

Fuente. Propia

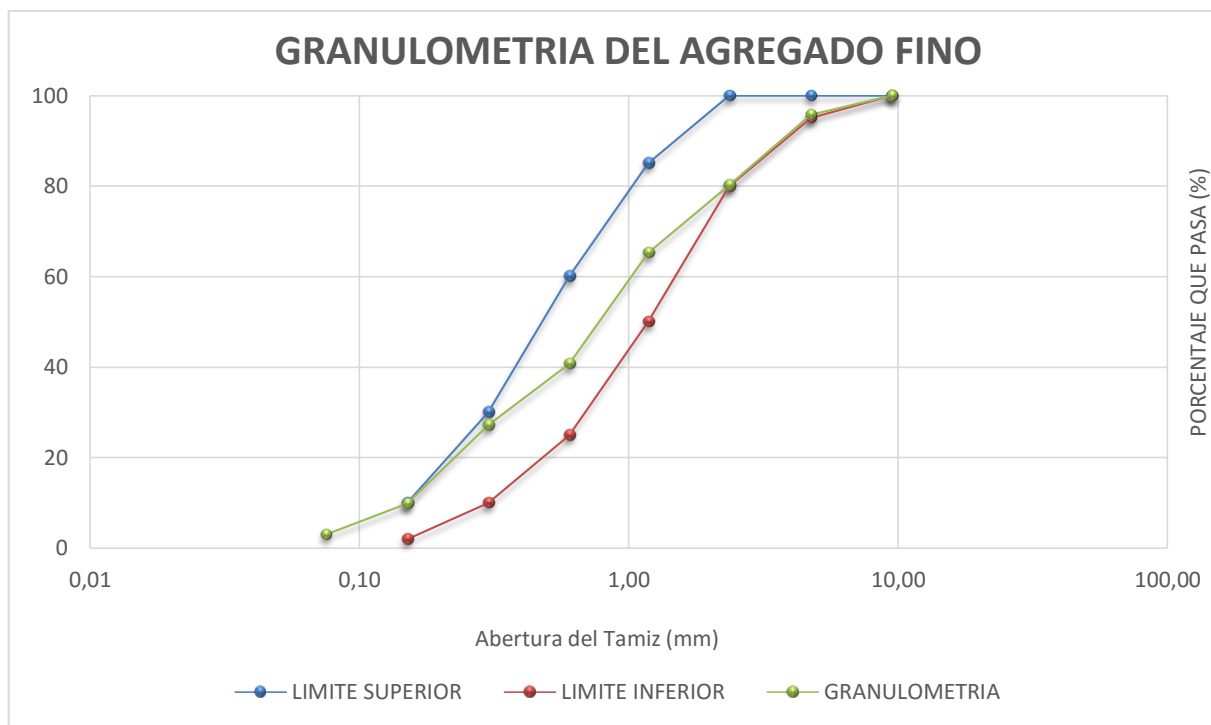
Siguiendo los mismos lineamientos de la granulometría de agregados gruesos, se evalúa si el agregado fino cumple con los límites establecidos en la NTC 174 teniendo en cuenta los siguientes rangos, en función del tamaño máximo nominal.

Tabla No. 9 Rangos máximos y mínimos para agregado fino..

Tamiz	Abertura (mm)	Límite Superior	Límite Inferior
3/8"	9,5	100	100
NO. 4	4,75	100	95
No. 8	2,36	100	80
No. 16	1,18	85	50
No. 30	0,6	60	25
No. 50	0,3	30	10
No. 100	0,15	10	2

Fuente. Norma Técnica Colombiana, NTC 174.

Gráfico No. 2 Granulometría agregado fino



Fuente. Propia

La gradación de la muestra cumple con los requerimientos pre establecidos en la fase anterior de la investigación para la evaluación de las características de gradación de la muestra, ya que cuenta con un tamaño máximo nominal de 12mm y las granulometrías se encuentran dentro de los rangos necesarios, el agregado es óptimo dentro de los requerimientos propios del proyecto y normativos.

8.1.7.4 Corrección de humedad agregados.

Para determinar la proporción de agua que se debe añadir o quitar a la dosificación final del diseño de muestra se deberá evaluar la absorción de los agregados y su contenido de humedad antes de ser fundidos los elementos de concreto permeable.

- Absorción de los agregados

Siguiendo lo establecido en la norma NTC 176 se obtuvieron los siguientes datos para el cálculo de la densidad y absorción del agregado grueso:

Tabla 10. Absorción agregado grueso

DETERMINACIÓN ABSORCIÓN DE AGREGADO GRUESO			
MUESTRA	1	2	PROMEDIO
PESO SECO (A)	2,03	2,12	2,08
PESO S.S.S. (B)	2,07	2,16	2,12
PESO SUMERGIDO (C)	1,26	1,42	1,34
CÁLCULOS			
PESO ESPECIFICO APARENTE: $G_s A/(B-C)$	2,51	2,86	2,69
PESO ESPECIFICO BULK: $B/(B-C)$	2,56	2,92	2,74
ABSORCIÓN: $(B-A)/A * 100$	1,97	1,89	1,93

Fuente. Propia

Adicionalmente, se procedió a determinar la densidad y absorción del agregado fino, según la norma NTC 237:

Tabla No. 11 Absorción agregado fino

DETERMINACION ABSORCIÓN DE AGREGADO FINO (gr/cm ³)			
MUESTRA	1	2	PROMEDIO
PESO MATERIAL SECO (A)	489	485	487
PESO PICNOMETRO + AGUA (B)	639	602	621
PESO PICNOMETRO + MATERIAL S.S.S + AGUA (C)	932	920	926
PESO MATERIAL S.S.S.(D)	500	500	500
CÁLCULOS			
PESO ESPECÍFICO APARENTE: $A/(A+B-C)$	2,49	2,90	2,70
PESO ESPECÍFICO BULK S.S.S: $D/(A+B-C)$	2,55	2,99	2,77
ABSORCIÓN: $(D-A)/A * 100$	2,25	3,09	2,67

Fuente. Propia

- Contenido de humedad

Como es sabido, la condición natural propia de los materiales antes de que puedan ser comercializados, en este caso los agregados, hace que presenten en cierto modo algunos valores de humedad natural en la muestra. Esto podría afectar las dosificaciones en la mezcla de concreto; por lo que es importante controlar y corregir la cantidad de agua dentro del diseño de mezcla, en función de cuánta agua absorberá el material pétreo y cuál es la humedad natural.

Procedemos a determinar la humedad natural de la muestra, de acuerdo a la metodología normalizada de la norma NTC 1776:

Tabla No. 12 Contenido de Humedad Natural

CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL				
Tipo de Agregado	Peso recipiente (g)	Recipiente + Muestra Húmeda (g)	Recipiente + Muestra Seca (g)	Contenido de Humedad (%)
Grueso	553,2	4958,6	4853,2	2,17%
Fino	559,4	2125,2	2015,3	5,45%

Fuente. Propia

Tabla No. 13 Cuadro resumen contenido de humedad y absorción de agregado

CUADRO RESUMEN CORRECCIÓN POR HUMEDAD		
Tipo de agregado	Contenido de Humedad	Absorción
Grueso	2,17%	1,93%
Fino	5,45%	2,67%

Fuente. Propia

8.1.7 CANTIDADES DE MATERIALES

Una vez ajustados los valores de la cantidad de agua que llevará la muestra de concreto permeable en función del ajuste propio de la humedad natural de la muestra y la absorción de los agregados, las cantidades para fundir 10 cilindros son las siguientes:

Tabla No. 14 Dosificación en diseño de mezcla de concreto permeable

CANTIDADES DE MATERIALES USADOS PARA LA MEZCLA OPTIMA DE CONCRETO PERMEABLE				
AGREGADO GRUESO (Kg)	AGREGADO FINO (Kg)	CEMENTO (Kg)	AGUA (cm3)	ADITIVO (Cm3)
29,60	2,37	6,58	1703,86	16,44

Fuente. Propia

8.2 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO MECÁNICOS DEL CONCRETO PERMEABLE.

8.2.1 MATRIZ DE ENSAYOS

Con el fin de validar los parámetros físico mecánicos del concreto permeable se define la matriz de ensayos a realizar y por ende el número y forma de los elementos que permitirán realizar dichas mediciones, de igual forma se relacionan las energías de compactación que se utilizaron para construir cada una de las muestras (Se relacionan dimensiones) y el tiempo al cual fueron sometidos a ensayos para realizar las correlaciones pertinentes, tal y como se observa en la siguiente tabla:

Tabla No. 15 Matriz De Ensayos Y Número De Elementos

Ensayos	Forma	características	Nivel de compactación	7 días	14 días	28 días	No. de probetas
resistencia a la compresión	CILINDROS (20CM X 10CM)	CURADOS	NC ALTO	3	3	3	27
			NC MEDIO	3	3	3	
			NC BAJO	3	3	3	
		NO CURADOS	NC ALTO	3	3	3	27
			NC MEDIO	3	3	3	
			NC BAJO	3	3	3	
resistencia a la flexión	VIGUETAS (50CM X 15CM X15 CM)	CURADOS	NC ALTO	3	3	3	9
			NC MEDIO	-	-	-	
			NC BAJO	-	-	-	
		SIN CURAR	NC ALTO	-	-	-	0
			NC MEDIO	-	-	-	
			NC BAJO	-	-	-	
Permeabilidad	CILINDROS (20CM X 10CM)	s/n	NC ALTO	Se utilizan los mismo de la resistencia a la compresión			0
			NC MEDIO				
			NC BAJO				

Fuente, Propia

8.2.2 ENERGIA DE COMPACTACIÓN

Una vez determinado el número de elementos que se necesitaban, se procedió a realizar el cálculo de la energía de compactación requerida para generar el nivel correspondiente, todo esto basado en las normatividades que rigen el proceso constructivo de prismáticos para la realización de ensayos, en la siguiente tabla se mencionan cada uno de ellos y los parámetros que se tuvieron en cuenta dependiendo directamente de la forma del prismático:

Tabla No. 16. Energía De Compactación Utilizada En Proceso Constructivo De Prismáticos.

PRISMÁTICOS CILÍNDRICOS		
ALTO	MEDIO	BAJO
Basados en la NTC 550, se plantea que la energía de compactación máxima o alta, será la producida por 75 golpes en el proceso de llenado de probetas, es decir, se sigue el procedimiento descrito en la norma aplicando 25 golpes repartidos en tres capas de 7 cm aproximadamente	Dicho que 75 golpes producen el 100% de la energía de compactación, se determinó que un nivel de compactación medio será la aplicación de la mitad de los goles, es decir, compactar utilizando 37 o 38 golpes y reduciéndolo a dos capas de 10 cm cada una.	Utilizando únicamente entre 5 y 10 golpes en el proceso de llenado de las probetas se logró este nivel de compactación, esto debido, a que la mezcla utilizada no es fluida, es necesario aplicar pocos golpes para garantizar la acomodación de las partículas que conforman la matriz de concreto.
PRISMÁTICOS RECTANGULARES		
ALTO	MEDIO	BAJO
Basados en la NTC 174, se plantea que la energía de compactación máxima o alta, será la producida por la aplicación de 54 golpes en el proceso de llenado de las formales para viguetas, aplicando 27 golpes por cada capa, siendo dos capas.	Dicho que, aplicando 54 golpes en dos capas, producen el 100% de la energía de compactación, se aplican la mitad de los golpes, igualmente en dos capas, esto con el fin de garantizar una buena distribución de las partículas.	Utilizando entre 7 y 15 golpes en el proceso de llenado de la formaleta, de igual forma garantizando la adecuada distribución de las partículas y buenos acabados.

Fuente, Propia

De esta forma quedando definidas las energías de compactación utilizadas, partiendo de esto se dirá que los porcentajes equivalentes a cada energía de compactación corresponde a:

Tabla No 17 Relación En Porcentaje De Las Energías De Compactación.

ENERGIA DE COMPACTACION ALTA	ENERGIA DE COMPACTACION MEDIA	ENERGIA DE COMPACTACION BAJA
100%	50%	7-12%

Fuente, Propia.

8.2.3 ANALISIS DE MUESTRAS EN FUNCION DE ENERGIAS DE COMPACTACIÓN

Tal y como se plantea en la matriz de ensayos realizadas, para determinar la resistencia máxima del concreto permeable o dicho de otra manera el esfuerzo máximo resistente, fueron utilizados 54 probetas cilíndricas.

Inicialmente fueron falladas 9 probetas a una edad de 7 días, que fueron curadas mediante el proceso de inmersión total y cada tercera parte correspondía a nivel de compactación, es decir, se fundieron 3 probetas para cada energía.

A estas probetas se le registraron deformaciones hasta el 40% de la carga máxima que soportan, es por esta razón, que la curva esfuerzo deformación, solo describe el comportamiento elástico del concreto permeable, siendo esto una de las primeras limitantes del proyecto, esto a razón de que no es posible describir el comportamiento plástico del material.

En las siguientes tablas se relacionan los registros de deformaciones, cargas y esfuerzo obtenidos para cada una de las energías de compactación:

Tabla No. 18 Energía De Compactación Alta.

RESUMEN NIVEL DE COMPACTACION ALTO					
Edad (días)	7	Área (mm2)	783834,4357	peso (kg)	3,326666667
é (deformación unitaria promedio)		Carga Promedio (Kn)		Esfuerzo (Mpa)	
0,0000		0,00		0,00	
0,0005		6,16		0,79	
0,0010		11,55		1,47	
0,0017		16,17		2,06	
0,0020		20,02		2,55	
0,0024		22,33		2,85	
0,0028		25,42		3,24	
0,0031		28,50		3,64	
0,0033		31,58		4,03	
0,0035		33,12		4,23	
0,0039		39,18		5,00	
0,0041		42,76		5,45	
0,0045		46,34		5,91	
0,0047		49,92		6,37	
Carga Máxima		105,36		13,44	

Fuente, Propia.

Tabla No 19. Energía De Compactación Media.

TABLA RESUMEN NIVEL DE COMPACTACION MEDIO					
Edad (días)	7	Área (mm2)	783842,8132	peso (kg)	3,176666667
é		Carga Promedio (Kn)		Esfuerzo (Mpa)	
0,0000		0,0		0,00	
0,0005		5,2		0,66	
0,0013		9,7		1,23	
0,0017		13,5		1,73	
0,0022		16,8		2,14	
0,0026		18,7		2,38	
0,0030		21,3		2,71	
0,0034		23,8		2,98	
0,0037		26,4		3,37	
0,0040		27,7		3,54	
0,0043		32,8		4,18	
0,0046		35,8		4,56	
0,0048		38,8		4,95	
0,0050		41,8		5,33	
Carga Máxima		85,9		10,96	

Fuente. Propia

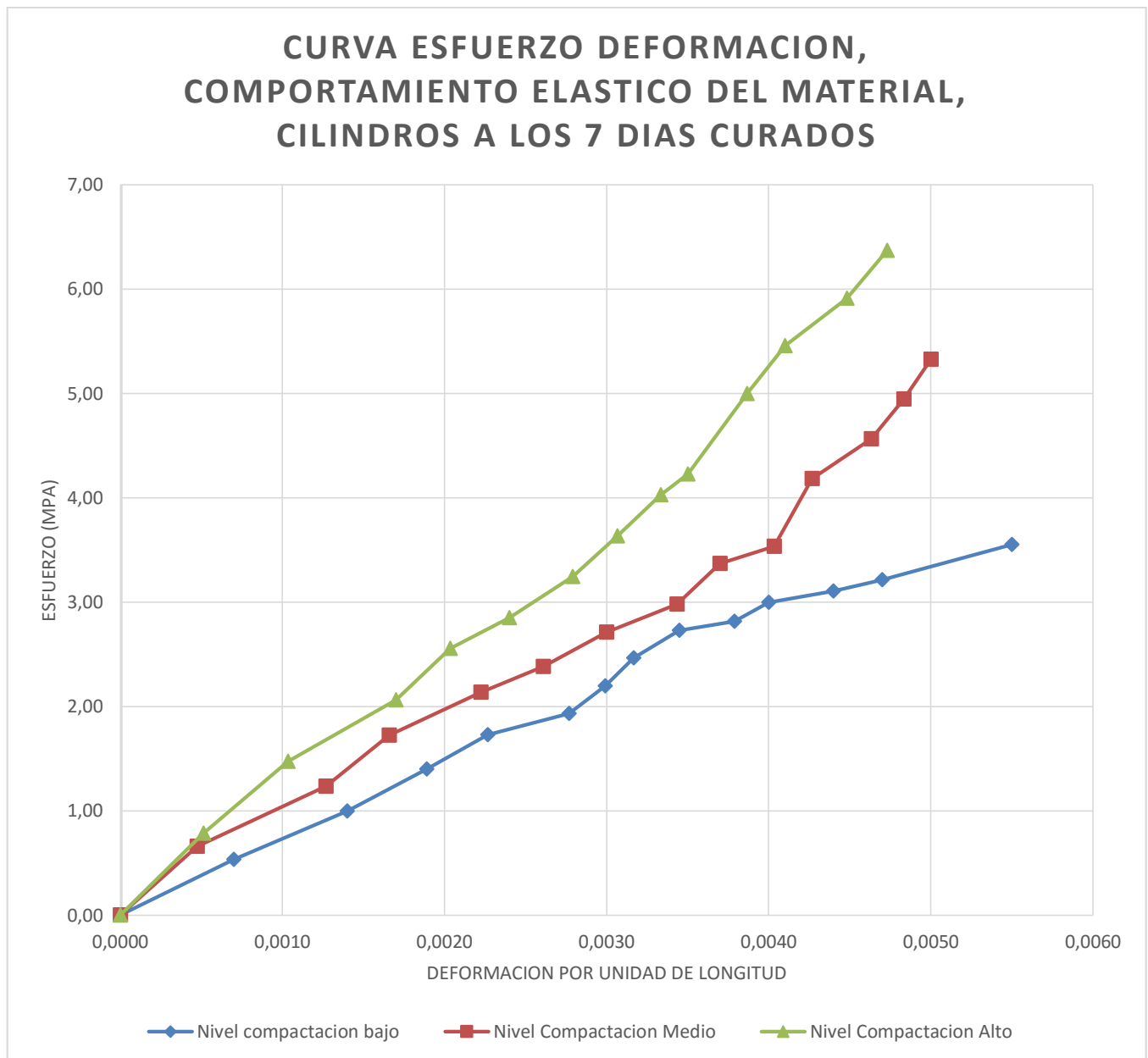
Tabla No. 20 Energía De Compactación Baja.

TABLA RESUMEN NIVEL DE COMPACTACION BAJO					
Edad (días)	7	Área (mm2)	775540,1074	peso (kg)	3,28
é		Carga Promedio (Kn)		Esfuerzo (Mpa)	
0,0000		0,00		0,00	
0,0026		4,13		0,53	
0,0014		7,74		1,00	
0,0019		10,84		1,40	
0,0023		13,42		1,73	
0,0028		14,97		1,93	
0,0030		17,03		2,20	
0,0032		19,10		2,46	
0,0034		21,16		2,73	
0,0038		21,84		2,82	
0,0040		23,26		3,00	
0,0044		24,10		3,11	
0,0047		24,93		3,22	
0,0055		29,27		3,55	
Carga Máxima		71,93333333		9,28	

Fuente Propia.

Se realiza el procesamiento de los datos, obteniendo los siguientes resultados:

Gráfico No. 3 Curva Esfuerzo Deformación A Los 7 Días Para Muestras Curadas.



Fuente, Propia

Se evidencia que la variación de la energía de compactación genera cambios bruscos en los esfuerzos que la muestra es capaz de soportar, la carga máxima que soporta el elemento con un nivel de compactación alto es de 13.44 Mpa, lo que se traduce en que el concreto permeable a los 28 días tendrá propiedades mecánicas similares a las del concreto convencional.

En el proceso de falla de los elementos con un nivel de compactación bajo a una edad de 7 días, específicamente en la muestra No. 26 se presentó un fenómeno

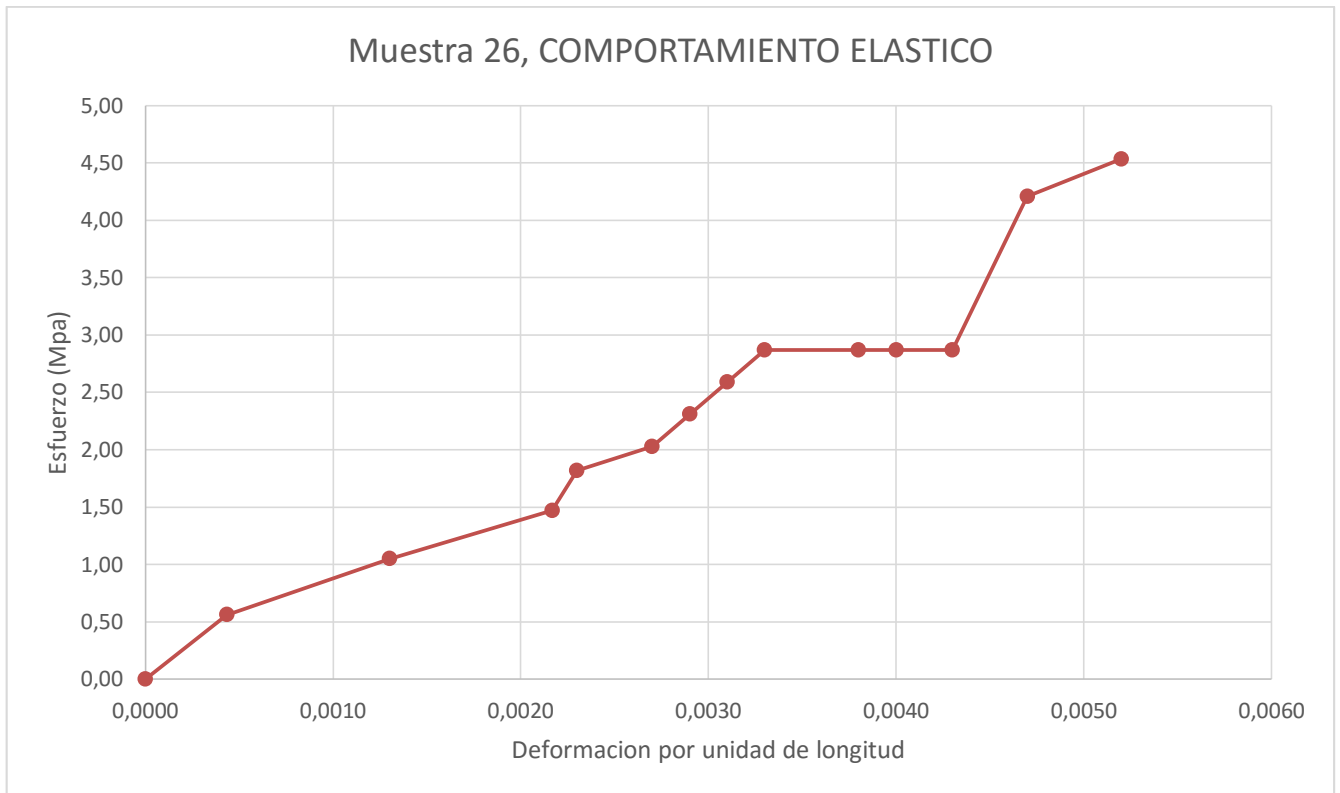
curioso en donde la muestra se comportaba como un material dúctil, es decir, se deformaba a carga constante, tal y como se observa en la siguiente tabla:

Tabla No. 21 Esfuerzo Vs Deformación.

NIVEL DE COMPACTACION BAJO					
Cilindro No.	26	Edad (días)	7	Peso (kg)	3,275
altura (mm)	1995	radio (mm)	496	área (mm ²)	772882,0583
é			carga (Kn)		Esfuerzo (Mpa)
0,0000			0,00		0,00
0,0004			4,32		0,56
0,0013			8,11		1,05
0,0022			11,35		1,47
0,0023			14,05		1,82
0,0027			15,67		2,03
0,0029			17,83		2,31
0,0031			20,00		2,59
0,0033			22,16		2,87
0,0038			22,16		2,87
0,0040			22,16		2,87
0,0043			22,16		2,87
0,0047			32,51		4,21
0,0052			35,03		4,53
Carga Máxima			73,60		9,52

Fuente Propia

Gráfico No 4. Curva Esfuerzo Deformación, Zona Elástica.



Fuente propia.

Al graficar los datos, se observa la constante en los esfuerzos, esto se atribuye a la poca energía de compactación que tenía la muestra y que alcanza ciertas resistencias residuales luego de que las partículas se reacomodan dentro de la matriz de concreto; luego de que ocurría este fenómeno el material alcanzaba su resistencia máxima rápidamente.

Seguido esto se repite el mismo proceso, con el mismo número de elementos y se realiza el ensayo a los 14 días, de esto se obtuvo que:

Tabla No 22. Energía De Compactación Alta.

TABLA RESUMEN NIVEL DE COMPACTACION ALTO					
Edad (dias)	14	Area (mm2)	769176,3717	peso (kg)	3,046666667
é		Carga Prom (Kn)		Esfuerzo (Mpa)	
0,0000		0,00		0,00	
0,0003		6,96		0,91	
0,0010		13,06		1,70	
0,0016		18,28		2,38	
0,0021		22,63		2,94	
0,0023		25,25		3,28	
0,0028		28,73		3,73	
0,0032		32,21		4,19	
0,0033		35,69		4,64	
0,0034		37,43		4,87	
0,0035		44,28		5,76	
0,0038		48,33		6,28	
0,0041		52,37		6,81	
0,0043		56,42		7,34	
Carga Máxima		127,60		16,59	

Fuente, Propia.

Tabla No 23. Energía De Compactación Media

TABLA RESUMEN NIVEL DE COMPACTACION MEDIO					
Edad (dias)	14	Area (mm2)	784359,867	peso (kg)	3,143333333
é		Carga Prom (Kn)		Esfuerzo (Mpa)	
0,0000		0,0		0,00	
0,0004		5,5		0,71	
0,0009		10,3		1,33	
0,0018		14,4		1,87	
0,0023		17,8		2,31	
0,0026		19,8		2,58	
0,0032		22,6		2,94	
0,0034		25,3		3,29	
0,0037		28,1		3,65	
0,0039		29,4		3,82	
0,0041		34,8		4,52	
0,0044		38,0		4,94	
0,0045		41,2		5,35	
0,0047		44,3		5,77	
Carga Máxima		106,0		13,79	

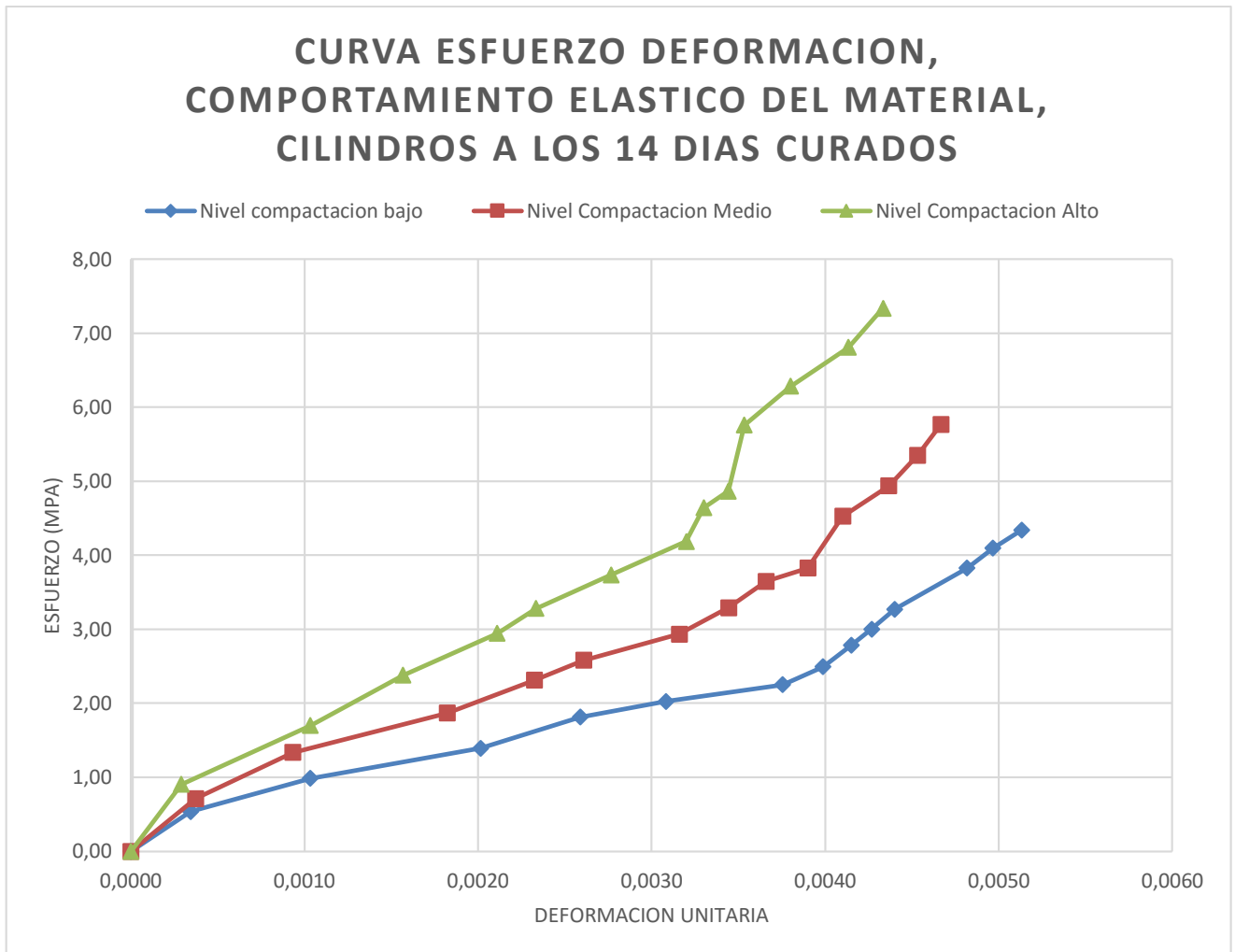
Fuente, Propia

Tabla No. 24. Energía De Compactación Baja.

TABLA RESUMEN NIVEL DE COMPACTACION BAJO					
Edad (dias)	28	Area (mm2)	780920,5456	peso (kg)	3,043333333
ϵ		Carga Prom (Kn)		Esfuerzo (Mpa)	
0,0000		0,00		0,00	
0,0003		4,19		0,54	
0,0010		7,68		0,98	
0,0020		10,88		1,39	
0,0026		14,15		1,81	
0,0031		15,80		2,02	
0,0038		17,58		2,25	
0,0040		19,46		2,49	
0,0041		21,74		2,78	
0,0043		23,42		3,00	
0,0044		27,53		3,27	
0,0048		29,88		3,83	
0,0050		31,99		4,10	
0,0051		33,90		4,34	
Carga Máxima		88,2615		11,30	

Fuente, Propia.

Gráfico No. 5 Curva Esfuerzo Vs Deformación A Los 14 Días Para Muestras Curadas



Fuente, Propia

Se observa que la influencia del nivel de compactación en la resistencia del material es muy alta, además, que el material con el pasar de los días va adquiriendo más rigidez disminuyendo en escalas muy pequeñas la capacidad de deformación del concreto permeable.

Por ultimo en esta etapa, se realizaron los ensayos sobre los cilindros a los 28 días, edad que la que teóricamente el concreto ha desarrollado entre el 85 y 95 por ciento de la resistencia máxima la cual será un parámetro de entrada para la realización del diseño que se desee.

Los datos obtenidos fueron:

Tabla No. 25 Nivel De Compactación Alta

TABLA RESUMEN NIVEL DE COMPACTACION ALTO					
Edad (días)	28	Área (mm2)	778403,0827	peso (kg)	3,316666667
ε		Carga Promedio (Kn)		Esfuerzo (Mpa)	
0,0000		0,00		0,00	
0,0003		8,47		1,09	
0,0012		15,88		2,04	
0,0016		22,23		2,86	
0,0020		27,52		3,54	
0,0024		30,69		3,94	
0,0029		34,93		4,49	
0,0030		39,16		5,03	
0,0031		43,39		5,57	
0,0033		45,51		5,85	
0,0036		53,83		6,92	
0,0038		58,75		7,55	
0,0041		63,67		8,18	
0,0043		68,59		8,81	
Carga Máxima		156,10		20,05	

Se denota, que con un nivel de compactación alto el concreto permeable a una edad de 28 días, tiene resistencia muy similar a la del concreto convencional.

Tabla No 26. Nivel De Compactación Medio

TABLA RESUMEN NIVEL DE COMPACTACION MEDIO					
Edad (días)	28	Area (mm2)	776007,943	peso (kg)	3,16
é		Carga Prom (Kn)		Esfuerzo (Mpa)	
0,0000		0,0		0,00	
0,0004		7,5		0,97	
0,0010		14,1		1,82	
0,0019		19,8		2,54	
0,0024		24,5		3,15	
0,0027		27,3		3,51	
0,0034		31,1		3,99	
0,0035		34,9		4,48	
0,0036		38,6		4,96	
0,0040		42,1		5,41	
0,0041		48,6		6,24	
0,0043		53,0		6,81	
0,0044		57,5		7,39	
0,0046		62,0		7,96	
Carga Máxima		135,7		17,43	

Fuente, Propia.

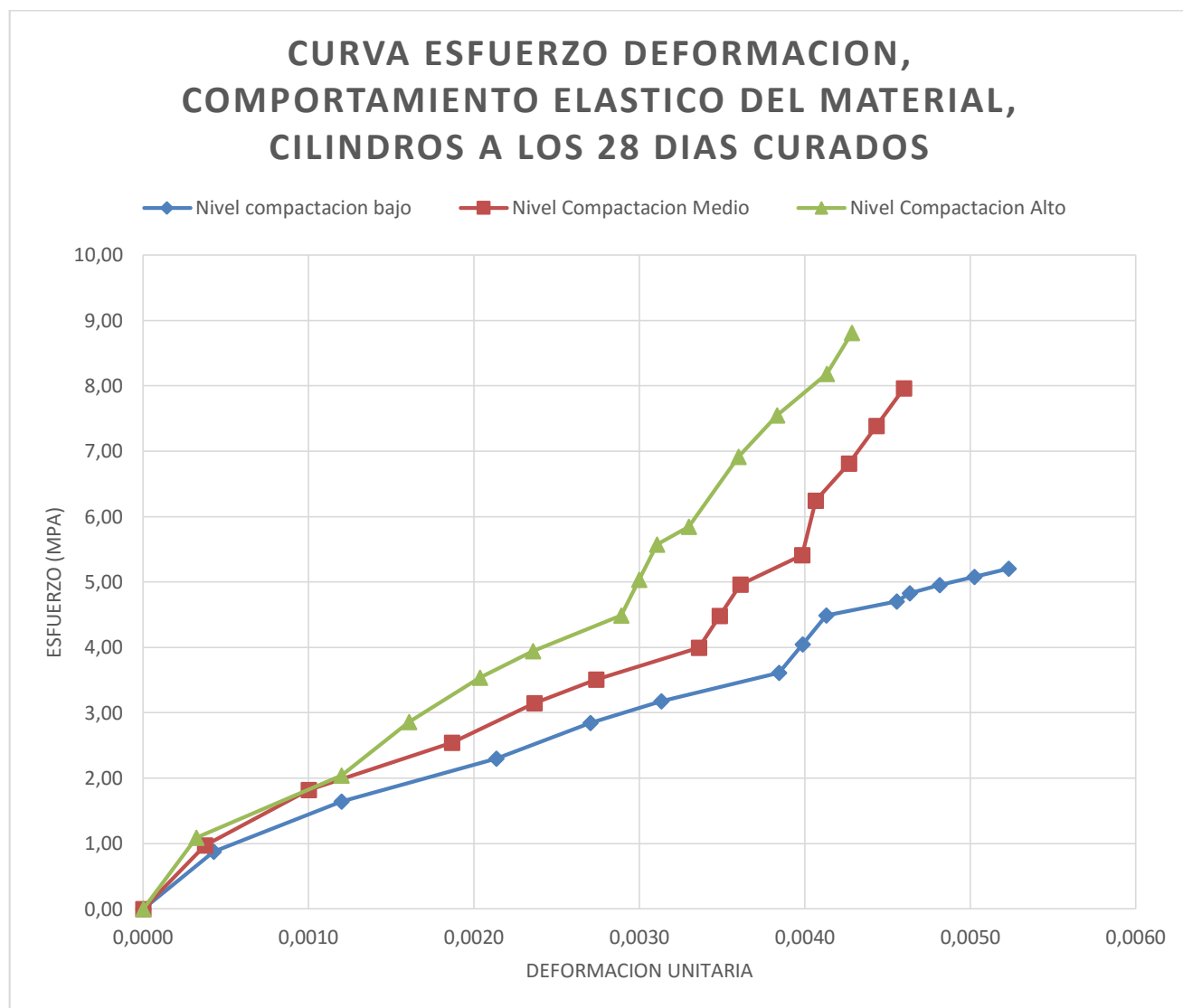
Tabla No. 27. Nivel De Compactación Bajo.

TABLA RESUMEN NIVEL DE COMPACTACION BAJO					
Edad (días)	28	Area (mm2)	775540,1074	peso (kg)	3,28
é		Carga Promedio (Kn)		Esfuerzo (Mpa)	
0,0000		0,00		0,00	
0,0004		6,81		0,88	
0,0012		12,78		1,64	
0,0021		17,89		2,30	
0,0027		22,14		2,84	
0,0031		24,70		3,17	
0,0038		28,11		3,61	
0,0040		31,51		4,05	
0,0041		34,92		4,49	
0,0046		36,62		4,70	
0,0046		36,62		4,83	
0,0048		36,96		4,96	
0,0050		38,55		5,08	
0,0052		40,52		5,21	
Carga Máxima		97,7		12,55	

Fuente, Propia.

A continuación, se relaciona el procesamiento de los datos anteriormente descritos:

Gráfico No. 6 Curva Esfuerzo Vs Deformación A Los 28 Días Para Muestras Curadas



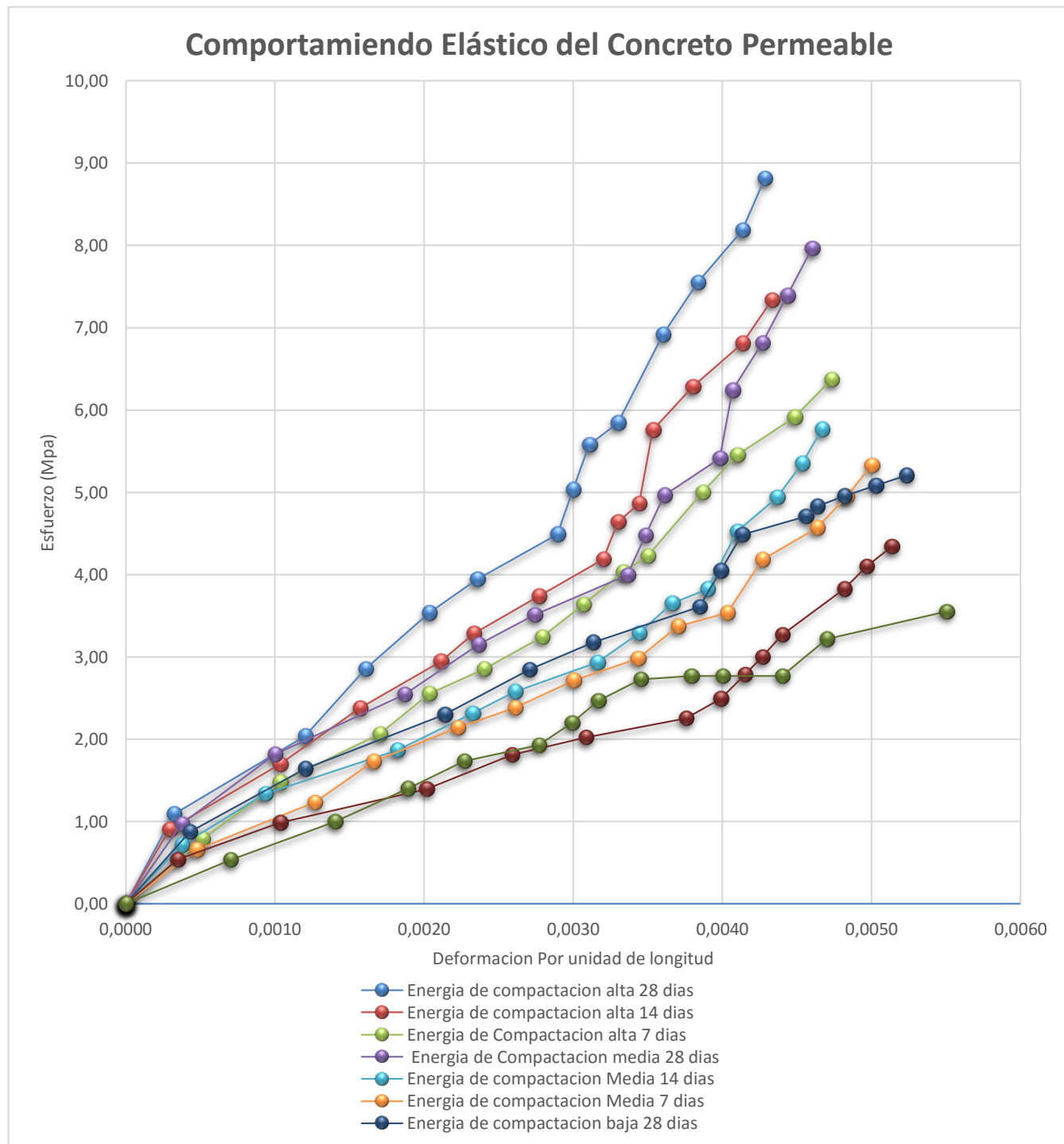
Fuente, Propia

Las muestras curadas y falladas a los 28 días, son las que mostrarán más propiamente cómo será el comportamiento real de las muestras de concreto permeable. Se observa que el nivel de compactación alto es el que nos arroja mejores resultados en cuanto a resistencia a la compresión se refiere; el esfuerzo máximo alcanzado fue de 20.05 Mpa.

Con el fin de correlacionar los datos obtenidos a distintas edades y distintos niveles de compactación se realiza el siguiente gráfico, el cual nos muestra cual es

comportamiento elástico esperado del concreto permeable en esta investigación desarrollada.

Grafica No 7. Comportamiento Elástico Del Concreto Permeable A Diferentes Edades.



Fuente, Propia.

Se realizó el mismo procedimiento para cilíndricos (27 unidades), fallándolos a las mismas edades; al ser condiciones de diseño la resistencia obtenida a los 28 días se plantea que es importante curar el concreto permeable utilizando cualquier método, esto debido a que el no hacerlo produce reducciones en la resistencia máxima del concreto que oscilan entre el 7% y 15% tal y como se muestra en las siguientes graficas que corresponden a la energía de compactación alta, media y baja.

Tabla No. 28. Energía De Compactación Alta

TABLA RESUMEN NIVEL DE COMPACTACION ALTO					
Edad (días)	28	Area (mm2)	785401,8286	peso (kg)	3,22
é		Carga Prom (Kn)		Esfuerzo (Mpa)	
0,0000		0		0,00	
0,0002		6,4		0,81	
0,0016		12,01		1,53	
0,0019		16,85		2,15	
0,0020		21,2		2,70	
0,0023		23,5		2,99	
0,0027		26,7		3,40	
0,0031		29,95		3,81	
0,0033		34,5		4,39	
0,0035		35,8		4,56	
0,0037		40,9		5,21	
0,0038		44,75		5,70	
0,0042		48,45		6,17	
0,0045		51,2		6,52	
Carga Maxima		133,00		16,93	

Fuente Propia

Tabla No 29 Energía De Compactación Media

TABLA RESUMEN NIVEL DE COMPACTACION MEDIO					
Edad (días)	28	Área (mm2)	780175,7892	peso (kg)	3,023333333
é		Carga Prom (Kn)		Esfuerzo (Mpa)	
0,0000		0		0,00	
0,0003		5,1		0,65	
0,0009		9,6		1,22	
0,0017		13,2		1,68	
0,0027		16,45		2,09	
0,0032		18,3		2,33	
0,0034		20,8		2,65	
0,0036		23,5		2,99	
0,0039		26		3,31	
0,0040		28,2		3,59	
0,0042		32,8		4,18	
0,0045		36,7		4,67	
0,0046		38,9		4,95	
0,0050		42,5		5,41	
Carga Máxima		118,0		15,02	

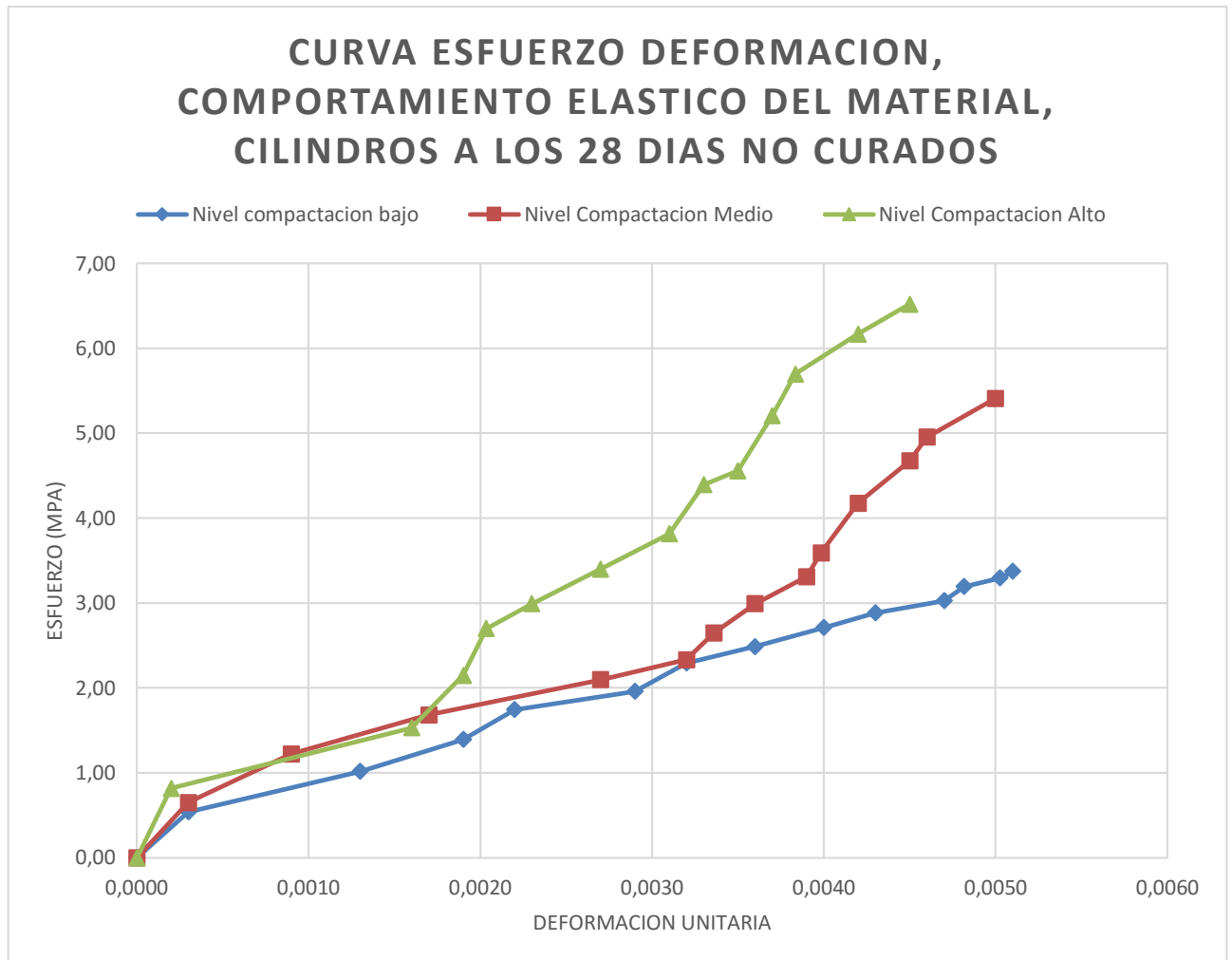
Fuente Propia

Tabla No 30. Energía De Compactación Baja

TABLA RESUMEN NIVEL DE COMPACTACION BAJO					
Edad (días)	28	Área (mm2)	776630,2401	peso (kg)	3,068333333
é		Carga Prom (Kn)		Esfuerzo (Mpa)	
0,0000		0		0,00	
0,0003		4,18		0,54	
0,0013		7,9		1,02	
0,0019		10,8		1,39	
0,0022		13,55		1,74	
0,0029		15,2		1,96	
0,0032		17,8		2,29	
0,0036		19,3		2,49	
0,0040		21,05		2,71	
0,0043		22,4		2,88	
0,0047		23,5		3,03	
0,0048		24,8		3,19	
0,0050		25,6		3,30	
0,0051		26,2		3,37	
Carga Máxima		95		11.06	

Fuente Propia.

Gráfico No 8. Curva Esfuerzo Vs. Deformación. Descripción Del Comportamiento Elástico Del Concreto Permeable No Sometido A Procesos De Curado.

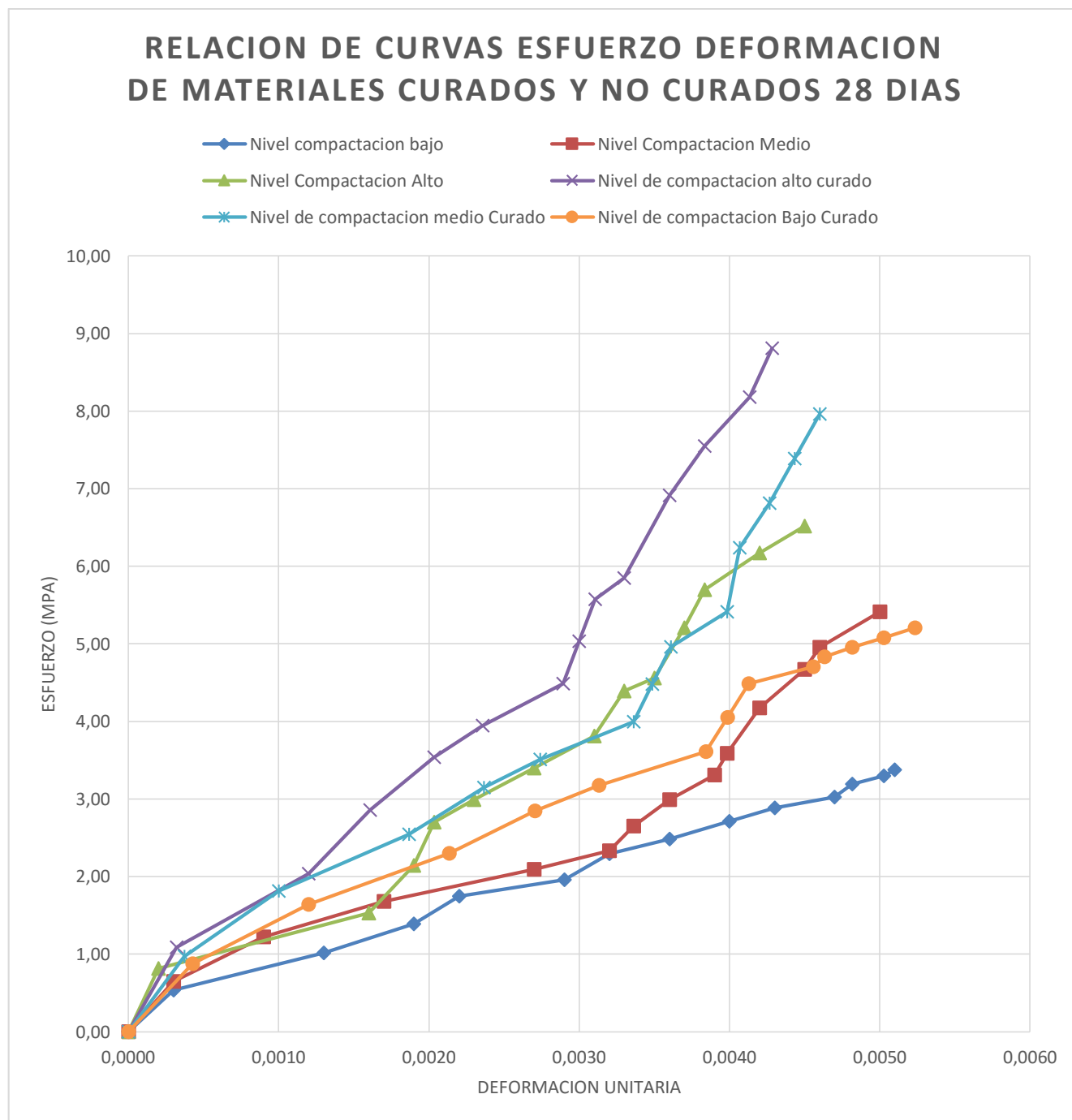


Fuente, Propia

Es evidente que la resistencia se reduce drásticamente, dado que en este caso la resistencia máxima obtenida fue de 16.93 Mpa, es decir, se alcanzan reducciones en la resistencia de hasta el 15%.

Visto esto, en la siguiente grafica se relacionan las resistencias obtenidas a los 28 días para cilindros curados y no curados.

Gráfico No 9. Relación Entre Comportamientos Elásticos De Concretos Permeables Curados Y No Curados



Fuente Propia.

8.2.3 Mediante el análisis de las curvas esfuerzo deformación que describen el comportamiento elástico del material es posible obtener más parámetros mecánicos importantes en la caracterización del material como, por ejemplo:

8.2.3.1 Modulo de elasticidad, el módulo de elasticidad fue obtenido de la pendiente de las curvas desarrolladas para los cilindros fallados a los 28 días, dichos módulos de elasticidad son:

Tabla No 31 Módulos De Elasticidad Por Energías De Compactación.

Energía de compactación	%	Módulo de elasticidad (Mpa)
ALTO	100	16119,80149
MEDIO	50	15029,73054
BAJO	10	12753,3525

Fuente, Propia

Calculados estos módulos de elasticidad de esta manera, realizamos la correlación de los mismo mediante la utilización de la guía para el diseño de estructuras de pavimento AASHTO del año de 1993²⁰, la cual correlaciona el origen del agregado, con la resistencia máxima a la compresión y el módulo de elasticidad.

Ecuación No. 4

$$E(Mpa) = 3600 X \sqrt{f^c}$$

Donde:

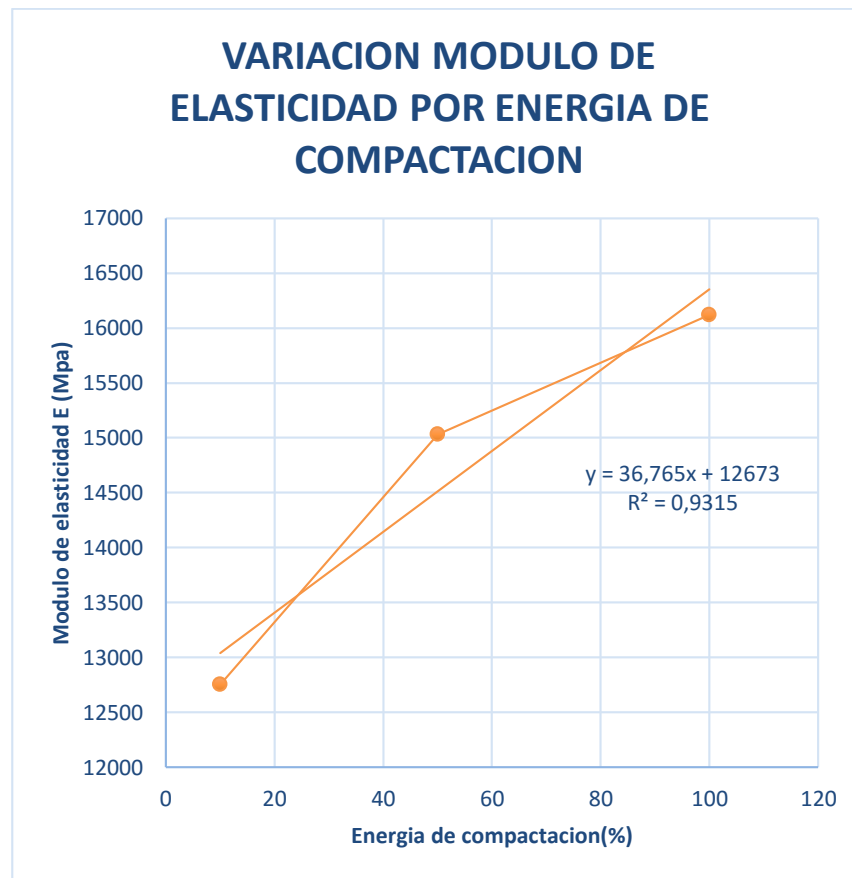
E= Módulo de Elasticidad

f^c = Resistencia concreto

Realizados los cálculos tenemos que los módulos de elasticidad son muy similares, también que, a mayor energía de compactación, mayor resistencia y por ende mayor módulo de elasticidad.

²⁰ Norma AASHTO, Estructuras de pavimento, 1993.

Gráfico No 10. Variación Del Módulo De Elasticidad Por Energía De Compactación



Fuente Propia.

8.2.3.2 Por otra parte, fueron registradas deformaciones horizontales para algunas probetas con el fin de calcular la relación de poisson, de esto se obtuvo que:

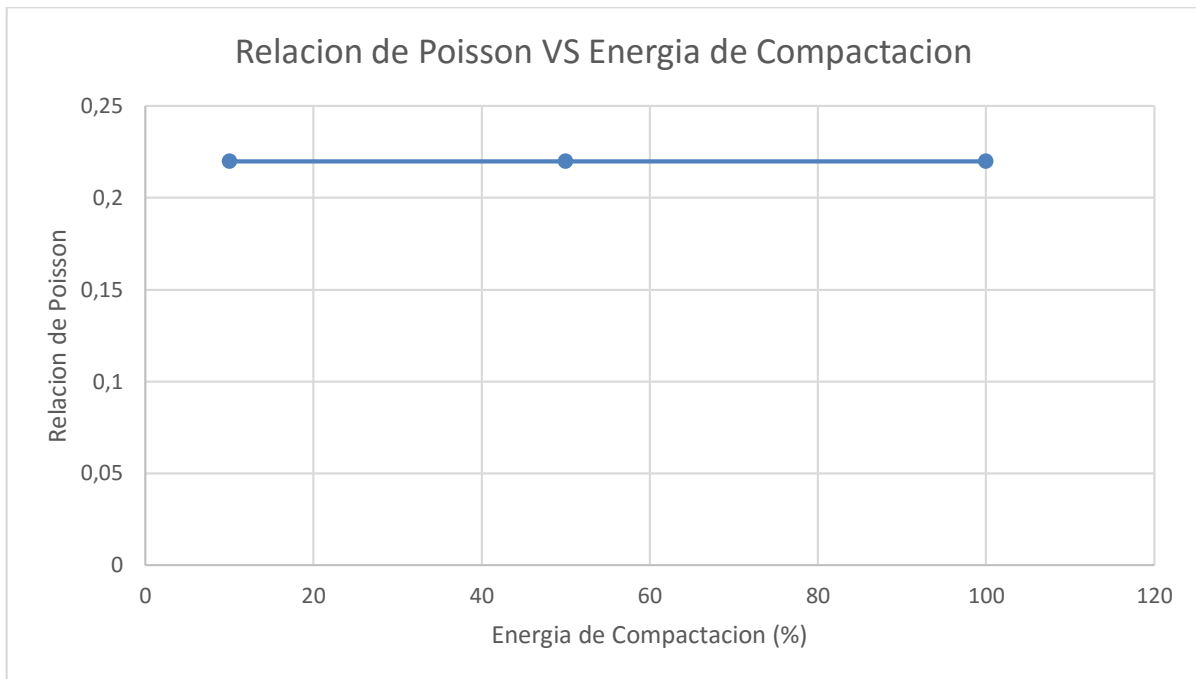
Tabla No 32. Relación De Poisson En Función De La Energía De Compactación.

Relación de poisson	Energía de compactación (%)
0,22	100
0,22	50
0,22	10

Fuente, Propia.

Es decir, que el nivel de compactación que se utilice no afecta la capacidad de deformación del elemento, vemos que dicha relación es muy similar a la del concreto convencional, esto nos guía a que el concreto permeable es un concreto 100% funcional en cuanto al comportamiento mecánico se refiere.

Gráfico No. 11. Variación De La Relación De Poisson Energía De Compactación.



Fuente Propia.

8.2.3.3 Al correlacionar los datos anteriormente obtenidos, tenemos que el módulo de rigidez del concreto permeable, aplicando la ecuación No. 2 para cada nivel de compactación es:

$$G(\text{Energia de Compactacion alta}) = \frac{E}{2(1 + \nu)} = \frac{16119.80149 \text{ MPA}}{2(1 + 0.22)} = 9833.0789$$

$$G(\text{Energia de Compactacion Media}) = \frac{E}{2(1 + \nu)} = \frac{15029.73054}{2(1 + 0.22)} = 9168.1356$$

$$G(\text{Energia de Compactacion Baja}) = \frac{E}{2(1 + \nu)} = \frac{12753.3525}{2(1 + 0.22)} = 7779.5450$$

8.2.4. DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD.

Basados en la teoría del análisis de suelos en donde para los materiales granulares es indicado realizar un ensayo de permeabilidad de carga constante, dada la dificultad de medir los parámetros del ensayo por las altas velocidades de descarga que presentan estos materiales, se procede por este método a evaluar las

características hidráulicas de las muestras; dicho ensayo puede ser adaptado para realizar las mediciones como lo es en este caso.

El método consiste en generar una lámina de agua constante al material, una vez constante se procede a realizar la medida del volumen de salida en un tiempo determinado y remplazando en la siguiente ecuación tendremos:

Ecuación No. 5

$$K = \frac{VL}{AHt}$$

Donde:

K=conductividad hidráulica

V= volumen de agua medido en la zona de salida (cm³)

L= longitud de la muestra

A= área de la muestra de suelo, en este caso concreto

H= altura medida desde la lámina de agua superior hasta la zona de salida, dicho de otra forma, es la diferencia del nivel entre el reservatorio superior e inferior (cm)

t= intervalo de tiempo entre el descenso

Figura No 12. Modelo utilizado para Mediciones de Velocidades de Infiltración



Fuente, Propia

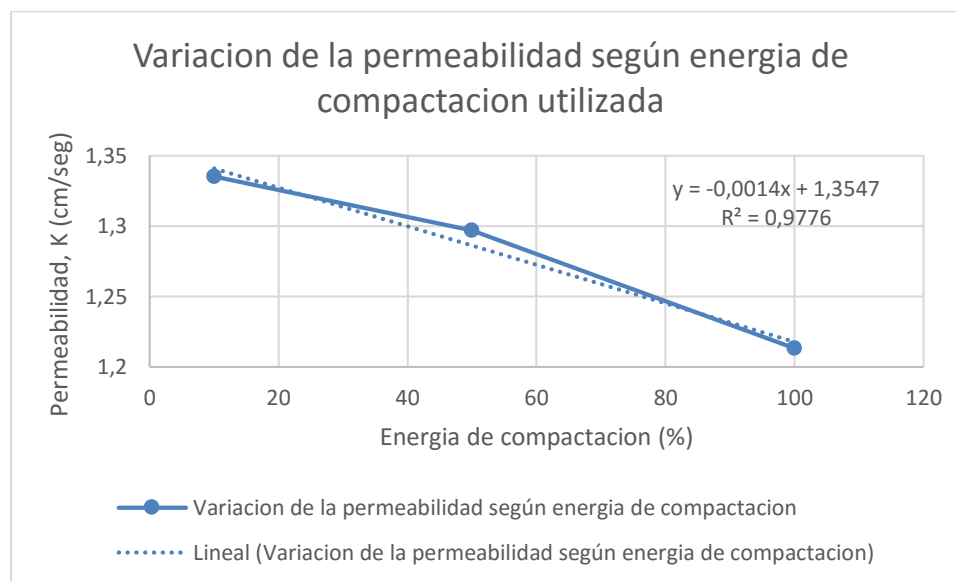
Una vez ajustado del modelo, se procedió a realizar las mediciones para unas probetas cilíndricas (las mismas utilizadas para realizar el ensayo de resistencia a la compresión) de 20cm x 10 cm, dichas mediciones se realizaron a tres (3) probetas que fueron fundidas utilizando los grados de compactación anteriormente descritos, de esto se obtuvo:

Tabla No 33. Variación De La Permeabilidad Según Energía De Compactación.

Probeta No.	Energía de compactación empleada (%)	K (cm/seg)
Muestra 1	100	1.098
muestra 2	50	1.185
Muestra 3	10	1.236

Fuente, Propia

Gráfico No 12. Variación De La Permeabilidad Según La Energía De Compactación Utilizada Para La Construcción De Cada Muestra.



Fuente propia.

Se observa que las variaciones de los datos tienen una tendencia lineal y por ende la ecuación que mejor se ajusta al comportamiento de la variación de la permeabilidad según la energía de compactación es una recta, la pendiente es muy baja, lo que indica que la variación de la permeabilidad en función del nivel de compactación mínima.

Ahora observamos que influencia tiene la permeabilidad en propiedades mecánicas como el esfuerzo máximo y el módulo de elasticidad.

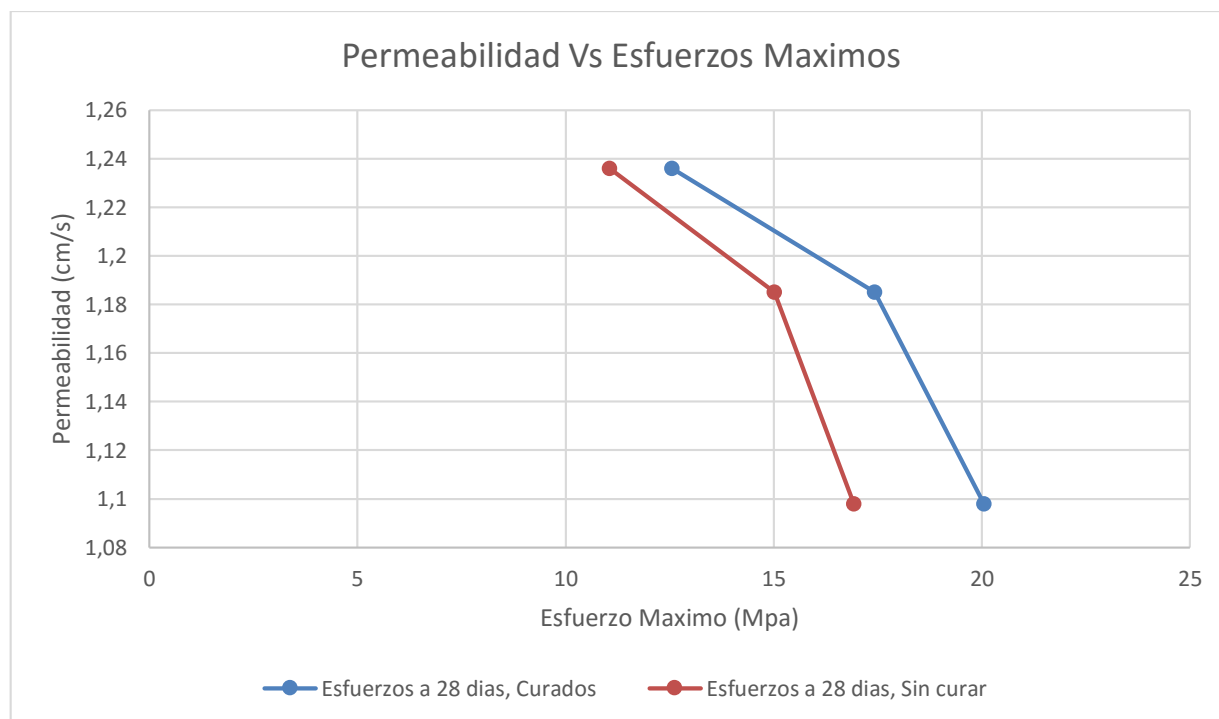
En primera estancia la relación que tiene la permeabilidad con los esfuerzos máximos obtenidos en cilindros curados (C) y no curados (NC) a los 28 días.

Tabla No. 34. Variación Del Esfuerzo Máximo En Función De La Permeabilidad.

PERMEABILIDAD (Cm/s)	Energía de compactación	ESFUERZO MÁXIMO 28D C (Mpa)	ESFUERZO MÁXIMO 28D NC (Mpa)
1,098	100	20,05387741	16,93
1,185	50	17,42884499	15,02
1,236	10	12,55133775	11,06

Fuente, Propia.

Gráfico No. 13. Permeabilidad Vs Esfuerzos Máximos.



Fuente propia.

De la gráfica anterior vemos que, a mayor permeabilidad, menores serán los esfuerzos máximos, aunque es válido resaltar que dichos esfuerzos dependen directamente del nivel de compactación utilizado y no de la permeabilidad, porque el nivel de compactación no afecta las velocidades de infiltración de la muestra.

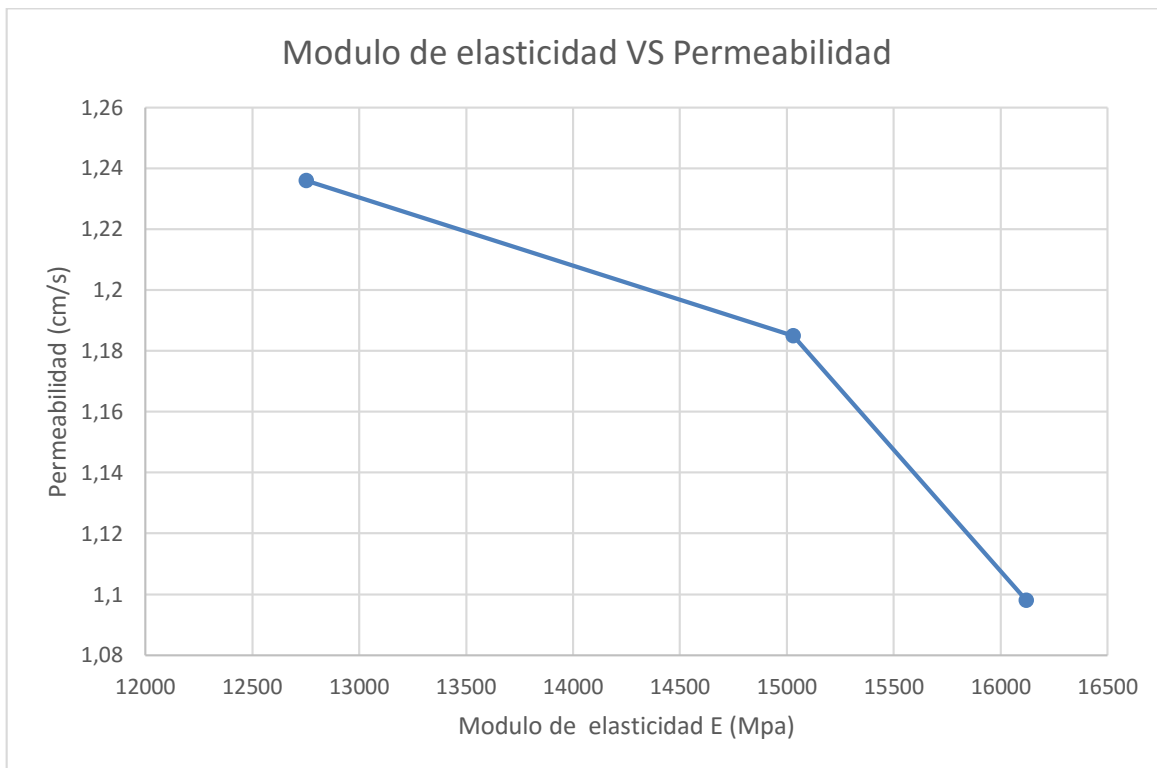
Por otra parte, se analiza si la permeabilidad tiene influencias en el módulo de elasticidad en probetas curadas y falladas a los 28 días.

Tabla No. 35. Relación Entre Permeabilidad Y Modulo de Young.

Módulo de elasticidad (E Mpa)	permeabilidad (cm/s)	Energía de compactación (%)
16119,80149	1,098	100
15029,73054	1,185	50
12753,3525	1,236	10

Fuente propia.

Gráfico No. 14. Permeabilidad Vs Módulo De Elasticidad



Fuente, Propia.

A módulos de elasticidad más altos, menor será la permeabilidad, igualmente se le atribuye este comportamiento a las energías de compactación utilizadas para la construcción de cada una de las probetas.

8.2.6 DETERMINACIÓN DE MÓDULO DE ROTURA

El módulo de rotura es un parámetro importante dentro de la funcionalidad que se busca en el concreto permeable al momento de ser parte de las rejillas para sumideros. Para efectos de su cálculo, se reprodujeron 9 viguetas de dimensiones .15m x .15m x .50m y se procedió a someterlas al ensayo de flexión pura; se calcula el módulo de rotura a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación No. 6

$$MR = \frac{PL}{bd^2}$$

Donde:

MR = módulo de rotura

P = Carga máxima

L = Longitud de la vigueta

b= ancho de la vigueta

d= altura de la vigueta

La matriz de ensayo con la que se evaluará la resistencia a la flexión del concreto permeable será la siguiente, tal como se había mencionado en capítulos anteriores:

Tabla No. 36 Matriz de ensayo para resistencia a la flexión

MUESTRA	EDAD (Dias)	NIVEL DE COMPACTACION	CURADO		
1	28	BAJO	SI	X	NO
2	28	BAJO	SI	X	NO
3	28	BAJO	SI	X	NO
4	28	MEDIO	SI	X	NO
5	28	MEDIO	SI	X	NO
6	28	MEDIO	SI	X	NO
7	28	ALTO	SI	X	NO
8	28	ALTO	SI	X	NO
9	28	ALTO	SI	X	NO

Fuente. Propia

Lo anterior se planteó teniendo en cuenta que se esperan valores muy bajos de resistencia a flexión, ya que el concreto en general trabaja mejor sometido a cargas de compresión; por esta razón no se evaluarán las condiciones para muestras no curadas y tampoco se evaluarán los resultados a los 7 y 14 días; claramente cómo se puede evidenciar en los resultados de las fases de investigación anteriores en las condiciones curadas como se esperaba, el concreto permeable tuvo un mejor comportamiento.

Es necesario corregir las dimensiones de las viguetas, dado que puede tener variaciones con respecto a las medidas estándar de la formaleta, lo que generaría cierta incertidumbre en los resultados obtenidos, esto teniendo en cuenta la baja trabajabilidad que presenta el concreto permeable dadas sus bajas relaciones agua cemento.

Tabla No. 37 Dimensiones promedio de viguetas

Muestra	Altura (d)			Prom.	Base (b)			Prom.	Longitud			Prom.
1	14,94	14,93	14,82	14,90	14,69	14,60	14,89	14,73	49,69	49,60	49,89	49,73
2	14,72	14,53	14,78	14,68	14,84	14,79	14,84	14,82	49,84	49,79	49,84	49,82
3	14,60	14,67	14,61	14,63	14,93	14,66	14,82	14,80	49,93	49,66	49,82	49,80
4	14,95	14,91	14,81	14,89	14,63	14,73	14,85	14,74	49,63	49,73	49,85	49,74
5	14,89	14,83	14,81	14,84	14,59	14,68	14,61	14,63	49,59	49,68	49,61	49,63
6	14,82	14,74	14,71	14,76	14,91	14,71	14,54	14,72	49,91	49,71	49,54	49,72
7	14,87	14,93	14,83	14,88	14,54	14,73	14,71	14,66	49,54	49,73	49,71	49,66
8	14,77	14,51	14,70	14,66	14,75	14,98	14,85	14,86	49,75	49,98	49,85	49,86
9	14,65	14,67	14,65	14,66	14,76	14,86	14,67	14,76	49,76	49,86	49,67	49,76

Fuente. Propia

Ahora bien, aplicando la ecuación No. 2, del ensayo de flexión se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla No. 38 Cálculo de módulos de rotura según matriz de ensayo.

MUESTRA 1

	cm / kN	mm / N
Altura (cm)	14,9	148,97
Ancho (cm)	14,73	147,27
Largo (cm)	49,73	497,27
CARGA	16,92	16.920,00

RESISTENCIA (Mpa)		2,57
----------------------	--	------

MUESTRA 2

	cm / kN	mm / N
Altura (cm)	14,68	146,77
Ancho (cm)	14,82	148,23
Largo (cm)	49,82	498,23
CARGA	17,3	17.300,00

RESISTENCIA (Mpa)		2,70
----------------------	--	------

MUESTRA 3

	cm / kN	mm / N
Altura (cm)	14,63	146,27
Ancho (cm)	14,8	148,03
Largo (cm)	49,8	498,03
CARGA	16,84	16.840,00

RESISTENCIA (Mpa)		2,65
----------------------	--	------

MUESTRA 5

	cm / kN	mm / N
Altura (cm)	14,84	148,43
Ancho (cm)	14,63	146,27
Largo (cm)	49,63	496,27
CARGA	21,34	21.340,00

RESISTENCIA (Mpa)		3,29
----------------------	--	------

MUESTRA 4

	cm / kN	mm / N
Altura (cm)	14,89	148,9
Ancho (cm)	14,74	147,37
Largo (cm)	49,74	497,37
CARGA	20,5	20.500,00

RESISTENCIA (Mpa)		3,12
----------------------	--	------

MUESTRA 6

	cm / kN	mm / N
Altura (cm)	14,76	148,97
Ancho (cm)	14,72	147,27
Largo (cm)	49,72	497,27
CARGA	21,42	21.420,00

RESISTENCIA (Mpa)		3,26
----------------------	--	------

MUESTRA 7

	cm / kN	mm / N
Altura (cm)	14,88	146,77
Ancho (cm)	14,66	148,23
Largo (cm)	49,66	498,23
CARGA	30,26	30.260,00

RESISTENCIA (Mpa)		4,72
----------------------	--	------

MUESTRA 9

	cm / kN	mm / N
Altura (cm)	14,66	148,9
Ancho (cm)	14,76	147,37
Largo (cm)	49,76	497,37
CARGA	28,58	28.580,00

RESISTENCIA (Mpa)		4,35
----------------------	--	------

MUESTRA 8

	cm / kN	mm / N
Altura (cm)	14,66	146,27
Ancho (cm)	14,86	148,03
Largo (cm)	49,86	498,03
CARGA	29,63	29.630,00

RESISTENCIA (Mpa)		4,66
----------------------	--	------

Fuente. Propia

De lo anterior, se llega a los siguientes valores promedio de resistencia a la flexión.

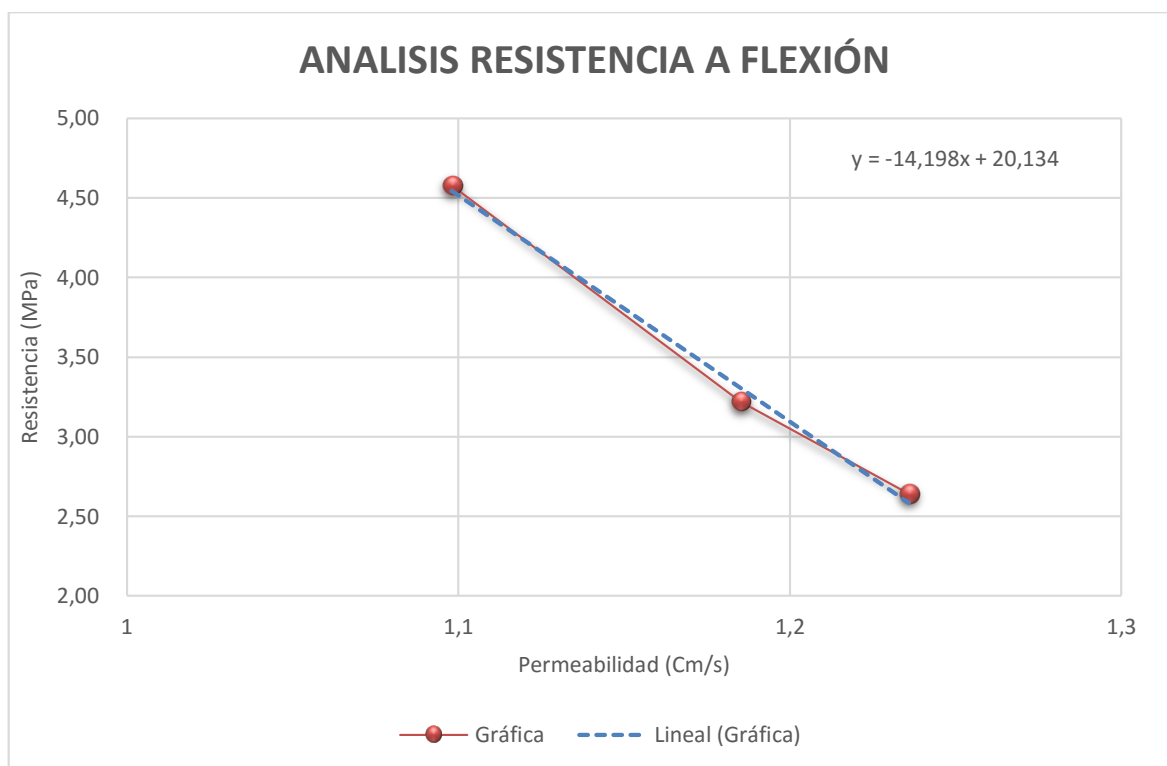
Tabla No. 39 Valores promedio resistencia a flexión.

RESISTENCIA A FLEXION PROMEDIO		
BAJO	MEDIO	ALTO
2,64	3,22	4,58

Fuente. Propia

Por la importancia que tienen los parámetros de permeabilidad y la resistencia a flexión dentro del objeto de la investigación, se evalúa la variación de estos mediante la siguiente gráfica:

Gráfico No. 15 Resistencia a la flexión Vs. Permeabilidad



Fuente. Propia

La relación implícita dentro de la tendencia lineal de la curva que representa la evaluación de la permeabilidad vs. La resistencia a flexión es inversamente proporcional. Como se evidencia, a medida que la resistencia a la flexión aumenta la permeabilidad disminuye, lo anterior, debido a que están ligadas a los niveles de compactación con los que se generaron las muestras de concreto.

La variación de los valores de permeabilidad es del orden de 0,1 cm/s entre el nivel de compactación alto y mínimo, y si tenemos en cuenta las bondades podrían generar los valores más altos de resistencia a flexión para la funcionalidad de los sumideros, es claro que el modelo óptimo de las rejillas, deberá incluir muestras de concreto permeable con la máxima compactación posible, sin que esto vaya a implicar pérdidas de funcionalidad hidráulica.

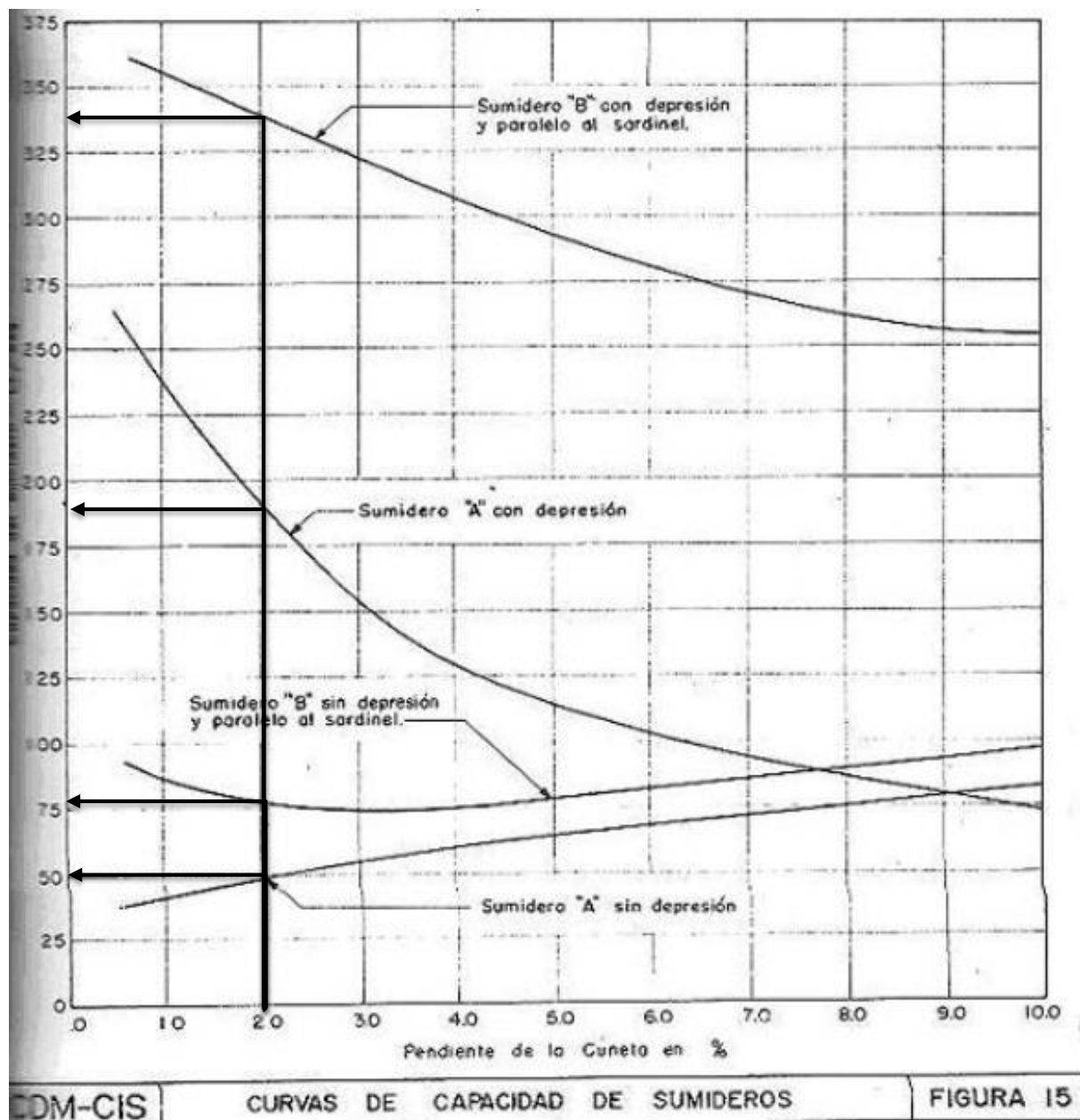
8.3 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO HIDRÁULICOS

8.3.1 DETERMINACIÓN DE CAUDALES DE DISEÑO

Una vez realizados los cálculos hidráulicos y determinar cuál es el valor máximo de permeabilidad que se obtiene para el diseño de mezcla, es necesario cuantificar la capacidad de captación hidráulica de los sumideros en las vías urbanas de la ciudad de Bogotá, para esto se aplicó la metodología de DRESSER-MCKEE, desarrollada en el año de 1962, donde la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá contrato a esta firma para que realizaran el plan maestro de Alcantarillado de la ciudad, dicho esto se establecieron los 5 tipos de sumideros estandarizados y los ábacos para escoger el tipo de sumidero y la capacidad de captación de los mismos.

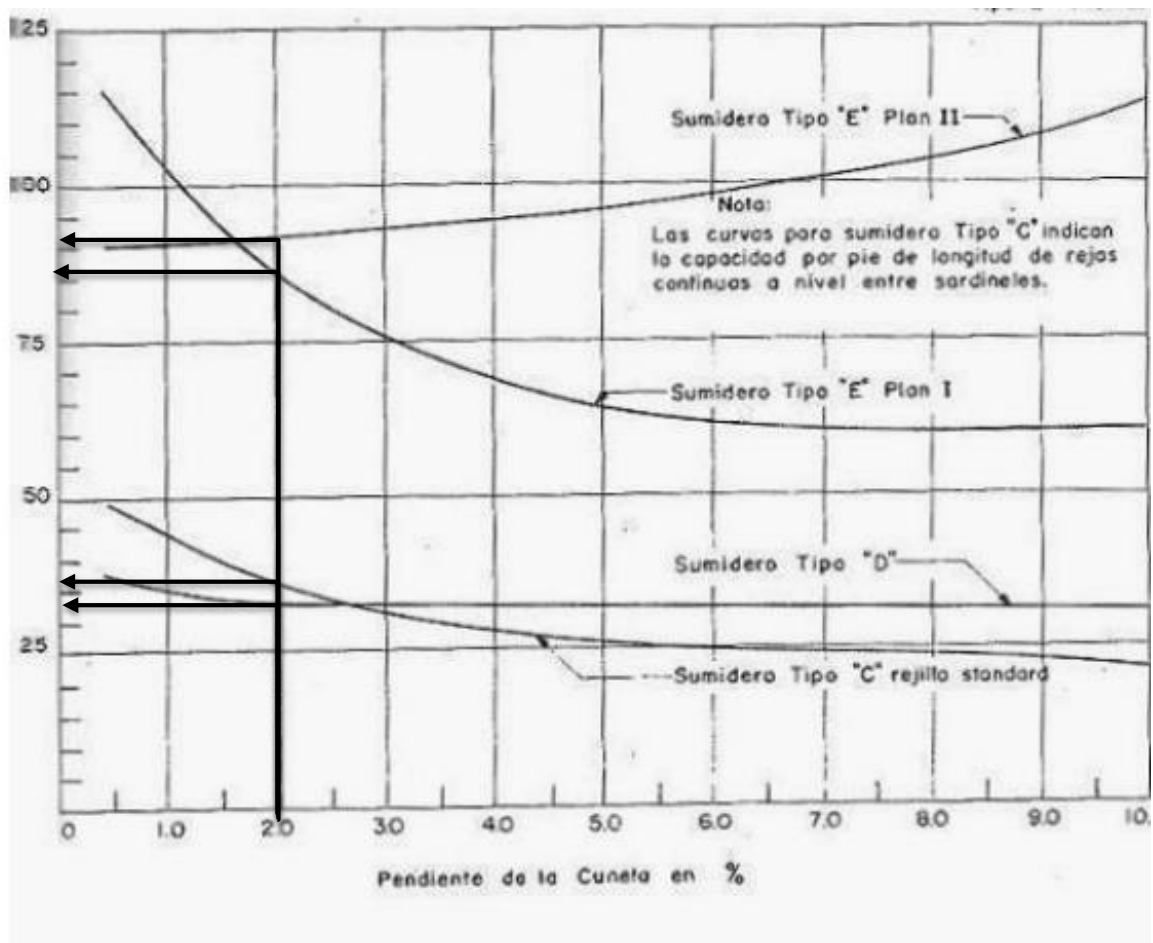
En este estudio, las capacidades de los sumideros fueron reducidas en un 30% teniendo en cuenta el efecto de taponamiento de las rejillas por los desechos, para calcular el caudal utilizamos el Abaco “curvas de capacidad de sumideros (figura No. 13 y 14), curvas de capacidad de los sumideros estándares de Bogotá, teniendo como parámetro de entrada la pendiente transversal de la vía y el tipo de sumidero que mejor se adecue a las solicitudes de diseño en este caso en específico, se utilizarán las rejillas Estándar, denominas por el acueducto de Bogotá como las rejillas tipo C, debido a que son las más utilizadas en la construcción de vías urbanas, con pendientes transversales o bombeos de 2%, esto según los datos reportados por la empresa de acueducto de Bogotá y verificándolo a partir de la observación de las rejillas para sumideros que se utilizan en las principales calles y carreras de la ciudad.

Figura No 13. Dresser-Mckee, Report N Master Plan For Sewage Works, (1962),
Figura 15 Empresa De Acueducto Y Alcantarillado De Bogotá.



Fuente. Diseño de sumideros, Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá.

Figura No. 14. Dresser-Mckee, Report N Master Plan For Sewage Works, (1962),
Figura 16 Empresa De Acueducto Y Alcantarillado De Bogotá.



Fuente. Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogota.

Tabla No 40. Determinación De Capacidad Máxima De Los Sumideros Estándar.

TIPO DE SUMIDERO	CAPACIDAD (Lt/s)
A, sin depresión	50
A, con depresión	195
B, sin depresión y paralelo al sardinel	75
B, con depresión y paralelo al sardinel	345
C, rejilla Standard	35
Sumidero tipo D	33
Sumidero tipo E, plan I	87
Sumidero tipo E, plan II	92

Una vez calculado el caudal o dicho de otra manera la capacidad de captación de la rejilla, se ajusta el modelo mediante la utilización del concreto permeable.

8.4 DISEÑO DE LA REJILLA

Partiendo de la determinación de la permeabilidad del material, se realiza un análisis retrospectivo del ensayo de carga constante para determinar el dimensionamiento de las secciones de concreto permeable en los prefabricados a desarrollar.

Para lo anterior se asumirá constante el valor de la permeabilidad, como propiedad propia de la muestra de concreto permeable (Tabla No. 31) y las condiciones de energía y se variarán el caudal de diseño de la rejilla, el área y el espesor de la muestra de concreto, llegando a la siguiente ecuación:

Ecuación 7

$$A = 0.0107qL$$

Fuente. Propia

Donde:

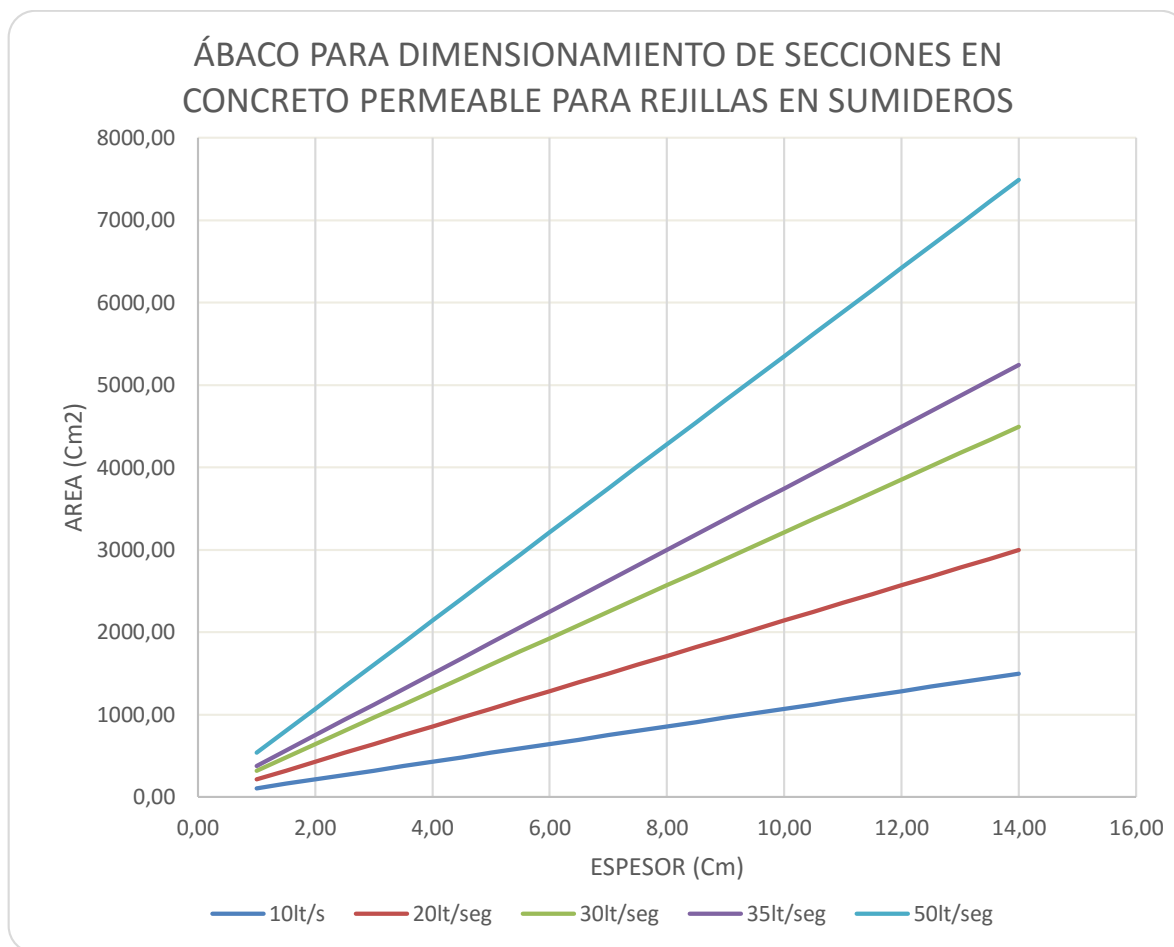
A=Área en Cm

q= Caudal en Cm³/seg

L=Espesor en Cm

A partir de la ecuación anterior se realiza un ábaco que permite analizar los distintos caudales que se puedan requerir para las rejillas, y así determinar las dimensiones de las secciones de concreto permeable dentro de las rejillas.

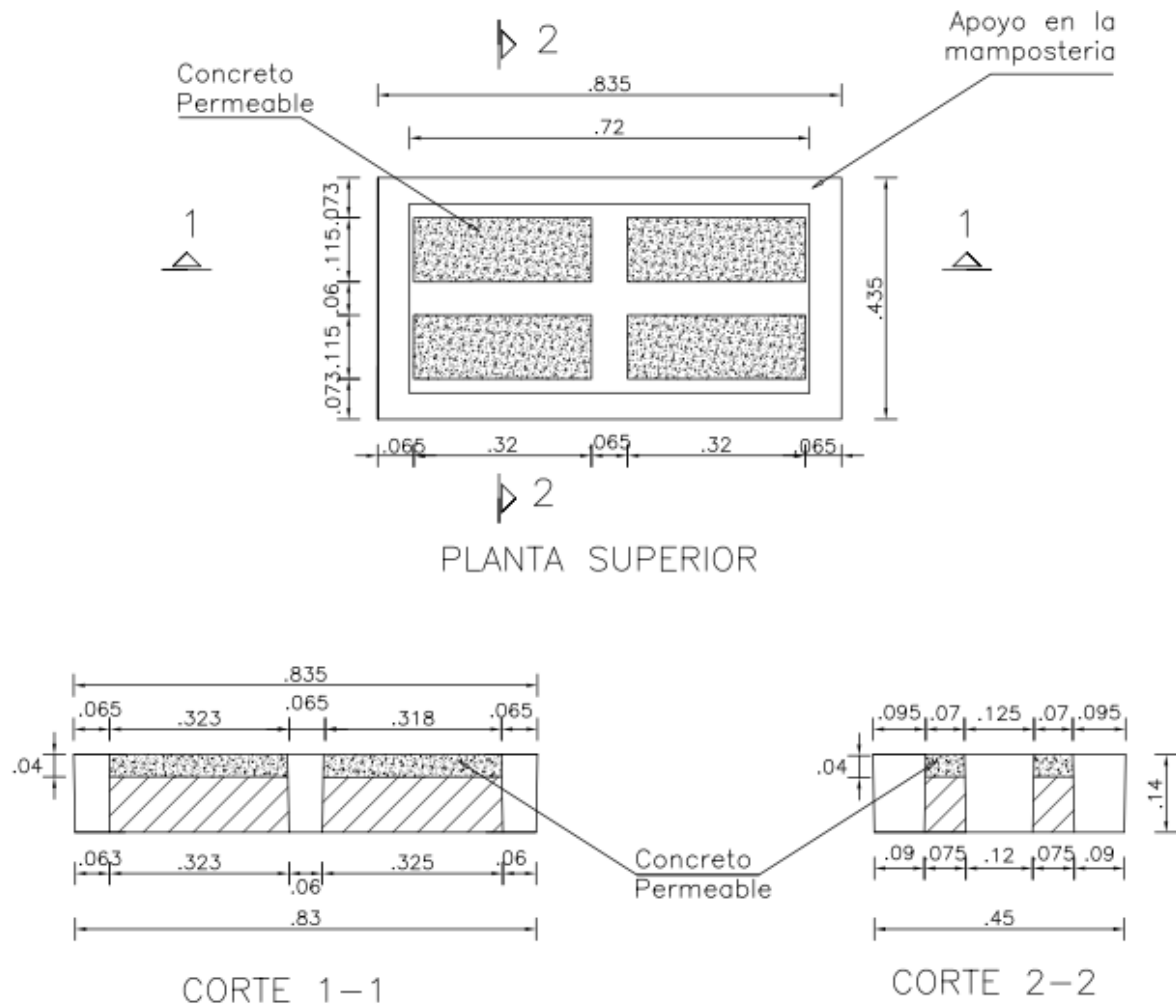
Gráfica No 16. Dimensionamiento de secciones en concreto permeable para rejillas.



Fuente. Propia

Se establecerá un espesor de 4 cm, ya que las permeabilidades por ser tan bajas, implicarían áreas muy grandes a mayor espesor de sección en concreto permeable. Por lo anterior, el área que deben tener las secciones de concreto permeable para un caudal de 35 lt/seg será de 1.498 cm². El esquema propuesto de las rejillas es el siguiente:

Figura 15. Esquema de rejilla con secciones de concreto permeable.



Fuente. Propia

Estas rejillas se implementarán como se había analizado con anterioridad, para sumideros tipo C según la metodología Dresser Mckee.

9. CONCLUSIONES

9.1 El diseño de mezcla definido en la tabla No. 4, cumple con los requerimientos de funcionalidad en procura de producir rejillas en concreto permeable para sumideros. Se debe tener especial cuidado en la colocación del mismo en las formaleas, ya que la fluidez y trabajabilidad de la muestra es tendiente a ser nula y por consiguiente el no hacer un correcto proceso de fundición implicará elementos con agrietamientos iniciales.

9.2 La compactación es una de las variables más importantes al momento de evaluar concretos permeables funcionales. El máximo nivel de compactación arrojó resultados mejores con respecto al nivel bajo y medio, ya que el comportamiento de la permeabilidad tendía a ser constante, indiferentemente de los golpes con los que se compactaran las muestras; diferente situación de la resistencia a compresión y resistencia a flexión, ya que estos parámetros si se vieron ampliamente afectados, los niveles altos de compactación permiten que las partículas y componentes de la mezcla de concreto se agrupen mejor y por consiguiente toleren mejor los esfuerzos internos que se generan al momento de aplicar cargas externas.

9.3 La afectación por los vacíos generados con la permeabilidad y la resistencia a compresión del concreto permeable fue notoria, pero se llegaron a valores de f'_c aceptables para la funcionalidad que se busca para producir rejillas prefabricadas para sumideros.

9.4 La energía de compactación que se utilice para fundir elementos en concreto permeable debe ser alta, dado que se obtienen mejores propiedades mecánicas (esfuerzos máximos mayores y módulos de elasticidad y rigidez más altos), sin que se afecten por el grado de compactación los valores de la permeabilidad o velocidad de infiltración de la matriz de concreto.

9.5 Propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad, la relación de poisson y el módulo de rigidez son muy similares a las del concreto convencional, es decir, se logró un concreto permeable con comportamiento óptimo, que puede someterse a las mismas cargas a las que es sometido un concreto convencional de 21 Mpa (3000 Psi)

9.6 El diseño óptimo para rejillas con concreto permeable, será el que se encuentra definido en la figura 15, para las condiciones de diseño de permeabilidad de las muestras, logrado a partir del diseño de mezclas propuesto.

10. RECOMENDACIONES

10.1 Se recomienda utilizar cualquier método de vibrado para este tipo de concreto tal como se realiza de forma convencional, dado que esto no afecta la permeabilidad del elemento a gran escala y las propiedades hidráulicas del elemento no se verán afectadas.

10.2 No es alcance de la presente investigación determinar el refuerzo que presentará el modelo establecido de la rejilla, por lo que se deberá analizar en futuras investigaciones las cuantías que requerirá, teniendo en cuenta lo establecido en las normas del Acueducto y alcantarillado de Bogotá norma NP-023 Versión 2 y/o afines.

10.3 Se recomienda evaluar la eficiencia de la rejilla en concreto permeable propuesta en el capítulo 5, (figura 1) mediante la aplicación del modelo desarrollado por el ingeniero Luis Ayala, donde se determina la eficiencia de la rejilla en concreto permeable vs los modelos convencionales de rejillas para sumideros según la normativa de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

10.4 Deberán evaluarse los demás rangos establecidos en la etapa de evaluación del diseño de mezcla óptimo, con el fin de caracterizar las demás propiedades que se pudieran afectar en dichas situaciones.

10.5 Es recomendable evaluar diseños de mezcla con variaciones granulométricas distintas a las revisadas en esta investigación, con el fin de que se puedan lograr mayores permeabilidades, sin dejar de lado los requerimientos mecánicos de la muestra. De lo anterior se evaluaría la posibilidad de ajustar el esquema propuesto de rejilla con concreto permeable según figura No 16.

10.6 Se podrá usar la figura no. 16 para muestras de concreto con permeabilidad igual a 1.098 cm/s; de lo contrario se deberá ajustar la ecuación no. 7 en función de la permeabilidad.

11. BIBLIOGRAFÍA

- 11.1. Concreto hidráulico permeable, una alternativa para la recarga de los mantos acuíferos del valle de México. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México – México.
- 11.2. FERNÁNDEZ, Roberto J. Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad. Laboratorio Hidrosistemas Ven Te Chow. Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. 2011.
- 11.3. HENDERSON, Vimy. Evaluation of the Performance of Pervious Concrete Pavement in the Canadian Climate. Doctorado en Ingeniería Civil. Ontario. Universidad de Waterloo. 2012.
- 11.4. SAUCEDO, Artemio, Concreto hidráulico permeable, una alternativa para la recarga de los mantos acuíferos del valle de México. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México – México.
- 11.5. Grupo CECATA. Efecto de las fibras plásticas en la flexión de estructuras de pavimentos drenantes, revista ingeniería de construcción volumen 17 No.2
- 11.6. Cerdas, Cindy. Análisis de la flexo tracción del concreto permeable. Instituto tecnológico de Costa Rica. 2009.

ANEXOS.