



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Tecnología de la Construcción

Monografía

**FABRICACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO PERMEABLE UTILIZANDO
AGREGADOS BASÁLTICOS DE LA CANTERA VERACRUZ,
NINDIRÍ - MASAYA.**

Para optar al título de Ingeniero Civil

Elaborado por:

Br. Noel Alejandro Rodríguez Orozco

Br. Noel Omar Silva Hernández

Tutor:

Msc. Ing. Alfonso Jerez

Asesor:

Ing. Antonio Ramón Flores Moncada

Managua, agosto 2018.

DEDICATORIA

A mi Señor **Jesucristo**, por haberme permitido llegar a este punto, darme conocimiento y salud para cumplir esta meta, además de su infinito amor y bondad.

A mi abuelita, **Petronila del Carmen Caballero**, por ser ejemplo de superación, sus consejos, valores, integridad, afecto y la motivación constante.

A mis padres, **José Hernaldo Rodríguez Chávez** y **Gladys María Orozco**, por el apoyo incondicional, sus consejos y entereza, pero, sobre todo, por su amor.

A mis hermanos, por las constantes muestras de cariño, su comprensión, paciencia, amor y apoyarme en todo momento.

Noel Rodríguez O.

A **Jehová Dios**, por su infinito amor y las bendiciones recibidas. Todo es posible por Él.

A mi padre **Marcos Adán Silva M.** (Q.E.P.D.), su amor y sus consejos viven en mí siempre.

A mi madre, **Santos Hernández C.**, por su incondicional amor y apoyo; por cada sacrificio hecho, junto con mi padre, para que pudiese llegar hasta el final de esta carrera.

A mis hermanas, **Amalia y Esther**, por su inmenso cariño.

Al maestro **Orlando Pineda Flores** y la **Asociación de Educación Popular Carlos Fonseca Amador**, por su amistad incondicional para con mi familia. Gracias a él este sueño se hace posible.

Noel Silva H.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo investigativo fue desarrollado gracias al apoyo incondicional de los siguientes profesionales:

MSc. Ing. Alfonso Jerez

Catedrático UNI-FTC
Gerente de INGENICA

MSc. Walter H. Flood

Miembro Subcomité C09.49 de ASTM
Flood Testing Laboratories Inc., Chicago

Ing. Antonio Ramón Flores Moncada

Jefe de Control de Calidad
PROINCO

Ing. Elieth Gutiérrez

Jefe de Control de Calidad
CEMEX-NICARAGUA

Ing. Aldo López

Gerente de Laboratorio de Suelos y
Materiales (LAMSA CONSULTORES)

Ing. Roberto Duarte Solís

Gerente General
NICASOLUM

Ing. Omar Alex Avellán

Gerente de Infraestructura
CEMEX-NICARAGUA

Arq. Eyllin López Calderón

Asesor Comercial
CONCRETOS Y MÁS

Arq. German Guevara

Gerente General
VERDECRETO Concreto Ecológico,
México D.F.

Ing. Jhony Robles Díaz

Jefe de Laboratorio de Mecánica de
Suelos
UNI-RUPAP

Mención especial al **Ing. Antonio Ramón Flores Moncada** por su compromiso, ayuda incondicional, paciencia y recomendaciones tan valiosas.

Noel Rodríguez O. & Noel Silva H.

Abreviaturas

ALMA	Alcaldía de Managua.
ACI	American Concrete Institute (Instituto Americano del Concreto).
Cemento ARGOS	Empresa Colombiana Productora de Cemento
ASTM	American Society for Testing and Materials (Asociación Americana de Ensayos de Materiales).
ASOCRETO	Asociación Colombiana de Productores de Concreto
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental).
EEUU	Estados Unidos de América.
IANAS	Interamerican Network of Academies of Sciences (Red Interamericana de Academias de Ciencias).
ICPA	Instituto del Cemento Portland Argentino
INCYC	Instituto Nicaragüense del Concreto y del cemento.
NRMCA	National Ready Mixed Concrete Association (Asociación Nacional de Concreto Premezclado).
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental).
PCA	Portland Cement Association (Asociación de Cemento de Portland).
PROINCO	Productos Industriales de Concretos
Subcomité C09.49	Subcomité sobre concreto permeable.

Normas de referencia

ACI 211.3-02	Guía para la selección de proporciones para concreto sin revenimiento.
ACI 522 R-06	Reporte sobre concreto permeable, año 2006.
ACI 522 R-10	Reporte sobre concreto permeable, año 2010.
ASTM C 29-03	Método de prueba estándar para la determinación de los pesos unitarios seco suelto y seco compacto de los agregados gruesos y finos.
ASTM C 33-08	Especificación estándar para agregados de concreto.
ASTM C 39-03	Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto.
ASTM C 40-11	Método de prueba estándar para impurezas orgánicas en agregados finos para concreto.
ASTM C 42-04	Método de prueba estándar para la obtención de núcleos perforados para pruebas y vigas aserradas de hormigón.
ASTM C 78-09	Método de ensayo para determinar el esfuerzo de flexión del concreto (utilizando una viga simplemente soportada con cargas en los tercios de la luz).
ASTM C 127-01	Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso.
ASTM C 128-01	Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino.
ASTM C 131-03	Determinación de la resistencia al desgaste, del agregado grueso de tamaño hasta de 37.5 mm (1½ pulg), por abrasión e impacto en la Máquina de Los Ángeles.
ASTM C 136-06	Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos.
ASTM C 143-08	Método de prueba estándar para el asentamiento de concreto de cemento hidráulico.
ASTM C 150	Especificación estándar para el cemento portland.
ASTM C 188	Método de prueba estándar para la densidad del cemento hidráulico.

ASTM C 192-07	Práctica estándar para la elaboración y curado de especímenes de concreto en laboratorio.
ASTM C 494-05	Especificación normalizada para aditivos químicos para concreto.
ASTM C 595	Especificación normalizada para mezclas de cementos hidráulicos.
ASTM C 617-10	Práctica estándar para el cabeceo de especímenes cilíndricos de concreto.
ASTM C 702-98	Practica para la reducción de muestras de agregados a tamaños de ensayo.
ASTM C 979-10	Especificación estándar de pigmentos para la coloración integral del concreto.
ASTM C 1157	Especificación normalizada de desempeño para cemento hidráulico.
ASTM C 1602-06	Especificación estándar para la mezcla de agua utilizada en la producción de hormigón de cemento hidráulico.
ASTM C 1688/ C1688M-10^a	Método de prueba estándar para la densidad y el contenido vacío de concreto permeable recién mezclado
ASTM C 1701/ C1701M-09	Método de prueba estándar para la tasa de infiltración del concreto permeable en campo.
ASTM C 1747/ C1747M-13	Método de prueba estándar para determinar la resistencia potencial a la degradación del concreto permeable por el impacto y la abrasión.
ASTM D 75-03	Práctica para el muestreo de los agregados para concreto.
ASTM D 3665	Práctica para el muestreo al azar de materiales de construcción
ASTM D 3385	Método de prueba estándar para la tasa de infiltración de los suelos en campo utilizando infiltrómetro de doble anillo.
ASTM D448-03	Clasificación estándar para los tamaños de agregados para la construcción de carreteras y puentes.

ASTM D 698

Método de ensayo estándar en laboratorio para las características de compactación del suelo utilizando esfuerzo estándar (12,400 pie-lb/pie³ (600 kn-m/m³)).

ASTM D 4429

Método de prueba estándar para CBR (Relación soporte de California) de los suelos en el lugar.

Resumen

En un esfuerzo por buscar soluciones a los problemas de escorrentías superficiales que ocasionan inundaciones en la ciudad de Managua, surge esta investigación monográfica. El objetivo se enfoca en encontrar una mezcla lo suficientemente resistente y permeable que pueda ser utilizada como capa de rodadura en pavimentos de bajo tráfico vehicular, andenes, parqueos y otras aplicaciones con el fin de promover la infiltración en el terreno.

Para alcanzar este objetivo, se han seguido las recomendaciones plasmadas en el Reporte sobre el Concreto Permeable del ACI (ACI 522 R-10), tanto para la selección del método de proporcionamiento como para la elaboración, ensayos y curado del concreto.

En el estudio, se utilizaron agregados basálticos de la cantera Veracruz (grava de 1/2" y material cero), cemento CANAL, agua y un aditivo superplastificante de uso común.

Se efectuaron 25 mezclas teóricas variando principalmente la relación agua-cemento y el porcentaje de vacíos permeables. Se fabricaron las mezclas para cada diseño, conociendo sus características de densidad, permeabilidad y resistencia, seleccionando la mezcla con el mejor comportamiento o balance entre las propiedades.

Finalmente, mediante un estudio del estado del arte del concreto permeable y adecuándolo a las características locales, se logra consolidar una serie de recomendaciones para la colocación de éste concreto en pavimentos de bajo tráfico vehicular en Managua, dejando así, las puertas abiertas a próximas instalaciones y futuras investigaciones sobre el tema.

Índice General.

Capítulo I. Introducción	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1.1. <i>Objetivo general</i>	3
1.2.1.2. <i>Objetivos específicos</i>	3
1.3. JUSTIFICACIÓN	4
1.4. ANTECEDENTES	5
Capítulo II. Generalidades	7
2.1. CONCRETO HIDRÁULICO	7
2.2. MATERIALES PARA CONCRETO	9
2.2.1. <i>Cemento</i>	9
2.2.2. <i>Agregados</i>	11
2.2.3. <i>Agua de mezclado</i>	16
2.2.4. <i>Aditivos</i>	17
Capítulo III. Concreto permeable	18
3.1. DEFINICIÓN	18
3.2. APLICACIONES	19
3.3. VENTAJAS Y LIMITACIONES	20
3.4. MATERIALES COMPONENTES	22
3.4.1. <i>Cemento</i>	22
3.4.2. <i>Agregados</i>	22
3.4.3. <i>Agua</i>	23
3.4.4. <i>Aditivos</i>	23
3.5. PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS DE CONCRETO PERMEABLE.....	24
3.5.1. <i>Variables experimentales</i>	24
3.5.2. <i>Procedimiento de proporcionamiento recomendado por el ACI - 522 R10</i>	26
3.6. PROPIEDADES DEL CONCRETO PERMEABLE.....	30
3.6.1. <i>Propiedades en estado fresco</i>	30
3.6.2. <i>Propiedades en estado endurecido</i>	34
Capítulo IV. Materiales, equipos y metodología de investigación	45
4.1. MATERIALES	45
4.1.1. <i>Cemento</i>	45
4.1.2. <i>Agregados</i>	45
4.1.3. <i>Agua</i>	46
4.1.4. <i>Aditivo</i>	46
4.2. EQUIPOS DE LABORATORIO.....	47
4.2.1. <i>Caracterización de los agregados</i>	47
4.2.2. <i>Fabricación de mezclas de concreto</i>	47
4.2.3. <i>Densidad del concreto en estado fresco</i>	48
4.2.4. <i>Fabricación y curado de especímenes</i>	48
4.2.5. <i>Ensayos de resistencia</i>	49
4.2.6. <i>Ensayo de permeabilidad</i>	49
4.3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	49

4.3.1. Trabajo de campo	50
4.3.2. Caracterización de los Agregados.....	51
4.3.3. Proporcionamiento de mezclas	57
4.3.4. Fabricación de mezclas.....	69
4.3.5. Fabricación y curado de especímenes.....	71
4.3.6. Ensayos en estado fresco y endurecido.....	73
Capítulo V. Presentación y análisis de resultados	76
5.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS	76
5.1.1. Granulometría	76
5.1.2. Pesos Unitarios	81
5.1.3. Gravedad Específica y Absorción	81
5.1.4. Desgaste por Abrasión.....	82
5.1.5. Impurezas orgánicas	82
5.2. RESUMEN DE PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	83
5.2.1. Agregados.....	83
5.2.2. Cemento.....	84
5.3. PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS	84
5.3.1. Mezclas fabricadas.....	88
5.4. RESULTADOS DE ENSAYOS	95
5.4.1. “5 Bachadas de Prueba”	95
5.4.2. “7 Mezclas de Prueba”	96
5.4.3. “18 Mezclas fabricadas”	98
5.4.4. Mezclas ajustadas.....	101
5.4.5. Mezcla seleccionada	102
5.5. GUÍA SIMPLIFICADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO PERMEABLE.	103
5.5.1. Consideraciones previas a la construcción	103
5.5.2. Recursos necesarios.....	106
5.5.3. Procedimiento de Construcción	107
Capítulo VI. Conclusiones y recomendaciones	119
6.1. CONCLUSIONES.....	119
6.2. RECOMENDACIONES	121
Bibliografía.....	122
Anexos.....	A-1
ANEXO 1. TABLAS CONSULTADAS.....	A - 2
ANEXO 2. FICHAS TÉCNICAS.....	A - 9
ANEXO 3. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS.....	A - 13
ANEXO 4. PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS.....	A - 36
ANEXO 5. COMPARACIÓN ECONÓMICA.....	A - 40
ANEXO 6. ENSAYO DE MEZCLA SELECCIONADA.....	A - 49
ANEXO 7. VERIFICACIÓN DE ECUACIÓN DE CORRELACIÓN PROPUESTA POR AHMAD Y SHAH (1985)	A-68

Índice de figuras

Figura 1. Composición general del concreto normal.....	7
Figura 2. Porcentaje de aire atrapado, para un volumen unitario de concreto normal	8
Figura 3. Proceso de fabricación del cemento	10
Figura 4. Formas de clasificar los agregados.	11
Figura 5. Condiciones de humedad del agregado	14
Figura 6. Concreto permeable en estado endurecido	18
Figura 7. Concreto permeable como carpeta de rodadura en una de las calles de la ciudad de Sultan, Washington.	20
Figura 8. Relación entre pasta y contenido de vacíos para agregados de Tamaño N° 8 según la Norma ASTM C 33.	28
Figura 9. Pesos Unitarios de cilindros y esfuerzos para 8 diferentes métodos de compactación	32
Figura 10. Contenido de Aire vs., w/c para dos Grados de Compactación.	33
Figura 11. Relación entre el Contenido de Vacíos Vs Peso Unitario.	34
Figura 12. Resistencia a Compresión vs Contenido de aire en especímenes de concreto permeable.....	36
Figura 13. Relación entre la Resistencia a Flexión y el Contenido de Vacíos.	37
Figura 14. Relación entre la Resistencia a Compresión y Resistencia a Flexión	38
Figura 15. Tasa de Percolación vs Contenido de Vacíos en cilindros.	39
Figura 16. Permeámetro de carga variable para medir la permeabilidad del concreto permeable.....	40
Figura 17. Prueba de infiltración del concreto permeable en campo según ASTM C1701.	41
Figura 18. Mantenimiento de andenes peatonales de concreto permeable mediante aspirado.....	42
Figura 19. Muro de retención expuesto a la acidez del agua.....	43
Figura 20. Resistencia a la degradación por impacto y abrasión del concreto permeable	44
Figura 21. Imagen satelital de Veracruz, mostrando la ubicación de PROINCO	46
Figura 22. Banco de agregados de tamaño nominal máximo de 1/2" de PROINCO.	50
Figura 23. Secado y Reducción de muestras de agregados a tamaños apropiados para ensaye según ASTM C702-98 (Método A).....	51
Figura 24. Análisis granulométrico de los agregados según ASTM C136-06	52
Figura 25. Ensayo de densidad de los agregados según ASTM C29-03.....	53
Figura 26. Ensayo de gravedad específica y absorción del agregado grueso según ASTM C 127-01	54

Figura 27. Ensayo de gravedad específica y absorción del agregado fino según ASTM C 128-01	54
Figura 28. Determinación de la resistencia al desgaste del agregado grueso mediante ASTM C 131-03.....	55
Figura 29. Determinación de materia orgánica en los agregados finos mediante ASTM C 40-11.	56
Figura 30. Cantidad de mezclas fabricadas para la selección de la mezcla objeto de la investigación	58
Figura 31. Preparación de materiales para la fabricación de mezclas proporcionadas ..	70
Figura 32. Preparación del recipiente para la fabricación del concreto permeable	70
Figura 33. Mezclado de materiales y obtención del concreto permeable	71
Figura 34. Fabricación de especímenes de 4"x8" para ensayo a compresión.	72
Figura 35. Curado de especímenes en el sitio de fabricación.	72
Figura 36. Curado de especímenes en pila de curado.	73
Figura 37. Pruebas realizadas a las mezclas fabricadas de concreto permeable.....	74
Figura 38. Curva Granulométrica del promedio de 3 muestras de agregado grueso.	79
Figura 39. Curva Granulométrica del promedio de 3 muestras de agregado fino	80
Figura 40. Composición de una estructura típica de concreto permeable	103
Figura 41. Traslado del concreto en camiones mezcladores	105
Figura 42. Movimiento de tierra en la preparación de la subrasante	107
Figura 43. Humedecimiento de la base.....	109
Figura 44. Colocación de formaletas en base granular.	110
Figura 45. Ensayo de Densidad del Concreto permeable según ASTM C 1688.....	112
Figura 46. Descarga frontal y lateral del concreto permeable.....	113
Figura 47. Colocación del concreto permeable.	114
Figura 48. Compactación de concreto permeable en parqueo de WALMART en la ciudad de Denver, Colorado	115
Figura 49. Compactación del concreto permeable en zonas frágiles	115
Figura 50. Corte de juntas en parqueo de WALMART en la ciudad de Denver, Colorado	116
Figura 51. Curado de concreto permeable en parqueo de WALMART en la ciudad de Denver, Colorado.....	117

Índice de tablas

Tabla 1. Tipos de concretos especiales.....	8
Tabla 2. Valores efectivos de b/bo.....	27
Tabla 3. Peso de materiales para un saco de cemento.....	67
Tabla 4. Volúmenes de materiales para 1 saco de cemento.....	68
Tabla 5. Proporción de materiales en partes por volumen.....	69
Tabla 6. Granulometría del agregado grueso.....	76
Tabla 7. Granulometría del agregado fino (Material cero).....	77
Tabla 8. Densidad del agregado grueso y fino.....	81
Tabla 9. Gravedad específica y % Absorción de los agregados.....	81
Tabla 10. Porcentaje de Desgaste por abrasión del agregado grueso.....	82
Tabla 11. Materia orgánica en el agregado fino.....	83
Tabla 12. Resumen de propiedades de los agregados.....	83
Tabla 13. Propiedades del cemento.....	84
Tabla 14. Proporcionamiento de 5 bachadas de prueba.....	89
Tabla 15. Proporcionamiento de 7 mezclas de prueba.....	90
Tabla 16. Proporcionamiento de 18 mezclas de fabricadas.....	92
Tabla 17. Proporcionamiento de mezclas ajustadas.....	93
Tabla 18. Proporcionamiento de mezcla seleccionada para 5 reproducciones.....	94
Tabla 19. Resultados de ensayos en las 5 bachadas de prueba.....	95
Tabla 20. Resultados de ensayos de las primeras 7 mezclas de prueba.....	96
Tabla 21. Resultados de ensayos desde mezcla M-1´ hasta mezcla M-6´ de las 18 mezclas de prueba.....	98
Tabla 22. Resultados de ensayos desde mezcla M-7´ hasta mezcla M-12´ de las 18 mezclas de prueba.....	99
Tabla 23. Resultados de ensayos desde mezcla M.13´ hasta mezcla M-18´ de las 18 mezclas de prueba.....	100
Tabla 24. Resultados de ensayos en las mezclas ajustadas.....	101
Tabla 25. Resultados de ensayos en la reproducción de la mezcla seleccionada...	102

Capítulo I. Introducción

1.1. Introducción

La presente investigación se enfoca en la fabricación de mezclas de concreto permeable utilizando agregados basálticos de la cantera Veracruz- Nindirí.

La característica principal de este concreto es que es un tipo de concreto sin revenimiento que posee poca cantidad de finos, lo que le hace altamente permeable. Es utilizado en países desarrollados en varias aplicaciones que van desde carpetas de rodadura hasta andenes peatonales y es considerado como un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS).

El interés por desarrollar esta investigación surge en la necesidad de dar una solución viable a los problemas de inundación que año con año se presentan en la ciudad. Por ejemplo, la Alcaldía de Managua (ALMA) en el año 2015, realizó una inversión de C\$ 35, 000,000 en reparaciones de daños causados por los grandes volúmenes de escorrentía, en infraestructura vial, traslado de familias anegadas, reparación de obras hidráulicas etc.

En este sentido, el concreto permeable juega un papel importante si se usa como sistema de drenaje debido a que contribuye a la mitigación de daños, promueve un mejor manejo del agua y a la vez ayuda al desarrollo sostenible de los proyectos urbanísticos.

Durante este proceso investigativo, de carácter exploratorio y correlacional, se fabricaron 25 mezclas de concreto permeable y se evaluaron sus principales propiedades, tanto en estado fresco como endurecido. Además, se abordó el proceso de construcción; obteniendo un documento de consulta, que recopila, detalla y ordena de forma clara y concisa estos aspectos.

Para distribuir la información relacionada al concreto permeable, el documento se subdivide en varios capítulos relacionados entre sí. En el capítulo II, por ejemplo, se abordan las generalidades relacionadas al concreto hidráulico y sus materiales componentes. Ya en el capítulo III, se aborda el estado del arte relacionado al Concreto Permeable, destacando el método de proporcionamiento utilizado y un resumen de las propiedades en estado fresco y endurecido que suele presentar dicho concreto.

En cuanto a la descripción de los materiales y equipos, así como la metodología de investigación, todos son abordados en el capítulo IV, apartando el capítulo V para presentar los resultados de la caracterización de los agregados y de los ensayos realizados al total de mezclas, destacando las características de la mezcla que mejores resultados presentó. Además, en el capítulo V se detalla el proceso constructivo del concreto permeable, tomando en cuenta las consideraciones previas, los recursos necesarios, los detalles de la colocación y los cuidados en la post-construcción.

Finalmente, en el capítulo VI se dan a conocer las conclusiones del proceso investigativo y se lista un número de recomendaciones a considerar en futuros procesos investigativos relacionados al tema.

1.2. Objetivos

1.2.1.1. Objetivo general

- Fabricar mezclas de concreto permeable con agregados basálticos de Veracruz, siguiendo las recomendaciones del ACI 522 R-10, para su análisis y evaluación de uso en pavimentos urbanos de bajo tráfico vehicular.

1.2.1.2. Objetivos específicos

- Determinar la granulometría de los agregados por usar, de acuerdo con el método de ensaye de la ASTM C 136.
- Determinar las cantidades de materiales para utilizar mediante la variación de la relación agua – cemento y el porcentaje de vacíos, que permita alcanzar valores cercanos a una resistencia a la flexión de 36 kg/cm² (500 PSI).
- Evaluar en el laboratorio la permeabilidad, resistencia a compresión, resistencia al desgaste y densidad de cada una de las mezclas de concreto permeable por fabricar, para la selección de la mezcla óptima.
- Elaborar una guía simplificada del proceso de instalación del concreto permeable, basada en el reporte del ACI 522 R-10, la NRMCA y la experiencia de especialistas, que facilite el conocimiento de las técnicas y requerimientos de colocación.

1.3. Justificación

Managua, ha experimentado un crecimiento urbano acelerado en el último par de décadas. Para el año 2011, el municipio contaba con una tasa de urbanización de 97% (ALMA, 2011). No obstante, hoy se percibe la consecuencia ambiental de tal crecimiento urbanístico: año tras año, durante la estación lluviosa, se dan devastadoras inundaciones, sobre todo en los barrios ubicados en las zonas bajas de la capital.

Estas dificultades obligan a promover el uso de sistemas de drenaje más eficientes, que contribuyan a la mitigación de los daños, aporten a un mejor manejo del agua y a la vez, ayuden al desarrollo sostenible de los proyectos urbanísticos.

Un sistema que satisface estas demandas y que actualmente poco se conoce en el país es el concreto permeable. Dicho concreto, es considerado como un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS). Sus propiedades de permeabilidad y resistencia lo hacen idóneo para infiltrar agua en el terreno sin afectar el área de construcción, disminuyendo a la vez, los costos de sistemas de drenaje adyacentes. Paralelamente, proporciona seguridad en la movilidad de los usuarios conductores, porque sus características físicas de rugosidad y uniformidad proveen una mayor tracción a los vehículos, disminuyendo a su vez el ruido provocado por el paso de éstos.

El uso de concreto permeable en diversas áreas de Managua y en distintas aplicaciones como aceras de parques, carpetas de rodadura en pavimentos de bajo tráfico, andenes peatonales, estacionamientos, etc., ayudaría a reducir las zonas impermeables de la capital, contribuyendo a mitigar los efectos de la irrupción del ciclo hidrológico.

Así mismo, dicho documento servirá como material de consulta en la biblioteca de la UNI para solventar la falta de información respecto a este concreto, beneficiando a los estudiantes de ingeniería civil, profesionales afines y al público interesado en la temática.

1.4. Antecedentes

El concreto permeable es un material que se ha venido utilizando en Europa desde mediados del siglo XIX en la construcción de edificios, muros y habitaciones. El primer uso del concreto permeable data de 1852, en la construcción de dos habitaciones en el Reino Unido. A finales de los años 1930's, la Scottish Special Housing Association Limited adoptó el uso de concreto permeable para la construcción residencial (Pérez, 2010).

La Segunda Guerra Mundial, dejó a Europa con necesidades habitacionales, esto alentó el uso de nuevos métodos constructivos entre los que destacó el concreto permeable. Por otro lado, en países como EE. UU., su uso fue muy limitado, debido a que el país no experimentó la misma escasez de materiales. En Canadá, el primer uso reportado del concreto permeable fue en 1960, en la construcción de algunas casas en Toronto (Ibíd).

No obstante, fue en Florida para el año 1970, donde por primera vez, se pavimentaron calles con concreto permeable. Más tarde, en el año 2002 el comité ACI "American Concrete Institute", manifestó los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en esta ciudad, en el Reporte ACI 522R-02. Posteriormente, se desarrollaron nuevas investigaciones sobre este concreto cuyos resultados fueron publicados en el año 2006 en el Reporte sobre Concreto Permeable: ACI 522R-06. Similarmente, en el 2009, la asociación "American Society for Testing and Materials" (ASTM) creó una forma para medir la tasa de infiltración del concreto en campo, plasmando sus resultados en la Norma ASTM C 1701 (Vigil S., 2012).

Por otra parte, desde el 2006 hasta la actualidad, se ha dado un repunte en diferentes países de América Latina respecto a investigaciones sobre el concreto permeable y sus aplicaciones. Sin embargo, cabe destacar que es en México, donde se han desarrollado más estudios en este tipo de concreto, resaltando la labor de los científicos el Ing. Jaime Grau y Arq. German Guevara que, en 2006, crearon un aditivo que aumentaba la resistencia de dicho concreto, permitiendo aplicarlo en calles sometidas a mayores cargas.

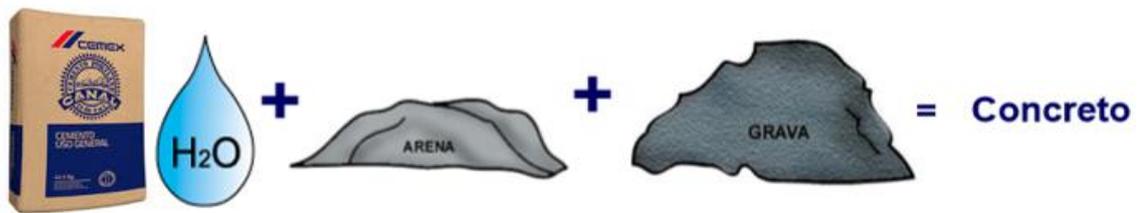
Aunque en Nicaragua, hasta ahora, el concreto permeable no se ha estudiado a fondo; es aplaudible la labor de países centroamericanos como El Salvador, Costa Rica y Panamá, donde se han abierto estudios independientes de universidades e instituciones privadas en cuanto al uso de concretos permeables, dando lugar a nuevas y mejoradas opciones en concreto, sostenibles y sustentables, para la construcción de elementos que ayuden a mitigar los problemas de impermeabilización de las zonas urbanas.

Capítulo II. Generalidades

2.1. Concreto Hidráulico

La norma ASTM C 125-03, define al concreto como: “un material compuesto, que consiste esencialmente de un medio conglomerante dentro del cual están embebidas las partículas o fragmentos del agregado; en el concreto (...), el conglomerante está formado por una mezcla de cemento hidráulico y agua” (p. 2). A estos materiales, generalmente se les incorpora intencionalmente un cuarto componente denominado aditivo, con el propósito de mejorar algunas de sus características.

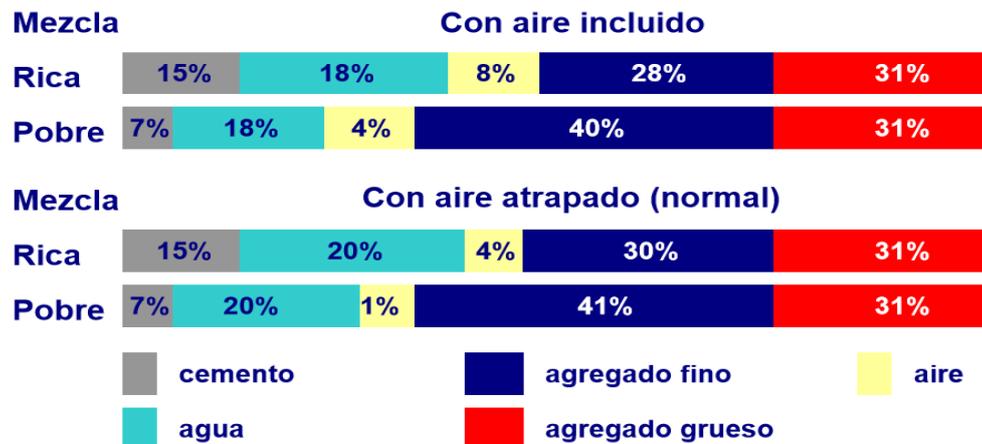
Figura 1. Composición general del concreto normal



Fuente: CEMEX, Tecnología general del concreto hidráulico, 2014

Al mezclar estos componentes se produce una revoltura de concreto, en la que queda atrapada cierta cantidad de aire, que normalmente no excede al 4% del volumen del concreto compactado. Gradualmente, después de este proceso el concreto pasa de un estado plástico, conocido como concreto fresco, a uno rígido y resistente denominado concreto endurecido (**Ver Figura 2**).

Figura 2. Porcentaje de arie atrapado, para un volumen unitario de concreto normal.



Fuente: CEMEX, Tecnología general del concreto hidráulico, 2014

Para resolver algunos inconvenientes del concreto convencional, referentes a la colocación, aplicabilidad y responder a las necesidades de cada proyecto, se originaron los concretos especiales. Son concretos que poseen características diferentes a las de un concreto convencional, producidas por algún tipo de insumo o por la tecnología de aplicación o producción (PCA, 2004).

Existen diferentes tipos de concretos especiales, definidos por la tecnología de aplicación y/o las características que poseen. Según CEMEX (2014), los principales tipos de concretos especiales están presentes en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Tipos de concretos especiales

Concretos especiales	
Alta resistencia	Ligero celular
Anti-deslave	Lanzado
Auto-compactable	Rellenos fluidos
Arquitectónicos	Resistencia acelerada
Contracción compensada	Sin finos ¹
Hidratium	Trabajabilidad extendida

Fuente: Tipos de concretos, CEMEX 2014.

¹ También conocido como Concreto Permeable.

2.2. Materiales para concreto

2.2.1. Cemento

Es un aglomerante que, por sus propiedades de adherencia y cohesión, es capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias permitiendo la formación de un material compacto. Debido a que fragua al reaccionar químicamente con el agua, también se le conoce como cemento hidráulico (ASTM, 2003).

2.2.1.1. Composición y Fabricación

El cemento está compuesto principalmente por Clinker, que tiene como principales materias primas: la roca caliza (85%) y arcillas ricas en hierro y sílice (15%). Al Clinker se le adiciona cierta cantidad de yeso, para regular el tiempo de fraguado, y con ello se obtiene el cemento de color gris (CFE, 2001).

En la fabricación del cemento, existen dos procedimientos de homogenización de las materias primas: en seco y en húmedo. El IMCYC (2011) resume de forma clara el proceso de fabricación del cemento en seco, que es el utilizado en las plantas procesadoras de cementos en Nicaragua:

Primeramente, se explota la materia prima y se transporta a la planta trituradora; luego se trituran hasta reducirlos a un tamaño aproximado de 19 mm, se mezclan en cantidades adecuadas en una etapa de pre-homogeneización, se reduce a polvo crudo y continúan con la etapa de homogenización del mismo. Este polvo se somete a calcinación obteniendo el Clinker. Posteriormente, el Clinker se le añade yeso y se reduce a polvo. Por último, se empaca para su comercialización (Ver **Figura 3**).

Figura 3. Proceso de fabricación del cemento



Fuente: Adaptado de ARGOS Cemento, Qué es el cemento, propiedades y componentes, 2015.

2.2.1.2. Tipos

A medida que varían ciertas características del cemento (Composición química y Finura de molienda), y con la inclusión de ciertos materiales (puzolana, escoria, ceniza, aditivos), se obtienen los diferentes tipos de cemento:

- Cementos Portland (ASTM C150)
- Cementos Hidráulicos Adicionados (ASTM C 585)
- Cementos Hidráulicos (ASTM C 1157)

2.2.1.3. Producción Nacional

En el país no se producen todos los tipos de cemento mencionados en el acápite anterior, sin embargo, se producen cementos hidráulicos de dos tipos: GU y HE; los cuales cumplen con la norma técnica obligatoria nicaragüense NTON 12 006-11²: "Fabricación, Uso y Manejo de Cemento". También, se produce cemento blanco con fines meramente decorativos. Los cementos se distribuyen en dos marcas CANAL y HOLCIM.

² Describe las propiedades de los cementos hidráulicos y pruebas que deben realizarse a los mismos de acuerdo a la Sociedad Americana para la Prueba de los Materiales (ASTM).

2.2.2. Agregados

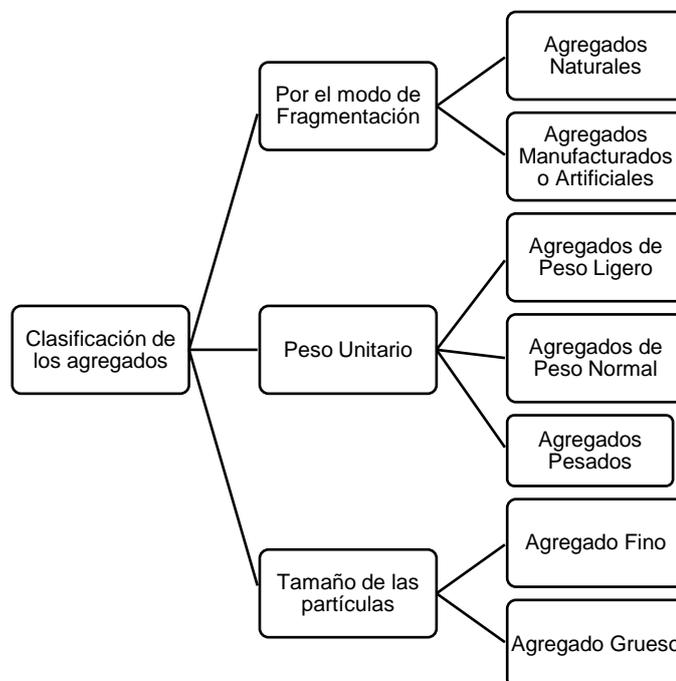
El ACI 318 (2014) define al agregado como un material granular (arena, grava, piedra triturada o escoria de alto horno) usado con un medio cementante para formar el concreto de cemento hidráulico o mortero.

En el concreto, los agregados representen alrededor del 60 y 75 por ciento, del volumen absoluto de todos los componentes (70% a 85% de la masa) del concreto (PCA, 2004). Además, deben ser partículas limpias, duras, resistentes, durables y libres de productos químicos absorbidos, revestimiento de arcilla u otros materiales finos en cantidades perjudiciales, que pueden afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento.

2.2.2.1. Clasificación

Como se muestra en la **Figura 4.**, los agregados pueden clasificarse de acuerdo a diferentes factores como: el modo de fragmentación, sus pesos unitarios y tamaño de las partículas.

Figura 4. Formas de clasificar los agregados.



Fuente: Adoptado de Comisión Federal de Electricidad, Manual de tecnología del concreto (sección 1), México, 2015.

En la fabricación de mezclas de concreto, la forma generalizada de clasificar los agregados es mediante el tamaño de las partículas. En esta clasificación, se dividen las partículas en dos fracciones³:

La fracción fina (arena): constituida por todas las partículas con tamaños inferiores a 4.76 mm (tamiz No. 4) y no menores a 0.074 mm (tamiz No. 200). En cambio, la fracción gruesa (gravilla, grava, bolones): engloba a todas aquellas partículas que poseen un tamaño superior a 4.76 mm (tamiz No. 4).

2.2.2.2. Propiedades

Las principales propiedades de los agregados, como: el peso unitario, la granulometría, gravedad específica, absorción, humedad, resistencia a la abrasión etc., influyen en el comportamiento de las mezclas de concreto. Por ello, deben ser estudiadas antes de fabricar una mezcla.

- **Granulometría**

Se define como la distribución del tamaño de las partículas que componen una masa de agregado y se determina mediante un análisis granulométrico por tamices según la norma ASTM C 136. Los tamices utilizados tienen forma cuadrada y cumplen con la especificación ASTM E-11. El tamaño de estos varía entre 3 pulgadas y 0.074 mm (malla No. 200).

La distribución granulométrica de un agregado influye en la trabajabilidad del concreto, por tanto, es recomendable que posea una granulometría continua o que cumpla con ciertos límites en los porcentajes de material que pasan a través de cada uno de los tamices, conocidos como límites granulométricos, establecidos en la norma ASTM C 33 y ASTM D 448.

Sin embargo, se puede utilizar una granulometría que por experiencia o por pruebas de laboratorio haya demostrado que para una condición dada se producen concretos de óptima calidad.

³ Si desea ver una clasificación según su tamaño, Vea **Anexo 1.1**.

- **Tamaño Máximo (T.M.) y Tamaño Máximo Nominal (T.M.N.)**

De acuerdo con ASTM C 125-03, el T.M. del agregado corresponde a la menor abertura de tamiz a través del cual pasa la muestra completa de agregado. En cambio, el T.M.N. es el tamiz inmediatamente inferior al que pasa el 100% del material, en el cual se permite un porcentaje retenido de hasta 15%.

En las mezclas de concreto, el T.M del agregado que se pretende usar se selecciona en dependencia de factores como la forma del miembro de concreto que se va a colar, la cantidad y distribución del acero de refuerzo (armadura) y el espesor de la losa. Por ejemplo, no debe exceder el 3/4 de la distancia libre entre las varillas de refuerzo individual o paquetes de varillas o el 1/3 del espesor de la dimensión de las losas (PCA, 2004). Sin embargo, estas limitaciones se pueden omitir si la trabajabilidad y los métodos de compactación permiten que el concreto se pueda colar sin formación de vacíos o cavidades.

- **Módulo de finura (M. F.)**

Es un índice de qué tan fino o grueso es un agregado (ibídem, p. 109). Se obtiene a partir de la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados en las mallas No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4, 3/8", 3/4", 1 1/2" y 3" dividido entre 100. Generalmente, los valores del M. F varían entre 2.3 y 3.1 en las arenas

• **Gravedad Específica**

Es la relación que hay entre el peso de una muestra de agregado seco y el volumen de agua desalojado por esta, cuando se encuentra saturada y superficialmente seca (S.S.S.) (Blanco & Matuz, s.f.). Esta propiedad, es una medida indirecta de su calidad. Los valores bajos, son un índice de materiales porosos y poco confiables. La mayoría de los agregados gruesos naturales tienen valores de gravedad específica que varían de 2.4 a 3.0, **Ver Anexo 1.3** (PCA, 2004).

Los métodos de ensayo para la determinación de la gravedad específica de los agregados grueso y fino se describen en las normas ASTM C 127 (AASHTO T 85), y ASTM C 128 (AASHTO T 84) respectivamente.

- **Absorción**

Describe al porcentaje de agua necesaria para saturar los agregados (llenar los poros permeables) expresados con respecto a la masa de los materiales secos (CFE, 2001). Se determina después de un período de inmersión de 24 horas en agua, conforme a los métodos de prueba ASTM C 127 y ASTM 128, para agregado grueso y fino respectivamente.

- **Humedad**

Una partícula de agregado posee cierta porosidad en su interior, que le permite contener cierta cantidad de agua, definida como humedad y se expresa como porcentaje del peso seco del mismo (Blanco & Matuz, s.f.). En dependencia de la cantidad de agua presente en el agregado con relación a su capacidad de absorción; este puede presentar cuatro condiciones de humedad (**Ver Figura 5**):

- ✓ Secado al horno: Totalmente absorbente.
- ✓ Secado al aire: La superficie de las partículas está seca, pero su interior contiene - humedad y, por lo tanto, aún es ligeramente absorbente.
- ✓ Saturado con superficie seca (SSS): No absorben ni adicionan agua al concreto.
- ✓ Húmedos: Contiene un exceso de humedad sobre la superficie (agua libre).

Figura 5. Condiciones de humedad del agregado



Fuente: PCA, Diseño y control de mezclas de concreto , 2004.

Esta propiedad de los agregados se determina según la norma ASTM C 566 y se debe tener presente en la dosificación de mezclas de concreto, de lo contrario, se tendrán variaciones en la relación agua – cemento (Relación w/c).

- **Peso Unitario⁴**

Se define como la relación entre el peso de una determinada cantidad de agregado y el volumen ocupado por el mismo (ibídem, p. 10). Según el acomodamiento dado a las partículas del agregado, se obtienen dos pesos unitarios: el peso unitario seco suelto (PVSS) y el peso unitario seco compacto (PVSC). Estos pesos se determinan de acuerdo con la norma ASTM C 29 y/o AASHTO T 19.

Asimismo, está relacionado con la gravedad específica y con la graduación de este. De modo que, los agregados con altos valores de peso unitario indican una buena gradación y calidad, en cambio, valores bajos aluden la existencia de materiales uniformes, porosos y de poca dureza.

- **Resistencia a la abrasión o desgaste**

Se conceptualiza como la resistencia que oponen los agregados gruesos a sufrir desgastes, rotura o desintegración de partículas por efecto de la abrasión. Es importante para agregados utilizados en la fabricación de concretos durables, sujetos a acciones abrasivas, generalmente de índole mecánica (como se presentan en pavimentos y pisos industriales) y las de origen hidráulico que se generan a causa del arrastre de las partículas por el agua que fluye en contacto con el concreto (como suele acontecer en canales, túneles y vertederos).

El ensaye con que se mide la resistencia a la abrasión de los agregados gruesos se lleva a cabo en la máquina de los Ángeles, mediante dos procedimientos, uno para los tamaños iguales o menores de 12.5 mm (1/2") mediante ASTM C 131, y otro, para los tamaños entre 19 (1/2") y 76 mm (3") de acuerdo con ASTM C 535.

⁴ En **Anexo 1.2** (Tabla A-2). Se muestra la clasificación de los agregados de acuerdo con su densidad.

En ese sentido, cabe señalar que el porcentaje de abrasión del agregado debe cumplir con el límite recomendado por la norma ASTM C 33.

- **Impurezas y sustancias perjudiciales**

La contaminación de los agregados se manifiesta negativamente sobre el concreto, tanto en estado fresco como endurecido. Los principales elementos perjudiciales que se presentan en los agregados son: las partículas muy finas, las partículas débiles, inestables e impurezas orgánicas, que en exceso son inconvenientes para cualquier concreto.

- **Impurezas orgánicas**

Los agregados para concreto pueden contener materia orgánica originada por la descomposición de elementos vegetales en cantidades perjudiciales, que pueden afectar las reacciones de hidratación, disminuyendo la resistencia o afectando el tiempo de fraguado del concreto (Montenegro, 2011).

Para determinar cualitativamente la cantidad de materia orgánica presente en el agregado fino, se realiza la prueba de colorimetría según ASTM C 40, que consiste en colocar en un recipiente de 8 a 16 onzas (240 - 740 ml.) de capacidad, aproximadamente 130 ml. (4 ½ onzas) de arena y luego una solución de Hidróxido de sodio (NaOH) hasta llegar a un volumen de 200 ml (7 onzas) después de su agitación, dejando reposar por un período de 24 horas.

Después se compara la coloración de la solución con una tarjeta de colores que contiene cinco coloraciones que van desde un color amarillento hasta una coloración oscura, siendo la tercera coloración la máxima permisible.

2.2.3. Agua de mezclado

Debe cumplir con ciertos requisitos de composición y desempeño, regulados por la especificación ASTM C 1602. No obstante, se permite el uso de agua potable como agua de mezcla en el concreto, sin necesidad de ensayarla para determinar su conformidad con los requisitos de esta especificación.

La calidad del agua es importante, ya que las impurezas que contenga pueden interferir en los tiempos de fraguado, afectar negativamente la resistencia del concreto u ocasionar el manchado de su superficie, así como llevar a la corrosión del refuerzo (ASOCRETO, 2010).

2.2.4. Aditivos

El aditivo es un material distinto al cemento hidráulico, los agregados, al agua o las fibras; utilizado como ingrediente del concreto para modificar sus propiedades tanto en estado fresco como en estado endurecido. Este se añade a la amasada (bachada) de concreto, inmediatamente antes o durante su mezclado (ACI 318, 2014).

Los aditivos no solo se utilizan para modificar las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto, sino también por economía, porque puede ser el único medio por el cual se pueda obtener el resultado requerido, como: trabajabilidad, retardar o acelerar el tiempo de fraguado (ACI 212, 1991).

Según los efectos causados en la mezcla de concreto, los aditivos pueden ser clasificados, como:

1. Acelerantes (ASTM D 98),
2. Reductores de agua y controladores del fraguado (ASTM C 494),
3. Superplastificantes (ASTM C 1017),
4. Incluidores de aire (ASTM C 260) y
5. Colorantes (ASTM C 979).

Capítulo III. Concreto permeable

3.1. Definición

Es un concreto formado por un esqueleto granular, en el que el agregado grueso está rodeado por la cantidad justa de mortero o pasta, de manera que, permita la adherencia de las partículas de agregado sin afectar su permeabilidad. Por ello, es posible obtener densidades que oscilan generalmente entre el 70 y 80 % respecto a los concretos convencionales, en dependencia del grado de compactación y características del agregado.

El Instituto Americano del Concreto, ACI 522 R 10 proporciona una definición clara de este concreto:

Un material de estructura abierta con revenimiento cercano a cero, compuesto por cemento Portland, agregado grueso, poco o nada de finos, agua y aditivos. La combinación de estos ingredientes produce un material endurecido con poros interconectados (como en la **Figura 6.**), cuyo tamaño varía de 2 a 8 mm lo que permite el paso de agua. El contenido de vacíos puede variar de un 15 a un 35 por ciento, con resistencias a compresión típicas de 2.8 a 28 MPa. Su velocidad de drenaje depende del tamaño del agregado y de la densidad de la mezcla, pero generalmente varía en el rango de 81 a 730 L/min/m² (0.14 a 1.22 cm/s). (p.1)

Figura 6. Concreto permeable en estado endurecido.



Fuente: Propia, Managua, junio 2017.

Se puede clasificar en dos tipos: uno donde la porosidad está presente en el agregado que compone la mezcla (concreto con agregados de peso ligero: agregados porosos o sintéticos), y otro, donde la porosidad se introduce como componente de la mezcla (Neithalath, 2004). La diferencia entre ambos radica en que el segundo, contiene en su estructura altos porcentajes de vacíos interconectados, permitiendo el paso del agua de forma rápida en el concreto.

3.2. Aplicaciones

Generalmente, el concreto permeable es aplicable donde se requiera tener áreas que permitan al agua de lluvia infiltrarse libremente al subsuelo, contribuyendo además a la reducción o eliminación de los drenajes pluviales.

Entre las principales aplicaciones mencionadas por ACI 522 R-10 (2015), destacan:

- Pavimentos y estacionamientos permeables de bajo tráfico vehicular (como en la **Figura 7**)
- Capas Rígidas de Drenaje en zonas externas de centros comerciales;
- Pisos de efecto invernadero para mantener el suelo libre de agua estancada.
- Paredes no estructurales en las se requiera un mayor aislamiento térmico
- Pavimentos, paredes y pisos donde se desee mejor absorción acústica
- Base para las calles, carreteras, caminos y aeropuertos.
- Superficie para los parques y las canchas de tenis.
- Pisos en zonas de parque, zoológico y establos.
- Cubierta de piscinas
- Estructuras de Playas y Malecones
- Los forros de pared para pozos de agua; y
- Los arrecifes artificiales donde la estructura abierta de hormigón permeable imita la estructura del arrecife.

Este concreto se utiliza sin refuerzo en todas sus aplicaciones por el inminente riesgo de corrosión del acero, debido a la alta porosidad del material (ídem).

Figura 7. Concreto permeable como carpeta de rodadura en una de las calles de la ciudad de Sultan, Washington.



Fuente: Bruce K Ferguson, Porous Pavements in North America Experience & Importance, Nebraska, 2011.

Para aplicarlo como carpeta de rodadura en pavimentos, es necesario realizar dos diseños. El primero, es un análisis estructural para adecuar la estructura de pavimento a las solicitaciones de carga que estará sometida, y el segundo, es para proporcionar a la estructura las características hidráulicas necesarias, para controlar un evento de lluvia de diseño.

3.3. Ventajas y limitaciones

Al utilizar concreto permeable en diferentes aplicaciones, se presenta numerosas bondades en varios aspectos: técnico, social, ambiental y económico. Argos (2014), las resume en las siguientes:

- Permite el desarrollo urbano recreando el ciclo natural del agua, con un uso controlado del sistema de alcantarillado existente, sin saturarlo o demandar un incremento de secciones para la conducción del agua,
- Reduce y/o elimina la necesidad de estructuras especiales (bordillos, cunetas, sumideros, tubería, cajas de inspección y estructuras de retención) para el manejo de aguas de escorrentía,

- Con un adecuado diseño, construcción, uso y mantenimiento puede ofrecer una vida útil hasta de 20 años o mayor. Esto permite optar a préstamos destinados a mejorar la sostenibilidad ambiental (Banco Interamericano de Desarrollo, 2012).
- Disminuye el encharcamiento del agua después de lluvias fuertes, reduciendo el riesgo de hidroplaneo y salpicaduras.
- Reduce la necesidad de iluminación artificial, disminuyendo los consumos energéticos debido al color que presenta el concreto.
- Mitiga el efecto “isla de calor”.

Pérez Ramos (2010), añade otros importantes beneficios proporcionados por el concreto permeable:

- Mejor distribución de las cargas transmitidas (en el caso de pavimentos) hacia el terreno, debido a la existencia de puntos de contacto aleatorios en el concreto.
- El índice de fisuras en el concreto permeable es 25% menor, debido a la baja retracción por el índice de vacíos contenidos en comparación a un concreto convencional.
- Filtra los agentes que pueden contaminar las aguas subterráneas y dañar ecosistemas.

A pesar de tales beneficios, también se han presentado las siguientes limitantes:

- Disminución de la permeabilidad del concreto con el paso del tiempo (Pérez, 2010).
- Falta de métodos de ensayo estandarizados para verificar algunas propiedades de resistencia del concreto permeable (ACI 522 R-10, 2015).
- Extenso tiempo de curado (ídem); falta de conocimiento, experiencia y desconfianza de los técnicos (García, 2011).

3.4. Materiales componentes⁵

El éxito de las mezclas de concreto permeable, depende de la cantidad y las características de los materiales empleados, por tanto, se recomienda que cumplan con lo siguiente:

3.4.1. Cemento

El ACI 522 R-10 establece que se puede utilizar un cemento que cumpla con las especificaciones de las normas ASTM C150, ASTM C 585 y ASTM C 1157. Aunque, el cemento constituye entre 6 y 15% en peso de la mezcla, influye considerablemente en sus propiedades, tanto en estado fresco como en estado endurecido. Así mismo, este reporte cita a Tennis et. Al. (2004) para recomendar una cantidad de cemento entre **270 a 415 kg/m³ de concreto**, que permita alcanzar requisitos de resistencia y permeabilidad adecuados.

3.4.2. Agregados

Los agregados, gruesos y finos utilizados en las dosificaciones de mezclas de concreto permeable, deben cumplir con la gradación de las normas ASTM C 33 y ASTM D 448. El ACI 522 R-10 recomienda el uso del agregado redondeado o triturado que esté entre los tamaños 3/4 y 3/8 pulg. (19 y 9.5 mm). Por otro lado, si se adiciona agregado fino a la mezcla para aumentar su resistencia, su cantidad deberá ser limitada ya que tiende a incidir en la capacidad de percolación del concreto.

También, se ha investigado el uso de áridos reciclados en el concreto permeable, donde se encontró que las muestras que contienen 15% de agregados reciclados (Peso total de los agregados) presentaban características casi idénticas a la muestra con agregados vírgenes (Rizvi, 2009).

⁵ Estas cantidades de material son recomendadas por el ACI 522 R – 10: Reporte sobre concreto permeable.

3.4.3. Agua

El agua de mezclado en el concreto permeable, debe cumplir con los requisitos mencionados en la norma ASTM C 1602. La dosificación de agua en el concreto permeable es crítica porque con la eliminación de algunos finos, la resistencia se basa en el vínculo de la pasta de cemento y su interrelación con los agregados (Mulligan, 2005).

En este sentido, una cantidad insuficiente de agua da como resultado una mezcla sin cohesión y con baja resistencia, en cambio, la adición de una cantidad excesiva de agua escurrirá la pasta y sellará los poros del concreto (Vigil S., 2012).

Como criterio para determinar la cantidad óptima de agua, encontrar la cantidad con la cual la mezcla adquiera una apariencia húmeda – metálica (Ghafoori, s.f.).

3.4.4. Aditivos

Usualmente se emplean los aditivos reductores de agua (rango medio o alto), y aditivos retardantes. Estos se adicionan al concreto durante el mezclado, en porcentajes entre 0.1% y 5% (según el producto o el efecto deseado) de la masa o peso del cemento.

Los aditivos reductores de agua (rango medio o alto) se emplean para aumentar el tiempo de trabajabilidad del concreto permeable, porque naturalmente es bajo debido a que está compuesto de una buena cantidad de agregados gruesos y de relaciones agua/cemento bajas. Los aditivos retardantes son usados para controlar el tiempo de fraguado rápido asociado a la porosidad del concreto.

Enfatizando que es necesario realizar bachadas de prueba, para evaluar y analizar el uso de cualquier aditivo, con respecto a la influencia en el concreto, las prácticas de construcción, las especificaciones de trabajo y las ventajas económicas que ofrece su empleo (NRMCA, s.f.).

3.5. Proporcionamiento de mezclas de concreto permeable⁶

3.5.1. Variables experimentales

Algunas instituciones, investigaciones y revistas especializadas, puntualizan las principales variables que intervienen en el proceso de proporcionamiento:

3.5.1.1. Relación agua/cemento (w/c)

Esta variable es vital para obtener una estructura porosa en el concreto permeable. Una alta w/c, reduce la adhesión de la pasta al agregado y hace que la pasta fluya y llene los vacíos, incluso cuando se ha compactado ligeramente (ACI 522 R-10, 2015).

En cambio, una baja relación w/c, evita una buena mezcla y suele provocar formación de bolas en el mezclador, lo que impide una distribución uniforme de la pasta de cemento, y por lo tanto reduce la resistencia final y durabilidad del hormigón (Ídem).

Al respecto, la experiencia ha demostrado que una relación w/c entre el intervalo **0.26 - 0.45**, proporciona una mejor estabilidad y cohesión de los agregados. Usualmente se utiliza como criterio para determinar este valor, el encontrar la cantidad de agua con la cual la pasta adquiere un brillo metálico.

En caso de que se utilice arena en el proporcionamiento y para una cantidad fija de cemento, la relación w/c tiende a aumentar, puesto que se requiere una mayor cantidad de pasta que recubra todos los áridos.

Por último, hay que mencionar que la relación convencional entre la relación **w/c** vs **la resistencia a la compresión** no es aplicable en este concreto (ACI 522 R-10, 2015).

⁶ Basado en las recomendaciones del ACI 522 R – 10.

3.5.1.2. Porcentaje de vacíos

Para asegurar la red de poros interconectados se recomienda que el contenido de vacíos en el diseño de la mezcla de concreto sea aproximadamente del **15%** o mayor (Ídem). Sin embargo, se recomienda que no debe superar el **25%**, dado que puede ocasionar inestabilidad en la mezcla (Universidad Técnica de Machala, 2015). Esto se debe a que es un factor determinante en la resistencia mecánica: a mayor porcentaje de vacíos resulta una menor resistencia.

El ACI 522 (2006) es citado por Arrieta & Carro (2011, p.2), para resaltar que el porcentaje de vacíos que presentan las mezclas de concreto permeable varía según la energía de compactación aplicada, la granulometría del agregado utilizado, la relación w/c y el contenido de material cementante utilizado. Se determina mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM C 1688.

3.5.1.3. Porcentaje de agregado fino⁷.

El contenido de agregado fino es limitado en mezclas de concreto permeable debido a que este tiende a comprometer el sistema de poros interconectados. El ACI 522 (2006) cita al Instituto del Cemento Portland Argentino (1998) para limitar la cantidad de arena en la mezcla, a partir de la relación Árido Fino/Árido Grueso (AF/AG) por volumen, cuyo valor varía entre **0.05 y 0.30**, según la aplicación que se le dará al concreto.

Por ejemplo, si la relación $AF/AG < 0.05$, la adherencia del mortero entre las partículas de agregado grueso no adquiere la suficiente estabilidad para evitar la segregación y resistencia bajas.

En cambio, si la relación $AF/AG > 0.30$, se obtienen mayores contenidos de arena (mortero), de forma que incrementará la resistencia por la disminución de la porosidad (Arrieta & Carro, 2011).

⁷ El porcentaje de agregado fino corresponde al volumen total de agregados.

3.5.2. Procedimiento de proporcionamiento recomendado por el ACI-522R-10.

La filosofía principal del proporcionamiento es alcanzar un balance entre vacíos, resistencia, contenido de pasta y trabajabilidad (Vigil S., 2012). No se ha concertado una metodología única y decisiva para la fabricación de mezclas de concreto permeable. Sin embargo, el ACI 522 R-10 aporta recomendaciones muy importantes en cuanto al proporcionamiento de las mezclas.

Su enfoque se basa en el trabajo realizado por Ing. Richard C. Meininger en el año 1988, siendo miembro del Comité ACI 211 y vice presidente de NRMCA. Meininger provee un método para el proporcionamiento de mezclas de concreto permeable que se pretendan utilizar en pavimentos y otras aplicaciones donde el drenaje, filtración y/o alta porosidad sean requeridas.

Según Meininger (1988), las pruebas han demostrado que P.V.S.C. del agregado grueso, determinado de acuerdo ASTM C29 / C29M, puede ser utilizado eficazmente para la dosificación de concreto permeable. Estas pruebas han demostrado que la relación b/b_0 se puede utilizar como una relación de diseño, donde:

b/b_0 = volumen seco-compactado del agregado grueso en una unidad de volumen de concreto.

b = volumen sólido del agregado grueso en una unidad de volumen de concreto;

b_0 = volumen sólido de agregado grueso en una unidad de volumen de agregado grueso.

El valor b/b_0 , compensa automáticamente los efectos de las diferentes formas de las partículas de los agregados, su clasificación y su gravedad específica (ibíd.). Por otro lado, los valores b/b_0 para agregados con tamaño máximo nominal de 3/8" a 3/4" (9.5 mm a 19 mm) utilizados normalmente en el concreto permeable, son similares. La **Tabla 2** muestra los valores de b/b_0 aplicados a agregados gruesos con tamaño No.8 (TMN: 3/8") y No. 67 (TMN: 3/4") con contenidos de agregados finos de 0, 10 y 20% de la masa total de agregados.

Tabla 2. Valores efectivos de b/b_0

Porcentaje de agregados finos	b/b_0	
	ASTM C33/C33M Tamaño No. 8	ASTM C33/C33M Tamaño No. 67
0	0,99	0,90
10	0.93	0.93
20	0,85	0,86

Fuente: ACI 522 R-10: Reporte sobre Concreto Permeable, ACI, 2011 (pag.12).

Para una mejor comprensión del método, el ACI 522-R10 enumera 7 pasos:

1. Determinar el peso de los agregados.

$$W_a = (PVSC) \times \left(\frac{b}{b_0}\right) \times (U.C) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

W_a = Peso del agregado grueso.

PVSC = Peso volumétrico seco compacto del agregado grueso.

b/b_0 = volumen seco-compactado del agregado grueso en una unidad de volumen de concreto.

U.C = Volumen unitario de concreto,

2. Ajustar el peso saturado superficialmente seco.

$$W_{SSS} = (W_a) \times (\% \text{ Abs.}) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

W_{SSS} = Peso saturado superficialmente seco del agregado grueso.

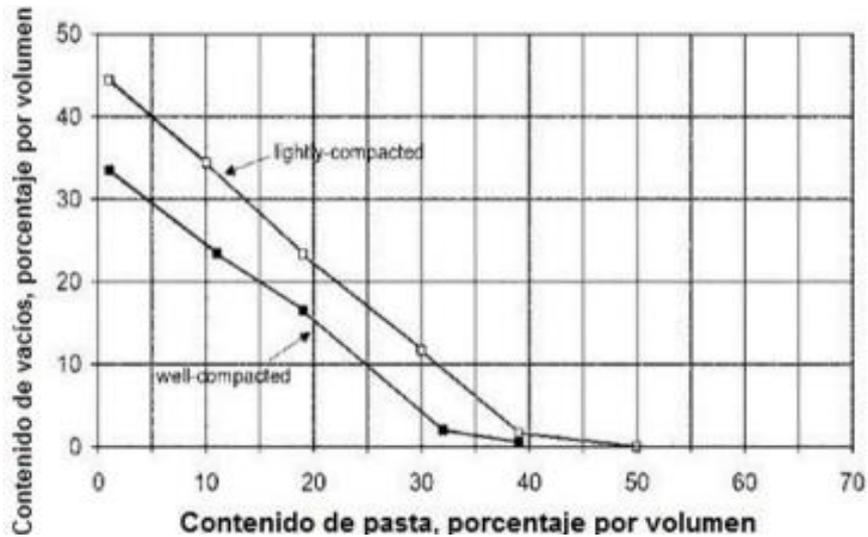
W_a = Peso del agregado grueso.

% Abs. = Porcentaje de absorción del agregado grueso.

3. Seleccionar el volumen de pasta

En el proporcionamiento de mezclas de concreto permeable se requiere un volumen mínimo de pasta para unir las partículas de agregado, manteniendo al mismo tiempo el contenido de vacío necesario y la resistencia. Como se muestra en la **Figura 8**, el ACI 522 R-10, estima el volumen de pasta necesario con relación al porcentaje de vacíos de diseño:

Figura 8. Relación entre pasta y contenido de vacíos para agregados de Tamaño N° 8 según la Norma ASTM C 33.



Fuente: Report on Pervious Concrete, ACI Committee 522 R10, 2011.

$$V_p = (\% \text{ PPV}) \times (\text{U. C}) \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

V_p = Volumen de pasta.

% PPV = Porcentaje de pasta por volumen.

U. C = Volumen Unitario de concreto⁸.

4. Determinar el peso de cemento

$$C = [V_p / (GE_{\text{cemt.}} + w/c)] \times \gamma_w \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

C = Peso de cemento.

V_p = Volumen de pasta.

$GE_{\text{cemt.}}$ = Gravedad específica del cemento.

w/c = Relación agua-cemento.

γ_w = Densidad del agua.

⁸ Volumen unitario de concreto, es decir, 1 metro cúbico, 1 pie cúbico, 1 yarda cúbica etc...

5. Calcular el peso del agua

$$W = C(w/c)$$

Ecuación 5

Donde:

W= Peso del agua.

C= Contenido de cemento.

w/c= Relación agua-cemento.

6. Determinar el volumen de materiales

- Volumen de Agregado Grueso:

$$V_a = W_{SSS}/(GE_{Ag.} \times \gamma_w)$$

Ecuación 6

Donde:

V_a= Volumen de agregado grueso.

W_{SSS} = Peso saturado superficialmente seco del agregado grueso.

GE_{Ag.} = Gravedad específica del agregado grueso.

γ_w = Densidad del agua.

- Volumen de Cemento

$$V_C = C/(GE_{Cemt.} \times \gamma_w)$$

Ecuación 7

Donde:

V_C = Volumen de cemento.

GE_{cemt.} = Gravedad específica del cemento.

γ_w = Densidad del agua.

- Volumen de Agua

$$V_w = W/\gamma_w$$

Ecuación 8

Donde:

V_w = Volumen del agua.

W= Peso del agua.

γ_w = Densidad del agua.

- Volumen de materiales

$$V_S = V_C + V_W + V_a$$

Ecuación 9

Donde:

V_S = Volumen de material sólido.

V_C = Volumen de cemento.

V_w = Volumen del agua.

V_a = Volumen de agregado grueso.

7. Verificar el contenido de vacíos en la mezcla de concreto.

$$\% VM = \left[\frac{V_U - V_S}{V_U} \right] \times 100$$

Ecuación 10

Donde:

$\% VM$ = Porcentaje de vacíos en la mezcla de concreto.

V_U = Volumen unitario de concreto.

V_S = Volumen de material sólido.

3.6. Propiedades del Concreto Permeable

El Subcomité C09.49 de ASTM, es el responsable de desarrollar investigaciones para determinar los métodos de ensayo aplicables al concreto permeable y que puedan agregarse a las normas ASTM. Actualmente, bajo la jurisdicción de este Sub Comité, existen 4 métodos de prueba para determinar las propiedades del concreto: ASTM C 1688, ASTM C 1701, ASTM C 1747 y ASTM C 1754.

3.6.1. Propiedades en estado fresco

3.6.1.1. Trabajabilidad

Las mezclas de concreto permeable en estado plástico, son rígidas en comparación con el concreto convencional. Un indicativo indirecto de la trabajabilidad del concreto es la consistencia, que en concretos convencionales es medida mediante la Norma ASTM C 143. En los concretos permeables, cuando es medido el asentamiento siguiendo dicho método, generalmente es menor de 3/4 pulgadas (20 mm) (Tennis et al., 2004).

Sin embargo, estos valores se usan solo como referencia ya que, para determinar un asentamiento real, la Norma ASTM C 143 no brinda resultados acertados en dicho concreto (Rodas, 2012).

Por tanto, para verificar que la mezcla presente una consistencia satisfactoria se puede aplicar el Método de **Hand-Squeeze** o Método del apretón de mano, que consiste en lo siguiente:

- El contenido de agua utilizado produce una mezcla con una apariencia o brillo metálico húmedo,
- Al ejercer presión y soltar un puñado de mezcla de concreto en la mano, no se desmorona ni se obstruyen los poros y
- No hay pasta de cemento, que fluya lejos de las partículas de los agregados.

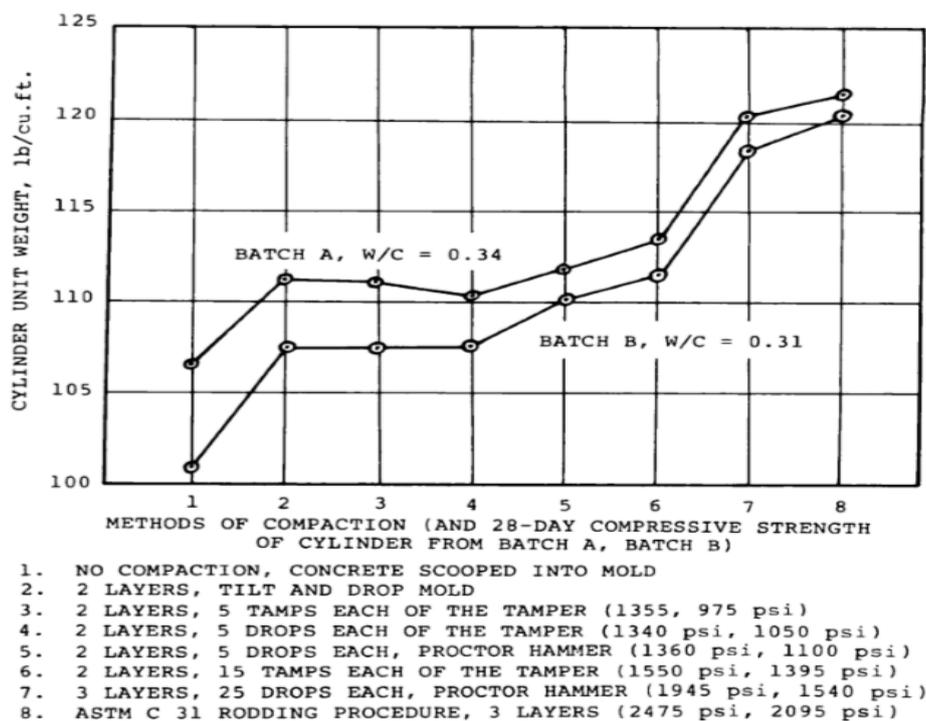
3.6.1.2. Densidad y Contenido de Vacíos

Para garantizar la calidad y aceptación del concreto permeable, se utiliza como parámetro de referencia la densidad del concreto recién mezclado, puesto que, algunas propiedades del concreto como el revenimiento no tienen ninguna importancia (Tennis et al., 2004). Walter Flood, miembro del Subcomité C 09.49 menciona que:

La densidad y el contenido de vacíos del concreto permeable controlan la mayoría, sino todas, las propiedades físicas del material. La resistencia, la permeabilidad y la durabilidad, están en gran medida regidas por la densidad y el contenido de vacíos de la mezcla del concreto. (ASTM, 2010, párr. 4)

Como se observa en la **Figura 9**, con la variación del esfuerzo de compactación se obtienen distintos valores de pesos unitarios.

Figura 9. Pesos Unitarios de cilindros y esfuerzos para 8 diferentes métodos de compactación.



Fuente: Richard Meininger, No-Fines Pervious Concrete for Paving, Maryland, 1988.

El valor se determina de acuerdo con la norma ASTM C1688/C1688 M, que consiste en medir, pesar y humedecer el molde cilíndrico y llenarlo en dos capas de espesores aproximadamente iguales, donde con el Martillo Próctor Estándar se le ejecutan 20 golpes por capa. Finalmente, se pesa el molde con el concreto y se determina la densidad conforme a la siguiente ecuación:

$$D = \frac{M_c - M_m}{V_m} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

D = Densidad real del concreto permeable

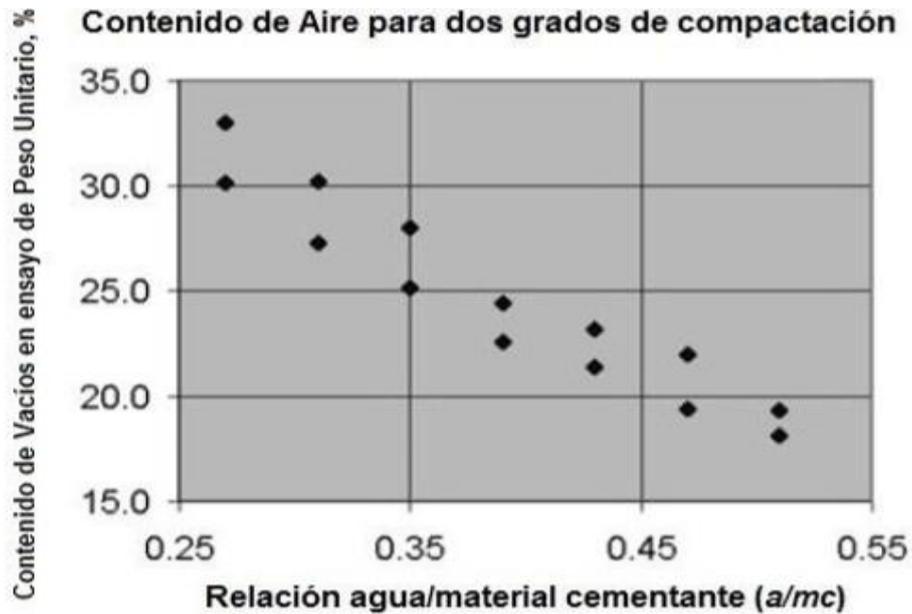
M_c = Peso del molde lleno de concreto

M_m = Peso del molde vacío

V_m = Volumen del molde

Según se observa en la **Figura 10**, el contenido de vacíos aumenta al utilizar una menor relación w/c. Por tanto, la relación w/c está inversamente relacionada con el contenido de vacíos del concreto, tal como se menciona en ítem 3.5.1.1.

Figura 10. Contenido de Aire vs., w/c para dos Grados de Compactación.



Fuente: Report on Pervious Concrete, ACI Committee 522 R10, 2011.

Dicho contenido de vacíos es determinado según la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Vac.} = \frac{T - D}{T} * 100$$

Ecuación 12

Donde:

% Vac.= Porcentaje de vacíos del concreto recién mezclado.

D = Densidad real

T = Densidad teórica

W_s = Peso de los materiales que componen la mezcla

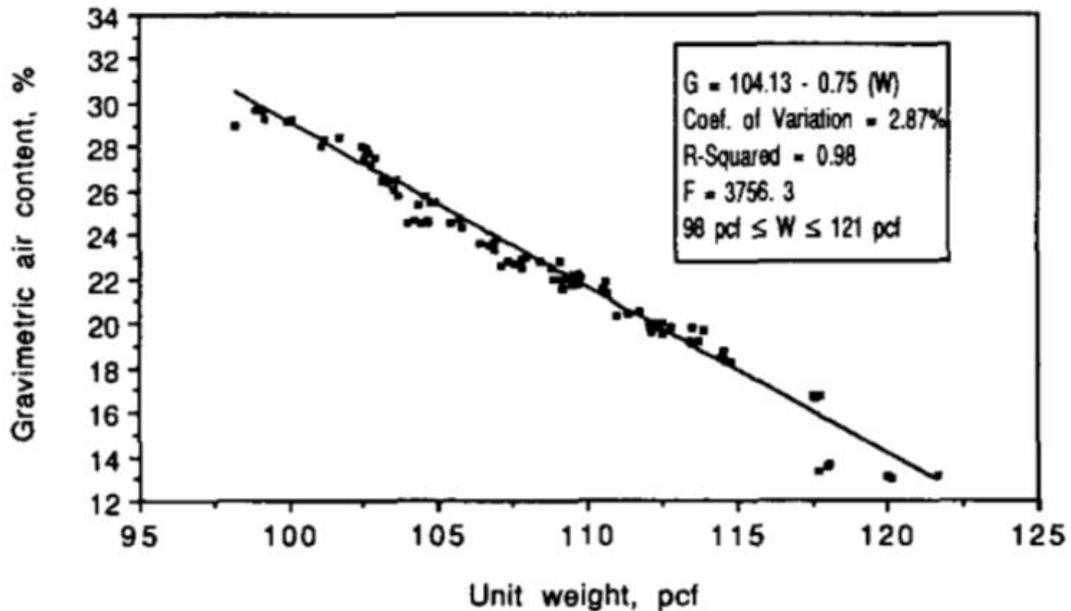
Vol_s = Volumen de los materiales que componen la mezcla

$$T = \frac{W_s}{Vol_s}$$

Ecuación 13

Finalmente, la **Figura 11** muestra la variación lineal entre el contenido de vacíos y la densidad del concreto, donde a mayor porcentaje de vacíos se obtiene una mayor densidad e inversamente con un menor contenido de vacíos.

Figura 11. Relación entre el Contenido de Vacíos Vs Peso Unitario.



Fuente: Ghafoori y Dutta, Laboratory Investigation of Compacted No-Fines Concrete for Paving Materials, Illinois, 1995

3.6.2. Propiedades en estado endurecido

Es importante determinar las propiedades del concreto en estado endurecido (densidad, resistencia a la degradación por impacto y abrasión, permeabilidad...etc.) porque permiten verificar si cumplen con las especificaciones de cualquier proyecto. Sin embargo, como se menciona en **acápito 3.6.**, no hay métodos estandarizados para cuantificar todas las propiedades.

3.6.2.1. Resistencia a la compresión

En los concretos, la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto a carga axial se le conoce como resistencia a la compresión. Se determina de acuerdo con la norma ASTM C 39, se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm²) a una edad de 28 días y se identifica con la siguiente nomenclatura (f'c).

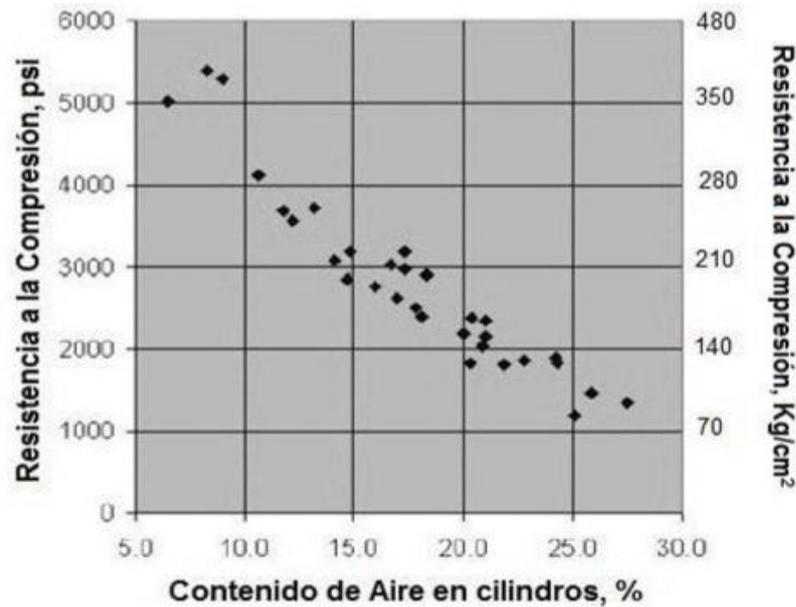
Sin embargo, en el concreto permeable no existe Método o Práctica Normalizada para la preparación de especímenes de ensaye para la determinación de la resistencia a carga axial. Por esta razón, Richard C. Meininger, miembro del Comité de actividades técnicas de ACI y del Comité ACI 211, propuso un método para la fabricación y curado en laboratorio, con el objetivo de determinar la resistencia a compresión de dicho concreto, el cual está en proceso de aprobación por parte del Comité C 09 de ASTM.

El método propuesto consiste en realizar lo siguiente:

1. Fabricar cilindros de 4"x8" según ASTM C31, con la diferencia que el cilindro se rellena en tres capas de aproximadamente igual espesor, conservando el número de golpes (25 golpes) para la compactación de cada capa.
2. Curar en el molde durante 6 días.
3. En el día de ensayo, se cabecean según ASTM C617 con el propósito de obtener superficies planas en los extremos de los cilindros.
4. Ensayarlos según ASTM C 39.

Según registros de investigaciones anteriores, se han desarrollado mezclas de concreto permeable con resistencia a compresión entre 500 psi a 4000 psi (3,5 MPa a 28 MPa), adecuado para varias aplicaciones. Aunque, como se muestra en la **Figura 12**, usualmente los valores desarrollados oscilan los 2500 psi (17 MPa) (Tennis et al., 2004).

Figura 12. Resistencia a Compresión vs Contenido de aire en especímenes de concreto permeable.



Fuente: Report on Pervious Concrete, ACI Committee 522 R10, 2011.

Por otro lado, según Ghafoori y Dutta (1995), la resistencia a compresión del concreto permeable es afectada por el esfuerzo de compactación y la disponibilidad de la pasta de cemento, dado que, con una cantidad suficiente de pasta y la aplicación de una elevada energía de compactación, proporciona un mejor acomodamiento de las partículas del agregado grueso.

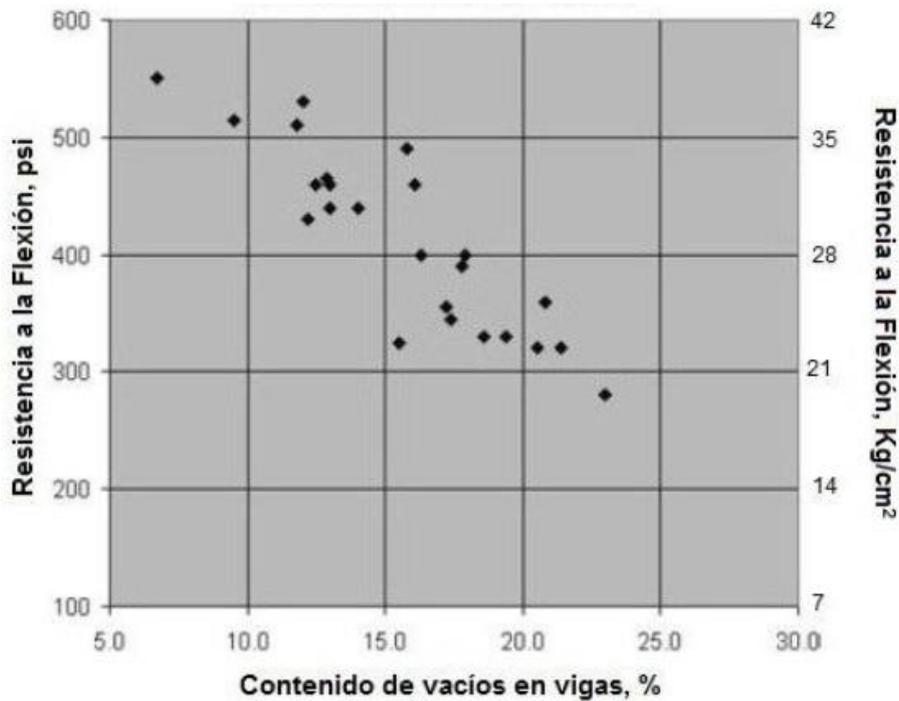
Para evaluar la resistencia a compresión del concreto en el sitio, la extracción de núcleos es la mejor opción, dado que, los cilindros moldeados para este ensayo no son representativos, por los diferentes métodos de compactación empleados (Tennis et al., 2004).

3.6.2.2. Resistencia a la flexión

Generalmente la resistencia a la flexión en concretos permeables varía entre 150 psi y 550 psi (Ibídem, p.6). Esta propiedad se determina de acuerdo con ASTM C 78 y es afectada por los mismos factores que influyen en la resistencia a compresión.

Tal como se muestra en la **Figura 13**, la resistencia a flexión del concreto esta inversamente relacionado con la porosidad; por lo que, al reducir el contenido de vacíos añadiendo cierta cantidad de arena se mejora el valor de resistencia, pero se reduce la capacidad percolante del concreto.

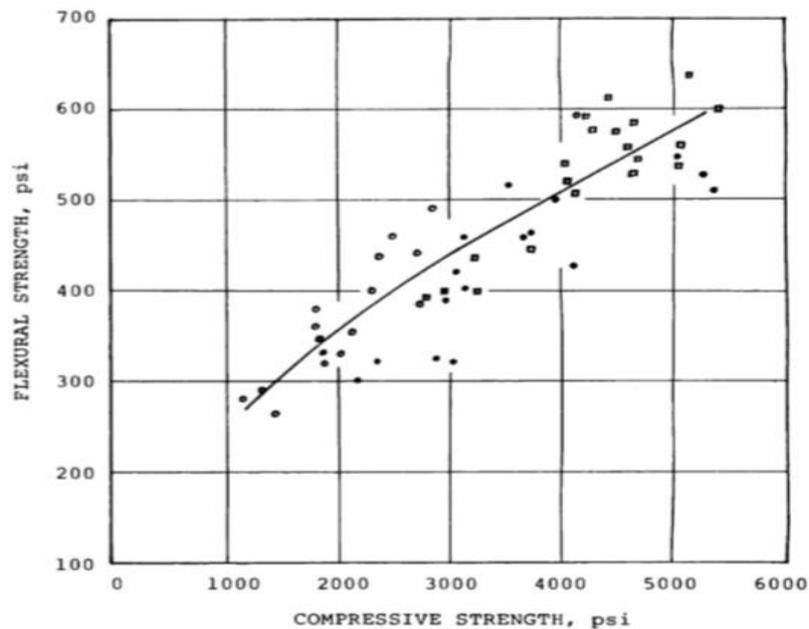
Figura 13. Relación entre la Resistencia a Flexión y el Contenido de Vacíos.



Fuente: Report on Pervious Concrete ACI Committee 522 R10, 2011.

También, como puede apreciarse en la **Figura 14** existe cierta relación entre la resistencia a flexión y a compresión en el concreto permeable (Meiniger, 1988). De este modo, en el diseño de mezclas para pavimentos se puede definir una resistencia a flexión que pueda soportar las cargas impuestas, mediante la correlación con su resistencia a compresión.

Figura 14. Relación entre la Resistencia a Compresión y Resistencia a Flexión



Fuente: Richard Meininger, No-Fines Pervious Concrete for Paving, Maryland, 1988.

El ACI 522 R10 (2015) cita a Crouch et al. (2003) para referirse que la relación entre la resistencia a la flexión [Módulo de ruptura] (f_r) y la compresión (f'_c) para pavimentos permeables, es definida mediante la ecuación propuesta por Ahmad y Shah (1985), las cuales son:

$$f_r = 2.3f'_c{}^{2/3} \quad (\text{PSI, Sistema ingles})$$

Ecuación 14

$$f_r = 0.083f'_c{}^{2/3} \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}, \text{Sist. Int.}\right)$$

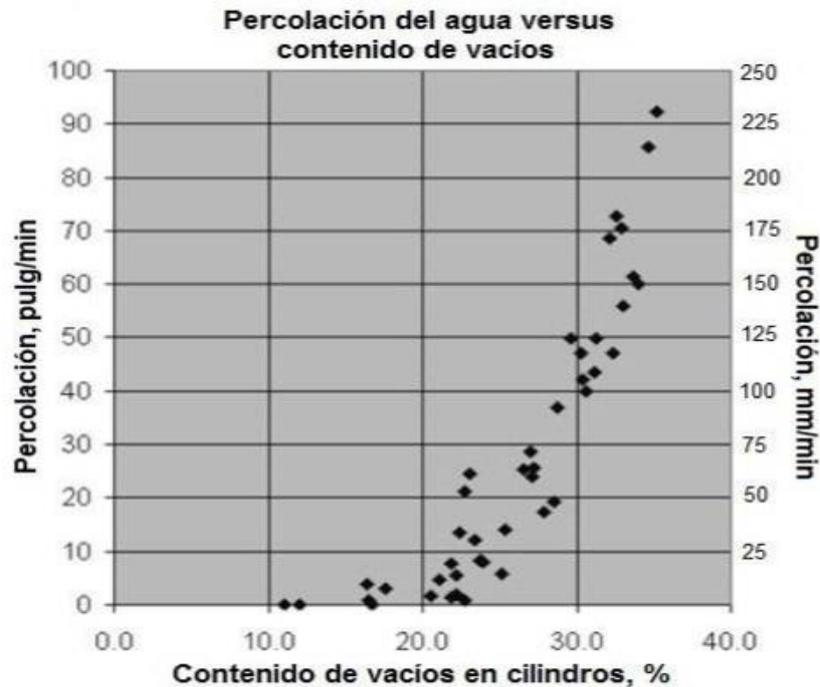
Ecuación 15

3.6.2.3. Permeabilidad

Es la propiedad física más importante del concreto permeable, dado que es diseñado para permitir el paso del agua a través de su estructura. Para ello, se requiere una porosidad aproximadamente del 15% para obtener una percolación significativa (Meiniger, 1988).

En la **Figura 15** se muestra, como el contenido de vacíos se encuentra relacionado con la tasa de percolación del concreto permeable.

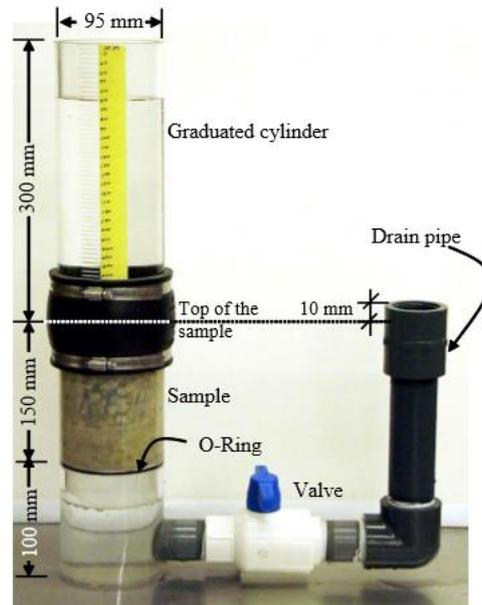
Figura 15. Tasa de Percolación vs Contenido de Vacíos en cilindros.



Fuente: Report on Pervious Concrete, ACI Committee 522 R10, 2011.

En el laboratorio, esta permeabilidad puede determinarse mediante el permeámetro como el desarrollado por Neithalath. El permeámetro consiste en medir el tiempo que tarda el agua en transitar desde una altura inicial (h_1) de 30 cm (300 mm) hasta una altura final (h_2) de 15 cm (150 mm) por encima de la muestra de concreto, tal como se muestra en la **Figura 16**.

Figura 16. Permeámetro de carga variable para medir la permeabilidad del concreto permeable.



Fuente: Neithalath, Development and characterization of acoustically efficient cementitious materials, 2004.

En cambio, la tasa de infiltración en campo se puede medir mediante la norma ASTM C 1701. Como en la **Figura 17**, la prueba consiste en verter cierta cantidad de agua dentro de un anillo con diámetro de 300 ± 10 mm (12.0 ± 0.5 pulg) y una altura mínima de 50 mm (2.0 pulg), comenzando a cronometrar tan pronto como el agua toque la superficie del concreto. El cronometro se debe detener cuando el agua deje de estar presente en la superficie del concreto. El tiempo medido se registra con una aproximación de 0.1 s. Generalmente la velocidad de infiltración (drenaje) varía de 81 a 730 L/min/m² (ACI 522 R-10, 2015).

Figura 17. Prueba de infiltración del concreto permeable en campo según ASTM C1701.



Fuente: Sustainable Concrete Canadá Ltd., Concreto Permeable, 2010

3.6.2.4. Durabilidad

Esta propiedad se define como la capacidad de resistir la acción de la intemperie, los ataques químicos (sulfatos y ácidos), y la abrasión durante la vida de servicio que prestará el concreto, conservando al mismo tiempo las propiedades de ingeniería deseadas. En dependencia de su aplicación, el concreto debe de resistir las siguientes acciones:

- Obstrucción de poros

En condiciones reales de servicio, se reduce la capacidad percolante del concreto, sin embargo, un estudio realizado por la Universidad Central de Florida asegura esta capacidad se puede restablecer hasta en un 90% mediante tres técnicas de limpieza: el lavado a presión, aspirado y una combinación de estos dos métodos (NRMCA, s.f.). **Ver Figura 18.**

Figura 18. Mantenimiento de andenes peatonales de concreto permeable mediante aspirado.



Fuente: NRMCA, Pervious Concrete Pavement Maintenance and Operations Guide, Washington, s.f,

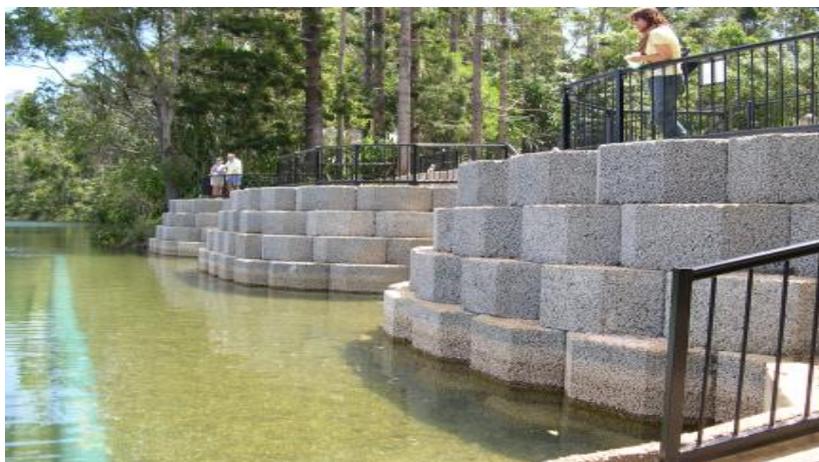
Otra medida para mitigar el proceso de colmatación es utilizar barreras vegetativas que ayudan a disminuir el transporte de sedimentos causados por la erosión hídrica, antes de llegar a la superficie del concreto.

Por otro lado, Pérez Jiménez y Calzada Pérez (1990) citado por Rodríguez (2008, pág. 82) mencionan que “... la colmatación natural de las mezclas drenantes se ve contrarrestada por la acción de succión realizada por los neumáticos”. Aunque en las zonas con poco tráfico, la colmatación es un poco más rápida, pero es meramente superficial, por lo que su limpieza es sencilla.

- **Resistencia a los sulfatos**

Los sulfatos presentes en el suelo y el agua (**Figura 19**) pueden ser perjudiciales para cualquier concreto que no fue adecuadamente diseñado. Sin embargo, debido a su estructura abierta, el concreto permeable puede estar más expuesto a estos ataques. Por tanto, si se requiere una protección adicional debido a una moderada o alta exposición a los sulfatos, se deben utilizar cementos resistentes a los sulfatos (según ASTM C150 Tipos II y V, ASTM C595 Tipo I designación MS o ASTM C1157 tipos MS y HS).

Figura 19. Muro de retención expuesto a la acidez del agua.



Fuente: Roca, Lake Eacham, Cairns - Australia.

Cuando el concreto permeable es utilizado como carpeta de rodadura se recomienda colocar una capa granular de 15 cm de espesor y un tamaño máximo de 25 mm, de modo que proporcione un buen soporte para el pavimento, almacene el agua de lluvia y aisle al concreto de suelos con altos grados de acidez y sulfatos (Tennis et al., 2004).

- **Resistencia a la abrasión**

La resistencia potencial a la degradación del concreto permeable por impacto y la abrasión se determina en laboratorio mediante ASTM C1747/C1747M-11. Según la **Figura 20**, el ensaye consiste en colocar en la máquina de Los Ángeles tres especímenes con diámetro de 4 pulgadas y altura $4 \pm 1/16$ pulg, con el cuidado que no se desportillen los bordes.

Luego, sin añadir las esferas de acero, se debe hacer rotar la máquina a una velocidad de 30 a 33 r/min hasta alcanzar 500 revoluciones. Por último, se pasa el material resultante en un tamiz de 25 mm (1 pulg) y se registra la masa del material retenido en dicho tamiz.

Figura 20. Resistencia a la degradación por impacto y abrasión del concreto permeable.



Fuente: ARGOS, Concreto Permeable, Colombia, s.f,

La resistencia potencial a la degradación del concreto permeable, se calcula por medio de la pérdida de masa de los especímenes, a partir de la siguiente ecuación:

$$\% DC. = \left[\frac{W_{ic} - W_{fc}}{W_i} \right] * 100 \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

$\% DC.$ = Porcentaje de degradación del concreto permeable por impacto y abrasión

W_{ic} = Peso inicial del espécimen de concreto permeable (4" x 4 ± 1/16").

W_{fc} = Peso final del espécimen de concreto permeable (4" x 4 ± 1/16").

En campo, la resistencia a la abrasión se puede verificar mediante la observación de la cantidad y rapidez con que las partículas de agregados se desprenden del concreto. Esto es de gran preocupación en lugares con tráfico pesado, puesto que conlleva a la pérdida de uniformidad del concreto y resistencia a las cargas impuestas.

Una alta porosidad y bajos valores de relación w/c, son relacionados con la poca resistencia a la abrasión del concreto porque hay un mayor riesgo de secado rápido antes del desarrollado de la resistencia necesaria ya que no se hidrata completamente el cemento

Capítulo IV. Materiales, Equipos y Metodología de investigación

4.1. Materiales

La investigación se desarrolló con el empleo de materiales que son usados en la fabricación del concreto convencional: cemento, agregados, agua y aditivos. La diferencia radica en la proporción utilizada, como se detalla en la **Tabla A - 4 (Ver Anexo 1.4)**.

4.1.1. Cemento

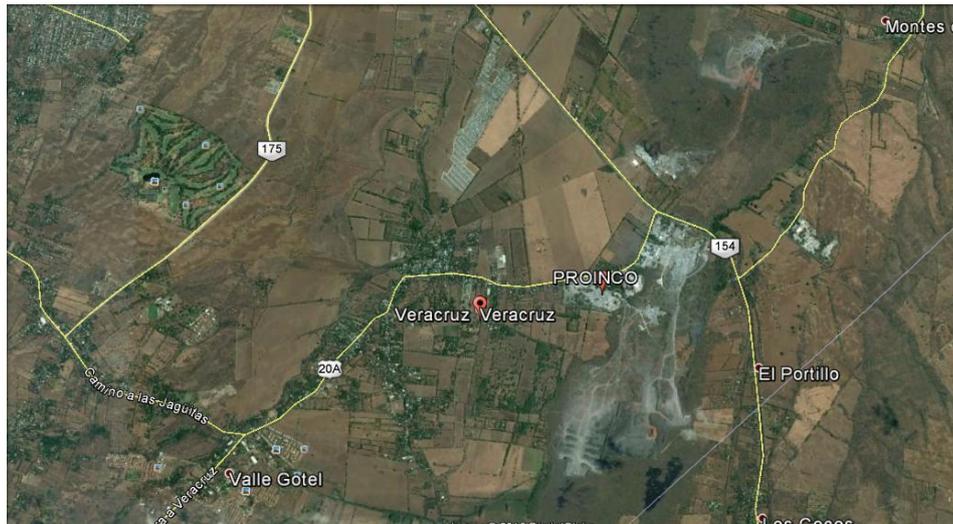
Para la fabricación de las mezclas se utilizó Cemento CANAL **tipo GU**, usado a nivel nacional en todo tipo de construcciones. Dicho cemento cumple con la norma ASTM C 1157 según lo descrito en la ficha técnica proporcionada por la empresa CEMEX. **Ver Anexo 2.1.**

4.1.2. Agregados

Se utilizó agregado grueso con un tamaño nominal máximo de 1/2" (Tamaño No. 7⁹) y material cero como agregado fino, este corresponde al producto final de la trituración de las rocas. Estos son agregados manufacturados de origen natural, obtenidos de la trituración de las rocas procedentes del banco de agregados El Portillo, ubicada en Veracruz, con coordenadas geográficas de 12° 05' 12.26" N y 86° 09' 01.19" O (Ver **Figura 21**). Este corresponde a uno de los principales bancos de agregados, cuya concesión de explotación le pertenece a la empresa PROINCO.

⁹ Requisitos de graduación en los agregados gruesos y finos según ASTM C33-08, **Ver Anexo 1.5 y 1.6.**

Figura 21. Imagen satelital de Veracruz, mostrando la ubicación de PROINCO



Fuente: Google Earth, Ubicación de Veracruz y Banco de materiales el Portillo, s.f.

4.1.3. Agua

El agua de mezclado era potable y de uso doméstico, no fue necesario realizarle ningún ensayo previo a su utilización, tal como lo estipula la norma ASTM C 1602-06.

4.1.4. Aditivo

El aditivo empleado fue ViscoFlow®-10 MX. Éste es un reductor de agua de alto rango específicamente desarrollado para incrementar el tiempo de trabajabilidad. Cumple con la norma ASTM-C 494-05 tipo F, la dosificación recomendada varía entre 4 y 16 ml por cada kg de cemento dependiendo del tiempo que se requiera extender la trabajabilidad (**Ver Anexo 2.2**). Para el proporcionamiento de las 5 bachadas y las primeras 7 mezclas de prueba, se utilizó una dosis de aditivo de **4 ml/kg** de cemento. En cambio, las mezclas restantes con una dosis de **5.5 ml/kg** de cemento utilizado, con la finalidad de extender el tiempo de trabajabilidad.

4.2. Equipos de laboratorio

4.2.1. Caracterización de los agregados.

En esta etapa se requirió el uso de los siguientes equipos:

- Balanza de 50 kg de capacidad, con precisión de 0.1 gr.
- Balanza de 2 kg de capacidad, con precisión de 0.1 gr.
- Canasta hidrostática de 0.40 m. x 0.40 m. de sección y 0.30 m. de altura.
- Horno, con control de temperatura constante de 110 ± 5 °C.
- Divisor mecánico
- Máquina de los Ángeles con medidor de revoluciones
- Cargas abrasivas (esferas de acero)
- Molde cónico de metal de 40 ± 3 mm de diámetro en la parte superior, 90 ± 3 mm de diámetro en parte inferior, con 75 ± 3 mm de altura.
- Pisón metálico de 340 ± 15 gramos de peso y que tenga una sección circular de 25 ± 3 mm de diámetro.
- Recipiente cilíndrico con capacidad de 7 ± 0.6 lts. (0.25 ± 0.02 ft³),
- Sucesión de tamices desde 9.5 mm (3/8 pulg.) hasta 0.075 mm (No. 200) [fracción fina].
- Sucesión de tamices desde 38.1 mm (1 ½ pulg.) hasta 2.36 mm (No. 8) [fracción gruesas].
- Varilla de acero con 5/8 de pulg. de diámetro y 24 pulg. de largo con acabado en forma de bala en uno de sus extremos.
- Utensilios y cristalería requerida para la realización de las pruebas de laboratorio a los agregados.

4.2.2. Fabricación de mezclas de concreto¹⁰.

Se fabricaron las mezclas manualmente en un recipiente metálico; carretilla para concreto. También se requirió de otros equipos y utensilios para medir las cantidades de materiales, tales como:

¹⁰ También se utilizó un recipiente metálico con dimensiones 0.60 x 0.60 metros de sección y altura de 0.10 metros para determinar la densidad según ASTM C 1688-10^a.

- Balanza de 20 kg de capacidad, con precisión de 0.1 gr.
- Probetas plásticas graduadas con capacidad 1000 y 500 ml.
- Probetas de vidrio graduadas con capacidad 100 ml.
- Utensilios requeridos para el depósito de los áridos (pala, charolas, cucharon etc....)

4.2.3. Densidad del concreto en estado fresco.

Se usaron los instrumentos descritos en la norma ASTM C 1688/ASTM C 1688M-10a, que consisten principalmente de un molde cilíndrico metálico con una capacidad de 7 ± 0.6 lts. (0.25 ± 0.02 ft³), un martillo próctor estándar, una placa de vidrio para el enrasado y una balanza con capacidad de 50 kg.

4.2.4. Fabricación y curado de especímenes.

Para obtener las propiedades en estado endurecido se elaboraron especímenes. Estos fueron fabricados y curados utilizando el siguiente equipo:

- Moldes metálicos de forma cilíndrica de 4 pulg. de diámetro y 8 pulg. de largo.
- Moldes de PVC de forma cilíndrica con tapa de curado, de 4 pulg. de diámetro y 8 pulg. de largo.
- Varilla de acero con $5/8$ y $3/8$ de pulg. de diámetro y 24 pulg. de largo con acabado en forma de bala en uno de sus extremos.
- Viguetas metálicas, con dimensiones: 24 pulg. de largo, 6 pulg. de ancho y 6 pulg. de ancho.
- Utensilios requeridos para el llenado de los moldes y viguetas.
- Bolsas plásticas transparentes, resistentes y durables con 25 libras de capacidad.

4.2.5. Ensayos de resistencia.

Se utilizaron los siguientes utensilios:

- Cabeceador de cilindros con 4 pulg. de diámetro y 8 pulg. de largo.
- Flexómetro de 5 metros de largo.
- Placa metálica cuadrada de 6 pulg. de lado y $\frac{1}{4}$ de pulg. de espesor.
- Máquina hidráulica para ensayos a compresión con capacidad de 2000 lb
- Placa metálica para transmisión de carga con hendidura en una de sus caras en el centro.
- Máquina de los Ángeles con medidor de revoluciones.

4.2.6. Ensayo de permeabilidad.

Para la ejecución de este ensayo, se fabricó un permeámetro similar al presentado en el acápite **3.6.2.3 (Figura 16)**. Este se utilizó en conjunto con un cronómetro y recipientes para llenar de agua el cilindro superior del permeámetro.

4.3. Metodología de investigación

La investigación se desarrolló con un enfoque cuantitativo, ejecutada en dos etapas. La primera etapa de tipo exploratoria se caracterizó por la **recopilación y revisión de la literatura** relacionada al concreto permeable: aplicabilidad, métodos de proporcionamiento, propiedades y especialmente su proceso constructivo, para definir una guía simplificada, que aborde las principales actividades que interviene en la construcción de pavimentos de concreto permeable. Además, se recopiló información relacionada a los agregados producidos por PROINCO.

En cambio, la segunda etapa de tipo correlacional se subdividió en cuatro fases. La primera fase consistió en un **trabajo de campo**, identificada por la toma de muestras representativas de los agregados utilizados. En la segunda fase, se ejecutaron los ensayos requeridos para la **caracterización de las muestras extraídas de agregados**.

En la tercera fase, se **procesaron los datos obtenidos en la fase anterior**, se precisó la cantidad de variables experimentales en el diseño y se realizó el proporcionamiento. Finalmente, la cuarta fase, consistió en **la fabricación de las mezclas, así como la elaboración, curado y ensayo de especímenes**; enfatizando que, la última fase se realizó en conjunto con un trabajo de gabinete para el procesamiento de los datos obtenidos y el análisis final de resultados.

4.3.1. Trabajo de campo

La toma de muestras se realizó según la norma ASTM D 75.-03 (**Ver Anexo 3.1**). De un lote de agregados (ver **Figura 22**) se extrajeron muestras de tres partes diferentes: cerca de la base, aproximadamente en la mitad y de la parte superior, de manera que estas fueran representativas del lote de material. Destacando que, la toma de muestras se realizó en **3 días distintos de producción** con el propósito de realizar los ensayos y obtener un valor promedio de sus características.

Figura 22. Banco de agregados de tamaño nominal máximo de 1/2" de PROINCO.



Fuente: Fotografía tomada en el plantel "El Portillo", Veracruz-Nindirí, enero 2017

4.3.2. Caracterización de los Agregados¹¹

Con el objetivo de determinar sus características y obtener los datos necesarios para el proporcionamiento de las mezclas de concreto permeable, **además del ensayo de granulometría, fue necesario realizar los siguientes ensayos** en el laboratorio de Lamsa Ingenieros consultores;

1. Análisis granulométrico por tamizado [ASTM C 136-06]
2. Peso volumétrico seco suelto (P.V.S.S.) y peso volumétrico seco compacto (P.V.S.C.) de los agregados [ASTM C 29-03].
3. Gravedad específica y porcentaje de absorción del agregado grueso y fino [ASTM C 127-01 /ASTM C 128-01].
4. Resistencia a la degradación por impacto y abrasión en la máquina de los Ángeles [ASTM C 131-03].
5. Impurezas en el agregado fino [ASTM C 40-11].

Destacando que, previo a realizar estas pruebas, se secaron totalmente los agregados y posteriormente, se redujeron a tamaños apropiados para ensayo mediante el método A (Divisor mecánico) de acuerdo con ASTM C 702-98 (**Ver Anexo 3.2**).

Figura 23. Secado y Reducción de muestras de agregados a tamaños apropiados para ensayo según ASTM C702-98 (Método A).



Fuente: Fotografía tomada en Laboratorio de Lamsa Ingenieros”, Managua, enero 2017.

¹¹ En el **Anexo 3**, se muestran a detalle los formatos utilizados para el procesamiento de los datos, en cada uno de los ensayos realizados para la caracterización de los agregados

Empero, a como se muestra en la **Figura 23**, se verificó que el divisor fuera colocado en una superficie nivelada y limpia, y que las herramientas y equipos estuvieran limpios y calibrados en la realización de cada ensaye.

4.3.2.1. Granulometría

Se determinó según ASTM C 136-06, el procedimiento consistió en hacer pasar una muestra de agregados previamente secada al horno de peso conocido a través de una serie de tamices ordenados de forma decreciente a su abertura, mediante un movimiento de vaivén por un período aproximado de 10 minutos y se pesó el material retenido en cada uno ellos (ver **Figura 24**).

Figura 24. Análisis granulométrico de los agregados según ASTM C136-06.



Fuente: Fotografía tomada en Laboratorio de Lamsa Ingenieros”, Managua, enero 2017.

Luego, se calcularon los porcentajes que pasan en cada uno de los tamices y se representaron gráficamente con ayuda de MS Excel para compararlos con los límites granulométricos de la norma ASTM C 33-08.

4.3.2.2. Densidad

El peso unitario de los agregados se obtuvo mediante la norma ASTM C 29-03 (ver **Figura 25**), cuya prueba consiste en llenar un molde cilíndrico aproximadamente en tres capas iguales acomodando las partículas mediante varillado (25 golpes/capa) y por gravedad (caída libre a cierta altura del material) para el P.V.S.C. y P.V.S.S. respectivamente Este ensayo se realizó para cada una de las muestras.

Figura 25. Ensayo de densidad de los agregados según ASTM C29-03.



Fuente: Fotografía tomada en Laboratorio de Lamsa Ingenieros”, Managua, enero 2017.

4.3.2.3. Gravedad Específica y Absorción

La gravedad específica de los agregados gruesos se determinó según la designación ASTM C 127-01. Se sumergió una muestra de 2 kilogramos del agregado en agua por 24 ± 4 h para saturar los poros. Luego se removi6 la muestra del agua y se llev6 a su estado SSS. Se determin6 el volumen de la muestra por el m6todo de la balanza hidrost6tica. Por 6ltimo, se sec6 la muestra al horno y se determin6 su masa. (Ver **Figura 26**).

Figura 26. Ensayo de gravedad específica y absorción del agregado grueso según ASTM C 127-01.



Fuente: Fotografía tomada en Laboratorio de Lamsa Ingenieros”, Managua, enero 2017.

En cambio, para el agregado fino se siguió el procedimiento descrito en ASTM C 128-01. Se tomó una muestra de 500 gramos en su estado S.S.S., luego se depositó en un frasco volumétrico con agua liberando el aire atrapado y sustrayendo cualquier suciedad presente en la muestra, con el cuidado que el agua llegue a la marca de aforo y se pesó. Seguido, se extrae la muestra en una tara secándola al horno por aproximadamente 24 horas y, por último, se pesó la muestra. (Ver **Figura 27**)

Figura 27. Ensayo de gravedad específica y absorción del agregado fino según ASTM C 128-01.



Fuente: Fotografía tomada en Laboratorio de Lamsa Ingenieros”, Managua, enero 2017.

Con los datos obtenidos en ambos procedimientos de ensayo, se calculó el porcentaje de absorción y gravedad específica de los agregados.

4.3.2.4. Resistencia a la Abrasión

Fue determinada en base a la norma ASTM C 131-03. Se definió un grado de muestra comparando la granulometría resultante según ASTM C 136-06, con los límites propuestos por el método de ensayo. Con ello se definió el peso de la muestra y el número de esferas a utilizar en la máquina de Los Ángeles.

Una vez definido lo anterior, se colocó el agregado con las esferas en la Máquina de Los Ángeles (ver **Figura 28**) y se hizo girar el tambor a una velocidad de 30 a 33 rpm, hasta alcanzar las 500 revoluciones. Luego, se descargó el material de la máquina y se hizo una separación preliminar de la muestra con el tamiz de 1.70 mm (No.12) y se lavó el material retenido. Posteriormente, la muestra se secó al horno a una temperatura entre $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$), y se pesó con una aproximación de 1g.

Figura 28. Determinación de la resistencia al desgaste del agregado grueso mediante ASTM C 131-03.



Fuente: Fotografía tomada en Laboratorio de Lamsa Ingenieros”, Managua, enero 2017.

Finalmente, se calculó el porcentaje de desgaste del material, aplicando la siguiente ecuación:

$$\% DA. = \left[\frac{W_{iA} - W_{fA}}{W_{iA}} \right] * 100$$

Ecuación 17

Donde:

$\% DA$. = Porcentaje de degradación del agregado por impacto y abrasión.

W_{iA} = Peso inicial de la masa de agregados.

W_{fA} = Peso final de la masa de agregados.

4.3.2.5. Impurezas orgánicas

La cantidad de materia orgánica presente en el agregado fino se determinó con la prueba de colorimetría según ASTM C 40-11. Se coloca en un recipiente de 8 a 16 onzas (240 - 740 ml.) de capacidad, aproximadamente 130 ml. (4 ½ onzas) de arena y una solución de Hidróxido de sodio (NaOH) hasta llegar a un volumen de 200 ml (7 onzas) después de su agitación. Luego, se dejó reposar por un período de 24 horas. (Ver **Figura 29**).

Figura 29. Determinación de materia orgánica en los agregados finos mediante ASTM C 40-11.



Fuente: Fotografía tomada en Laboratorio de Lamsa Ingenieros”, Managua, enero 2017.

Posteriormente, se comparó la coloración de la solución con una tarjeta que contiene cinco coloraciones que van desde un color amarillento hasta una coloración oscura, reportando el color con mayor similitud al de la tarjeta como el grado de materia presente en el agregado.

4.3.3. Proporcionamiento de mezclas

La dosificación de todas las mezclas fabricadas se basó en la obtención del volumen unitario de concreto; conservando su trabajabilidad y cohesión. Para ello, se utilizó el procedimiento recomendado por el **ACI 522 R-10**¹² (**acápite 3.5.2**) con algunas modificaciones en los pasos **1, 2, 3 y 4**.

En tales modificaciones, se tomó como punto de partida las limitaciones propuestas por dicho reporte:

- La cantidad de cemento: **270 a 415 kg/m³** de concreto,
- La relación w/c, **0.26 - 0.45**,
- El porcentaje de vacíos en la mezcla, **15% - 25%**, y
- El porcentaje de agregado fino¹³: **5% - 30%**.

4.3.3.1. Cantidad de mezclas fabricadas.

Para conocer al concreto permeable y verificar la influencia de la relación w/c, el contenido de vacíos y la cantidad de finos utilizados en el comportamiento y las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto; se fabricaron las siguientes mezclas en el orden que se presentan a continuación (ver la **Figura 30**):

- a. **5 bachadas de prueba**, con un volumen producido de 20 litros. De estas muestras no se tomaron cilindros para ensayo, puesto que se fabricaron con el objeto de conocer al concreto: trabajabilidad, densidad y contenido de vacíos recién mezclado.
- b. **7 mezclas de prueba**, con porcentajes de agregado fino: 10% y 30%; para las primeras 3 mezclas y las 4 mezclas restantes, respectivamente. Se fabricaron con el propósito de conocer principalmente la influencia del agregado fino y el porcentaje de vacíos en las propiedades del concreto: permeabilidad, porcentaje de vacíos, resistencia y trabajabilidad.

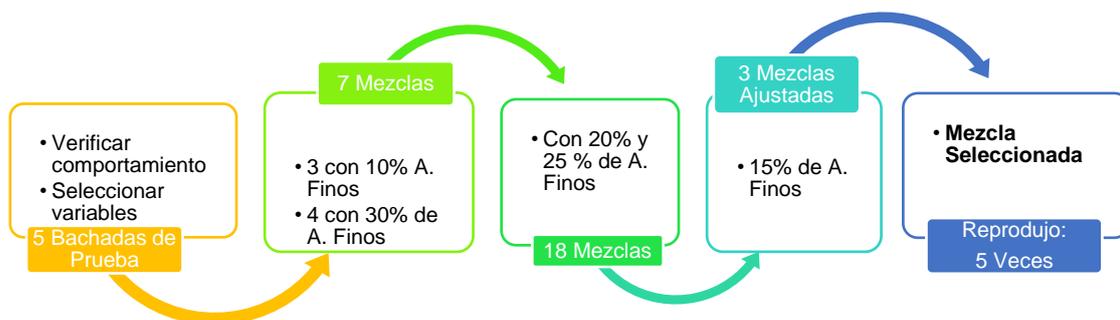
¹² Las modificaciones realizadas al procedimiento descrito por el ACI 522R-10, se debe a que el procedimiento es exclusivamente para concreto sin A. Finos y agregados con TMN: **3/8"** y **3/4"**.

¹³ Los porcentajes de agregado fino corresponden al volumen total de agregados.

Asimismo, verificar que la ecuación propuesta por Ahmad y Shah (1985) (**Ecuación 14**), que correlaciona el $f'c$ y la flexión del concreto permeable (MR), proporciona resultados aceptables, para la obtención del MR en las 18 mezclas fabricadas.

- c. **18 mezclas fabricadas**, de estas, 9 mezclas se dosificaron con un contenido de vacíos del 20%, y 25% las 9 mezclas restantes. Además, se añadió un 20% de agregado fino en todas; y se varió la cantidad de cemento (300, 350 y 400 kg/metro cúbico de concreto) y la relación w/c (0.30, 0.32 y 0.34), con el objetivo de optimizar su resistencia y trabajabilidad.
- d. De las 18 mezclas fabricadas, se seleccionaron **3 diseños**, con el objetivo de ajustar únicamente el porcentaje de agregado fino (15%), reproducir y verificar su influencia en las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto (**3 Mezclas Ajustadas**). De éstos tres, se seleccionó la mezcla (objeto de la investigación) con el mejor comportamiento en cuanto permeabilidad y resistencia se refiere, y se reprodujo 5 veces para constatar la consistencia de los resultados.

Figura 30. Cantidad de mezclas fabricadas para la selección de la mezcla objeto de la investigación.

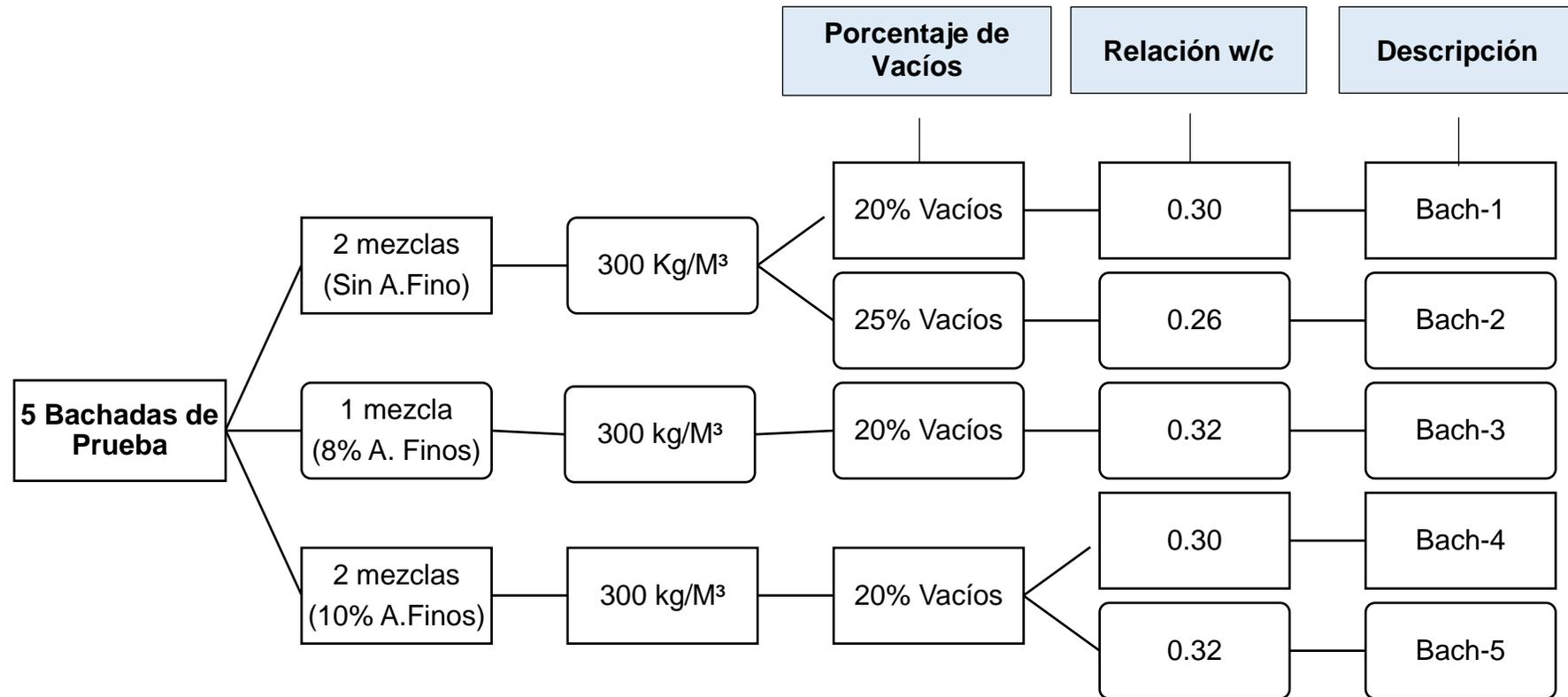


Fuente: Propia, Managua, agosto 2017.

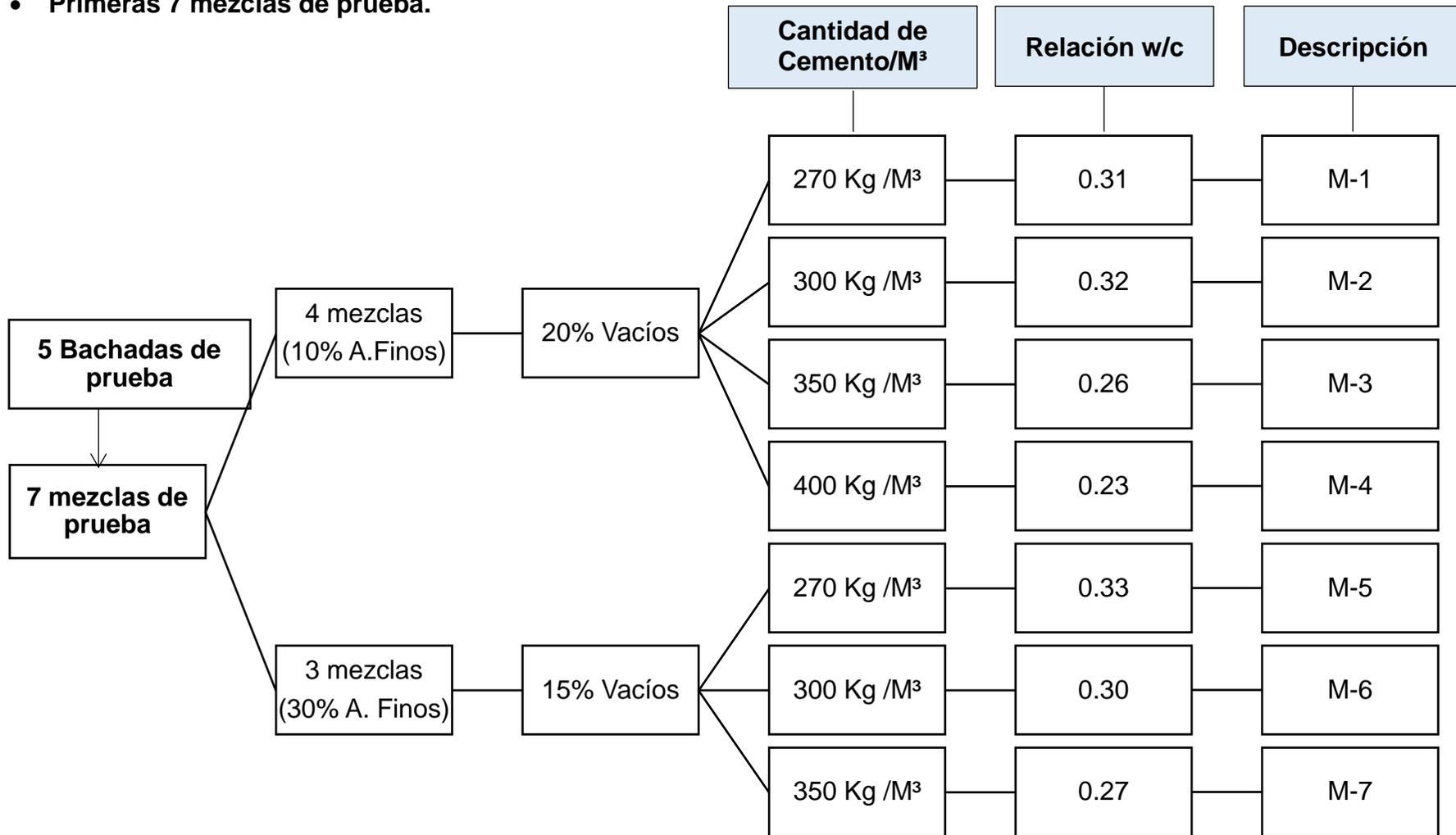
Enfatizando que, los porcentajes de agregados finos utilizados en el proporcionamiento de las mezclas corresponden al volumen total de agregados. Además, para su fabricación se utilizó íntegramente el agregado fino (material cero) con todos los tamaños que lo componen, es decir, no se descartó ningún material que pasara por un tamaño de tamiz determinado.

A continuación, se presentan las variables de entrada que intervienen en el proceso de proporcionamiento de las 5 bachadas, 7 mezclas de prueba y 18 mezclas fabricadas con su respectiva descripción, para verificar la veracidad de los datos obtenidos.

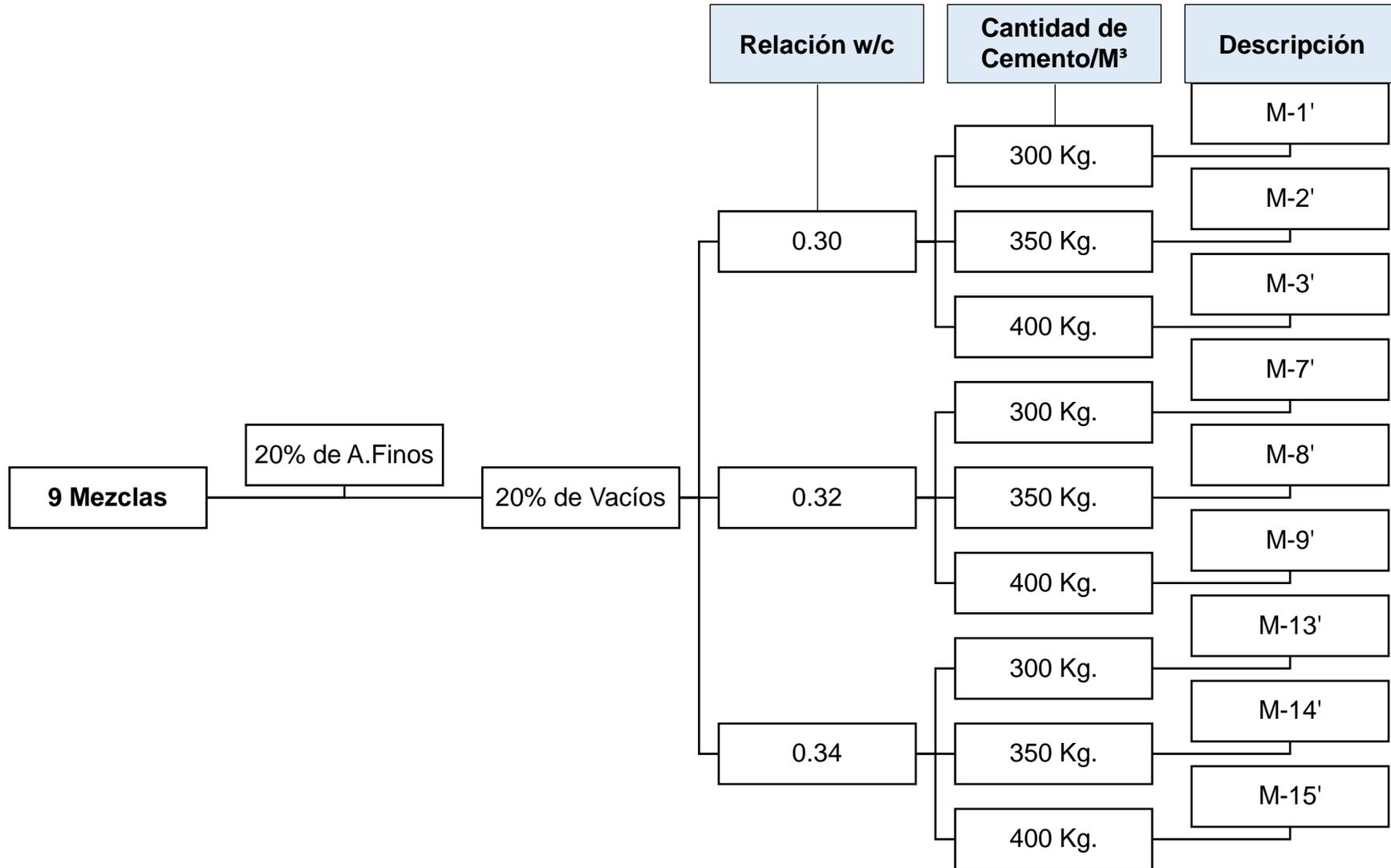
- **5 Bachadas de prueba.**

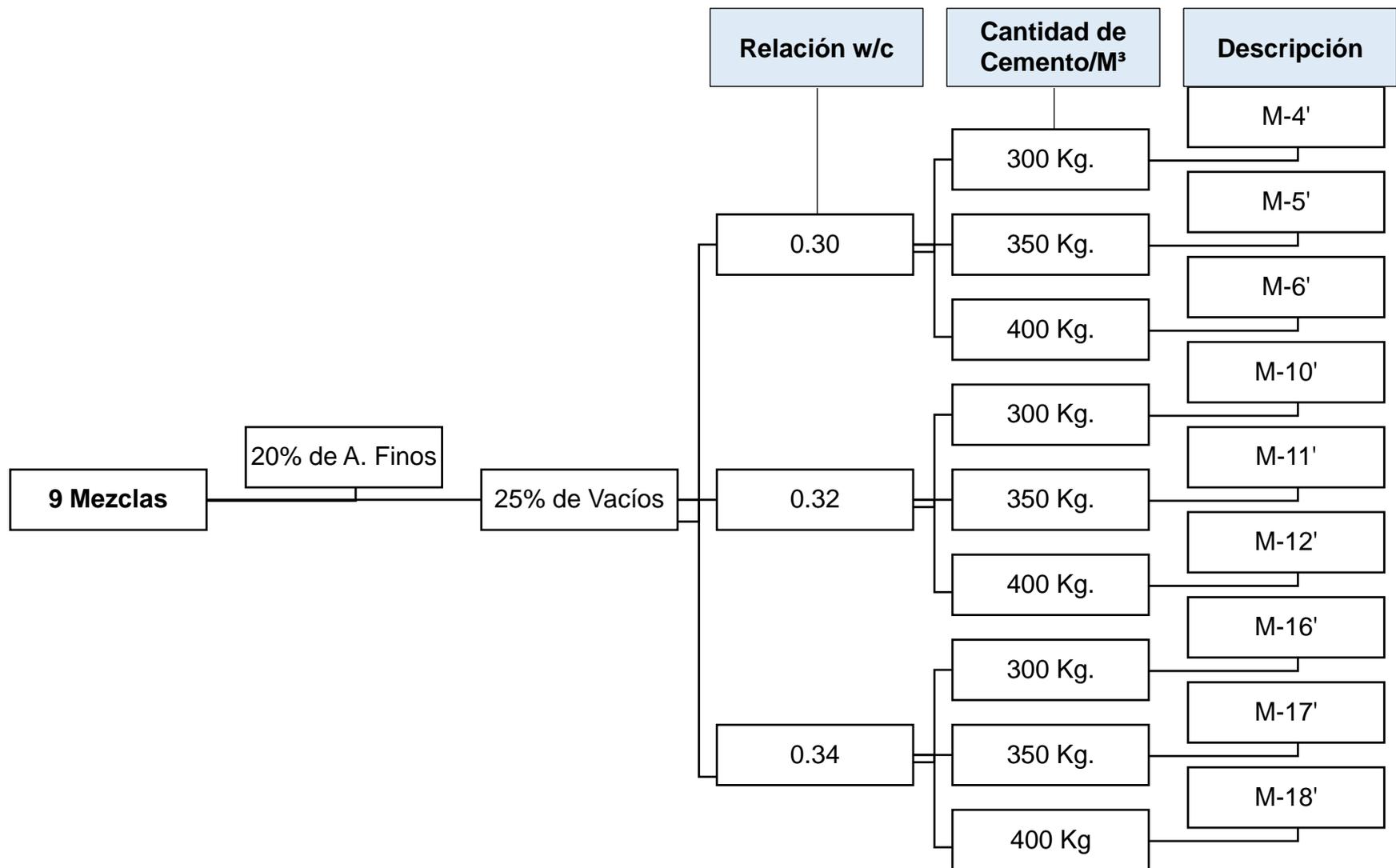


- Primeras 7 mezclas de prueba.



- 18 mezclas de prueba.





4.3.3.2. Requisitos por cumplir

En su estado fresco, debe poseer la “**trabajabilidad**” adecuada para manipular y colocar el concreto sin ningún inconveniente a su lugar de destino, además debe poseer el contenido de pasta suficiente para recubrir los agregados sin llenar los espacios vacíos entre ellos, con la finalidad de mantener una estructura de vacíos adecuada.

Por otro lado, en su estado endurecido debe garantizar el equilibrio entre vacíos y resistencia, de manera que se obtengan valores cercanos a una “**Resistencia a la flexión (MR) de aproximadamente 36 kg/cm² y una tasa de infiltración entre 0.14 a 1.22 cm/s**”, siendo éste un valor aceptable en pavimentos de bajo tráfico.

Todos estos requisitos se deben cumplir tomando en cuenta la “**economía**” de la mezcla, es decir, garantizar las propiedades del concreto sin recurrir a costos pocos competitivos que propician su poca utilización.

4.3.3.3. Procedimiento de proporcionamiento.

Los datos que se involucran en el proporcionamiento de mezclas son: algunas propiedades de los materiales, dosis de aditivo, cantidad de cemento por metro cúbico de concreto, relación w/c, el porcentaje de vacíos de la mezcla, porcentaje de agregado fino e información relacionada al volumen a producir para la fabricación de especímenes.

Nota: Selección de la cantidad de cemento.

Primero, se selecciona una cantidad de cemento para un volumen absoluto de concreto de acuerdo con el rango recomendado por el ACI 522 R-10, **270 a 415 kg/m³ (16 a 26 lb/pe³)**. Posteriormente se siguen los siguientes pasos:

Paso 1. Cálculo del volumen de Cemento

$$V_c = C / (GE_{Cemt.} \times \gamma_w)$$

Ecuación 7

Paso 2. Cálculo de la cantidad (peso) de Agua

$$W = C(w/c) \quad \text{Ecuación 5}$$

Paso 3. Cálculo del volumen de Agua

$$V_w = W / \gamma_w \quad \text{Ecuación 8}$$

Paso 4. Cálculo del volumen de agregados¹⁴

$$V_A = (1 - \% VM) - [V_c + V_w] \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

V_A = Volumen total de agregados en la mezcla concreto.

$\% VM$ = Porcentaje de vacíos en la mezcla de concreto.

V_c = Volumen de cemento.

V_w = Volumen de agua.

Paso 5. Cálculo del volumen de agregado fino

El volumen de fino se determina como un porcentaje del volumen total de agregado.

$$V_{A.F} = (V_A) (\% A. F) \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde;

$V_{A.F}$ = Volumen de agregado fino en la mezcla de concreto.

V_A = Volumen total de agregados en la mezcla de concreto.

$\% A. F$ = Porcentaje de agregado fino con relación al volumen de agregados.

Paso 6. Cálculo del peso de agregado fino

$$W_{A.F} = (V_{A.F}) (G. E_{A.F}) (\gamma_w) \quad \text{Ecuación 20}$$

¹⁴ El valor 1, corresponde al volumen unitario de concreto, 1 Metro cúbico.

Donde:

$W_{A.F}$ = Peso del agregado fino.

$V_{A.F}$ = Volumen de agregado fino en la mezcla de concreto.

$G.E_{A.F}$ = Gravedad específica del agregado fino.

γ_w = Densidad del agua.

Paso 7. Cálculo del volumen de agregado grueso

El volumen de agregado grueso se define como la diferencia entre el volumen total de agregados y el volumen de fino.

$$V_{A.G} = V_A - V_{A.F}$$

Ecuación 21

Donde:

$V_{A.G}$ = Volumen de agregado grueso en la mezcla de concreto.

V_A = Volumen total de agregados en la mezcla de concreto.

$V_{A.F}$ = Volumen de agregado fino en la mezcla de concreto.

Paso 8. Cálculo del peso de agregado grueso

$$W_{A.G} = (V_{A.G}) (G.E_{A.G}) (\gamma_w)$$

Ecuación 22

Donde:

$W_{A.G}$ = Peso del agregado grueso.

$V_{A.G}$ = Volumen de agregado grueso en la mezcla de concreto.

$G.E_{A.G}$ = Gravedad específica del agregado grueso.

γ_w = Densidad del agua.

Paso 9. Corrección del agua de mezclado por absorción y humedad de los agregados.

$$W_{w.c} = W + [(W_{A.G})(\% Abs_{A.G} - \% H_{A.G})] \\ + [(W_{A.F})(\% Abs_{A.F} - \% H_{A.F})]$$

Ecuación 23

Donde:

$W_{w,c}$ = Peso del agua corregida por humedad y absorción de los agregados

W = Peso del agua.

$W_{A,G}$ = Peso del agregado grueso.

$\% \text{ Abs}_{A,G}$ = Porcentaje de Absorción del agregado grueso.

$\% H_{A,G}$ = Porcentaje de humedad del agregado grueso.

$W_{A,F}$ = Peso del agregado fino.

$\% \text{ Abs}_{A,F}$ = Porcentaje de Absorción del agregado fino.

$\% H_{A,F}$ = Porcentaje de humedad del agregado fino.

Paso 10. Calculo de la cantidad de aditivo

La cantidad total de aditivo es definida a partir de la multiplicación de la cantidad de cemento a utilizar y la dosis de aditivo seleccionada a partir del rango recomendado por el fabricante.

$$C. A = (D)(C)$$

Ecuación 24

Donde:

$C. A$ = Cantidad de aditivo.

D = Dosis de aditivo por unidad de cemento.

C = Peso de cemento.

Paso 11. Cantidades de materiales para un saco de cemento

Estas cantidades se calculan a partir del peso de los materiales para un volumen unitario de concreto.

Primero, se determina el número de sacos de cemento necesarios para producir un metro cúbico de concreto y luego, el peso necesario de materiales para un saco de cemento, tal como se presenta en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Peso de materiales para un saco de cemento.

Ecuación	Nomenclatura	No. Ecuación
$N = \frac{C}{W_{SC}}$	<p>N = Número de sacos de cemento por unidad de concreto. C = Peso de cemento. W_{SC} = Peso del saco de cemento.</p>	<p>Ecuación 25</p>
Cantidades de materiales para 1 saco de cemento		
$\frac{WA.F_{SC}}{N} = \frac{(W_{A.F})(1 \text{ saco})}{N}$	<p>$WA.F_{SC}$ = Peso del agregado fino por saco cemento. $W_{A.F}$ = Peso del agregado fino. N = Número de sacos de cemento por unidad de concreto.</p>	<p>Ecuación 26</p>
$\frac{WA.G_{SC}}{N} = \frac{(W_{A.G})(1 \text{ saco})}{N}$	<p>$WA.G_{SC}$ = Peso del agregado grueso por saco cemento. $W_{A.G}$ = Peso del agregado grueso. N = Número de sacos de cemento por unidad de concreto.</p>	<p>Ecuación 27</p>
$W_{WSC} = \frac{(W)(1 \text{ saco})}{N}$	<p>W_{WSC} = Peso del agua por saco de cemento. W = Peso del agua. N = Número de sacos de cemento por unidad de concreto.</p>	<p>Ecuación 28</p>
$C.A_{SC} = \frac{(C.A)(1 \text{ saco})}{N}$	<p>$C.A_{SC}$ = Cantidad de aditivo por saco de cemento. $C.A$ = Cantidad de aditivo. N = Número de sacos de cemento por unidad de concreto.</p>	<p>Ecuación 29</p>

Paso 12. Cálculo de Proporciones

A partir de las cantidades de materiales definidas para un saco de cemento, se calculan los volúmenes para cada uno de los materiales como en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Volúmenes de materiales para 1 saco de cemento.

Ecuación	Nomenclatura	No. Ecuación
$V_{SC} = \frac{W_{SC}}{PVSC_{cmt.}}$	<p>V_{SC} = Volumen del saco de cemento.</p> <p>W_{SC} = Peso del saco de cemento.</p> <p>$PVSC_{cmt.}$ = Peso volumétrico seco compacto del cemento.</p>	Ecuación 30
$VA.F_{SC} = \frac{WA.F_{SC}}{PVSS_{AF}}$	<p>$VA.F_{SC}$ = Volumen del agregado fino por saco de cemento.</p> <p>$WA.F_{SC}$ = Peso del agregado fino por saco cemento.</p> <p>$PVSS_{AF}$ = Peso volumétrico seco suelto del agregado fino.</p>	Ecuación 31
$VA.G_{SC} = \frac{WA.G_{SC}}{PVSS_{AG}}$	<p>$VA.G_{SC}$ = Volumen del agregado grueso por saco cemento.</p> <p>$WA.G_{SC}$ = Peso del agregado grueso por saco cemento.</p> <p>$PVSS_{AG}$ = Peso volumétrico seco suelto del agregado grueso.</p>	Ecuación 32

Finalmente, se ejecuta la división de los volúmenes correspondientes a cada material entre el volumen de un saco de cemento como en la **Tabla 5**:

Tabla 5. Proporción de materiales en partes por volumen

Ecuación	Nomenclatura	No. Ecuación
$P_1 = \frac{V_{SC}}{V_{SC}}$	P_1 = Proporción del cemento. V_{SC} = Volumen del saco de cemento.	Ecuación 33
$P_2 = \frac{VA.F_{SC}}{V_{SC}}$	P_2 = Proporción del agregado fino. $VA.F_{SC}$ = Volumen del agregado fino por saco de cemento. V_{SC} = Volumen del saco de cemento.	Ecuación 34
$P_3 = \frac{VA.G_{SC}}{V_{SC}}$	P_3 = Proporción del agregado grueso. $VA.G_{SC}$ = Volumen del agregado grueso por saco cemento. V_{SC} = Volumen del saco de cemento.	Ecuación 35

4.3.4. Fabricación de mezclas

La elaboración de todas las mezclas se hizo de forma manual en un recipiente metálico, como recomienda la norma ASTM C 192-07. El proceso de fabricación se realizó en tres pasos:

Paso 1: Medición de materiales que componen la mezcla.

Se pesaron los materiales por medio de una balanza calibrada con precisión de \pm 0.5 gramos. En el caso del agua y el aditivo, se midieron las cantidades a añadir en probetas graduadas dado que el control de la humedad en este concreto es crítico (ver **Figura 31**).

Figura 31. Preparación de materiales para la fabricación de mezclas proporcionadas.



Fuente: Fotografía tomada en Laboratorio de Lamsa Ingenieros”, Managua, febrero 2017.

Paso 2: Preparación del recipiente de mezclado.

Se verificó que el recipiente se encontrará libre de cualquier material contaminante como polvo o materiales orgánicos. Luego, se humedeció sin formar una acumulación de agua para evitar la pérdida de humedad en la mezcla, como en la **Figura 32.**

Figura 32. Preparación del recipiente para la fabricación del concreto permeable.



Fuente: Fotografía tomada en Laboratorio de Lamsa Ingenieros”, Managua, marzo 2017.

Paso 3: Introducción y Mezclado de los materiales.

Primero, se colocó el agregado grueso, luego se añadió el agregado fino, mezclándolos por un período de 5 minutos para garantizar la distribución de las partículas. Posteriormente, se añadió un poco de agua para llevar a los agregados a su estado S.S.S y para que el cemento reaccione de forma inmediata con el agua de mezclado. Después se agregó el cemento cuidadosamente y se volvió a mezclar, y se añadió de forma gradual el agua combinada con la cantidad de aditivo, verificando la cohesión pasta-agregado, mediante el Método de Hand-Squeeze (Método del apretón de mano), procedimiento descrito en ítem **3.6.1.1**. (Ver **Figura 33**)

Figura 33. Mezclado de materiales y obtención del concreto permeable.



Fuente: Fotografía tomada en Laboratorio de Lamsa Ingenieros”, Managua, marzo 2017.

4.3.5. Fabricación y curado de especímenes

La fabricación de especímenes cilíndricos consistió en llenar los moldes en tres capas de aproximadamente igual espesor, donde se compacta cada capa con el extremo redondeado de la varilla punta de bala ($3/8$ pulg de diámetro) efectuando 25 golpes distribuidos uniformemente sobre su sección transversal y luego se golpeó ligeramente el exterior del molde de 10 a 15 veces con un martillo con cabeza de caucho. Después de realizar la compactación de la segunda capa, se coloca la última y se compacta, de modo que si hizo falta material se añadió y se enrasó con ayuda de la varilla, colocando los cilindros en el sitio de curado hasta su desencofre. (Ver **Figura 34**).

Figura 34. Fabricación de especímenes de 4"x8" para ensayo a compresión.



Fuente: Fotografía tomada en Laboratorio de Lamsa Ingenieros", Managua, agosto 2017.

En las viguetas, se colocó el concreto en dos capas de similar espesor, compactando cada capa con el extremo liso de la varilla punta de bala de diámetro 5/8 pulg., mediante 72 golpes (1 golpe por cada 2 pulg.² de superficie) distribuidos sobre la sección transversal del molde y se golpeó con el martillo con cabeza de caucho de 20 a 25 veces el exterior del mismo. Finalmente, se colocaron los moldes en el sitio de curado hasta su desencofre.

Previo al llenado de los moldes, se cubrieron con una capa delgada de aceite mineral con el propósito de evitar dificultades en el desencofre y, además, los especímenes fueron fabricados sobre una superficie nivelada y libre de deformaciones.

Figura 35. Curado de especímenes en el sitio de fabricación.



Fuente: Fotografía tomada en Laboratorio de Lamsa Ingenieros", Managua, agosto 2017.

Con relación al curado, se inició inmediatamente después del acabado de los especímenes, cubriéndolos con láminas o bolsas de plástico transparente (como en la **Figura 35**) con el propósito de evitar la evaporación del agua en el concreto no endurecido. Posteriormente, 4 días \pm 2 horas después de su fabricación, se desencofraron y se sumergieron en pilas de almacenamiento de agua para terminar su curado hasta la fecha de ensayo. (Ver **Figura 36**).

Figura 36. Curado de especímenes en pila de curado.



Fuente: Fotografía tomada en Laboratorio de Lamsa Ingenieros”, Managua, agosto 2017.

4.3.6. Ensayos en estado fresco y endurecido

Con el objetivo de conocer el comportamiento de las mezclas en su estado fresco y endurecido, y de realizar los ajustes necesarios para cumplir con los requisitos de trabajabilidad, resistencia y economía estipulados en apartado **4.3.3.2.**, se realizaron los siguientes ensayos¹⁵:

- Densidad y contenido de vacíos del concreto recién mezclado,
- Resistencia a compresión,
- Resistencia a flexión,
- Tasa de infiltración o permeabilidad.
- En el caso de la mezcla óptima, se anexó el ensayo de desgaste, descrito en la norma ASTM C 1747-13.

¹⁵ La **Figura 37** muestra un resumen de los ensayos ejecutados.

Para determinar la densidad del concreto recién mezclado se siguió el procedimiento establecido en la norma ASTM C 1688-10a citado en ítem 3.6.1.2. Antes de realizar los ensayos de resistencia en el concreto endurecido: compresión, flexión y potencial de degradación por impacto y abrasión; se secaron al aire completamente los especímenes y luego fueron ensayadas siguiendo el procedimiento descrito en las normas ASTM C 39-03, ASTM C 78-09, ASTM C 1747-13 respectivamente.

Destacando que, los especímenes destinados para el ensayo a compresión; después de secados completamente al aire se cabecearon con cemento según ASTM C 617-10. Para que el cemento se endureciera completamente, se dejó al aire libre las muestras cabeceadas por un período de 3 horas previo al ensayo.

Figura 37. Pruebas realizadas a las mezclas fabricadas de concreto permeable.



Densidad y Contenido de vacíos en estado fresco (ASTM C 1688-10a)



Secado al aire de especímenes de ensayo.



Cabeceo de cilindros (ASTM C 617-10)



Endayo a compresión (ASTM C 39-03)



Ensayo a flexión (ASTM C 78-09)



Ensayo de Permeabilidad (Neithalath)

Fuente: Fotografías tomadas en Laboratorio de Lamsa Ingenieros”, Managua, agosto 2017.

Con respecto al ensayo de permeabilidad, se realizó mediante un permeámetro construido similarmente al desarrollado por Neithalath (**Figura 16**). Empero, el coeficiente de permeabilidad (k), se determinó con la **Ecuación 36**, propuesta por Henry Darcy, aplicable al Permeámetro de Carga Constante (**Ver Anexo 1.8**):

$$k = \frac{VL}{hAt}$$

Ecuación 36

Donde:

k = Coeficiente de permeabilidad.

V = Velocidad del flujo del agua.

L = Longitud de la muestra,

A = Área o sección de la muestra.

h = Carga hidráulica.

t = tiempo que fluye el agua a través de la muestra.

El ensayo de permeabilidad se realizó a una edad de 7 días, para ello se fabricaron 2 cilindros/mezcla con dimensiones de 4" de diámetro y 6" de alto. Destacando que estos fueron fabricados y curados en las mismas condiciones que los demás cilindros para ensayos de compresión.

Capítulo V. Presentación y análisis de resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en la investigación, iniciando con los ensayos realizados en laboratorio a los agregados; luego, las cantidades de materiales obtenidos en el proceso de proporcionamiento; seguido de los resultados de los ensayos a las mezclas en estado fresco y endurecido. Por último, se presenta una guía simplificada para la construcción de pavimentos de concreto permeable. Los resultados del proporcionamiento y ensayo de las mezclas, se observan de forma más detallada en los **Anexos No. 3, 4 y 5**.

5.1. Caracterización de los agregados

A continuación, se presentan los datos resultantes de los ensayos realizados a los agregados gruesos y finos.

5.1.1. Granulometría

En la **Tabla 6 y 7**, se muestra la granulometría promedio de 3 muestras de agregados gruesos y finos respectivamente. Asimismo, en la **Figura 38 y 39** se representan gráficamente (curva granulométrica). Además, el **Anexo 3.3** presenta a detalle los datos involucrados en los cálculos, resultados y el cumplimiento de los límites establecidos por la especificación ASTM C33-8, para las 3 muestras de agregados gruesos y finos utilizados.

Tabla 6. Granulometría del agregado grueso.

Tamices	Porcentaje que pasa					
	M-1	M-2	M-3	Muestra Promedio	Especificación ASTM C 33-08	
					Lím. Inferior	Lím. Superior
3/4"	100	100	100	100	100	100
1/2"	98	97	98	98	90	100
3/8"	63	60	61	61	40	70
No. 4	15	14	10	13	0	15
No. 8	2	2	2	2	0	5
T.M.	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"		
T.M.N.	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"		

Como puede observarse en los resultados del análisis granulométrico, el agregado grueso posee un TMN de 1/2" y cumple con los límites de la especificación ASTM C33-08 para el Tamaño No.7 (TMN: 1/2").

Por lo tanto, es un agregado con una buena distribución de tamaños en su composición, siendo adecuados para su aplicación en la fabricación de concreto normal y concreto permeable.

Tabla 7. Granulometría del agregado fino (Material cero).

Tamices	Porcentaje que pasa					
	M-1	M-2	M-3	Muestra Promedio	Especificación ASTM C 33-08	
					Lím. Inferior	Lím. Superior
3/8"	100	100	100	100	100	100
No. 4	99	98	99	99	95	100
No. 8	75	74	75	75	80	100
No. 16	51	52	50	51	50	85
No. 30	35	37	33	35	25	60
No. 50	25	27	21	24	5	30
No. 100	12	13	13	13	0	10
M. Finura	3.03	2.99	3.09	3.04		

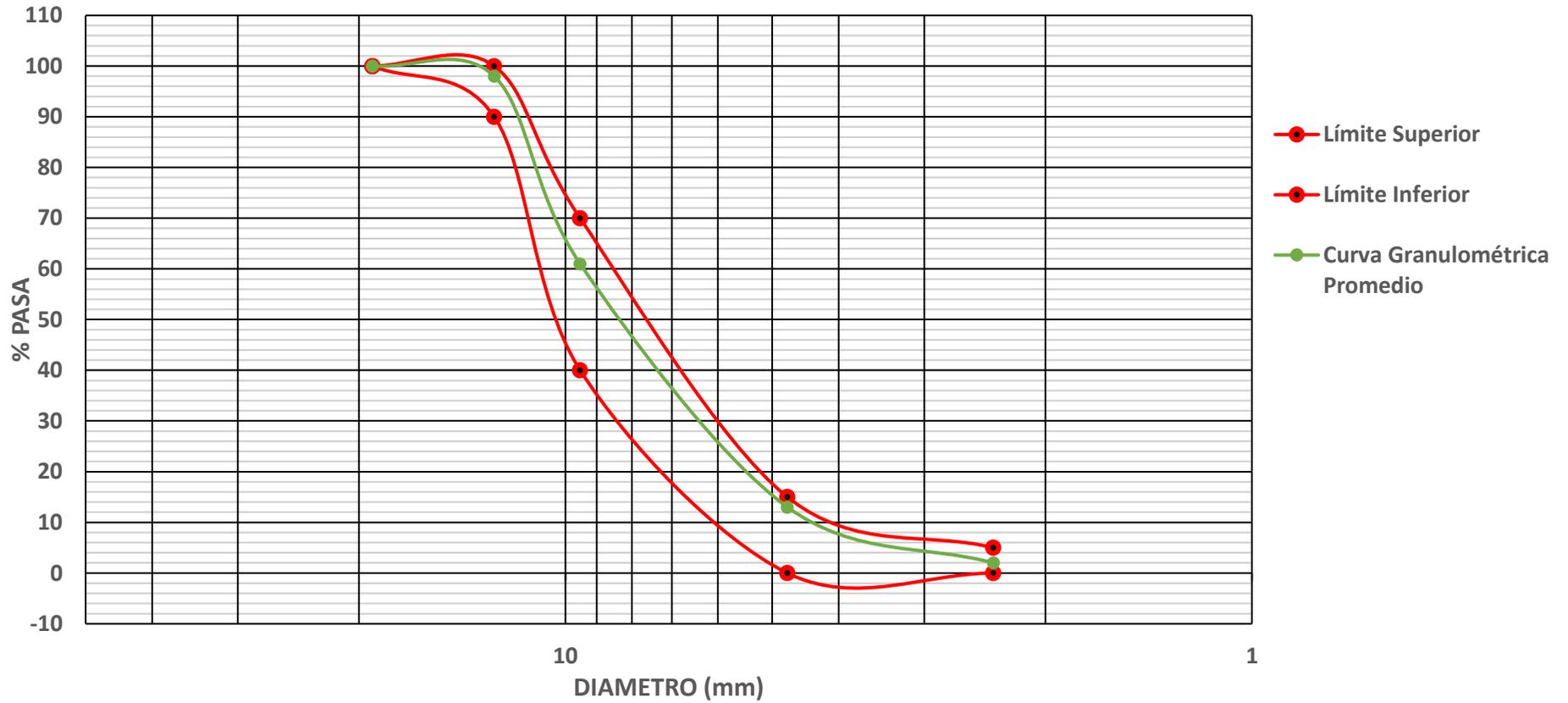
Con respecto al agregado fino, tanto la **Tabla 7** de resultados granulométricos como la **figura 39** (curva granulométrica), muestran que la muestra promedio no cumple con los límites granulométricos en los tamices No. 8 y No. 100 establecidos por la especificación ASTM C 33-08.

El porcentaje de material que pasa por el tamiz No. 8 (Pasa 75%) corresponde a que es una arena donde predominan las partículas gruesas, con tamaños entre 1.19 mm (No. 8) y 2.38 mm (No. 16), tal como lo indica el M.F obtenido de 3.04, cuyo valor se encuentra dentro del rango de valores establecido (2.3 y 3.1) por la misma especificación. En cambio, el 13% de material que pasa por el tamiz No. 100, es característico del **material cero**, por ser el último producto obtenido de la trituración de las rocas, pero, no afecta la trabajabilidad del concreto.

Cabe destacar que, aunque el agregado fino no cumple con los límites indicados por la especificación en dos tamices, no es necesariamente una limitante para su uso en la fabricación de concreto, siempre que su utilización produzca un concreto con propiedades adecuadas. Por lo tanto, los agregados utilizados son adecuados para la fabricación de concretos.

Curva Granulométrica del Agregado Grueso

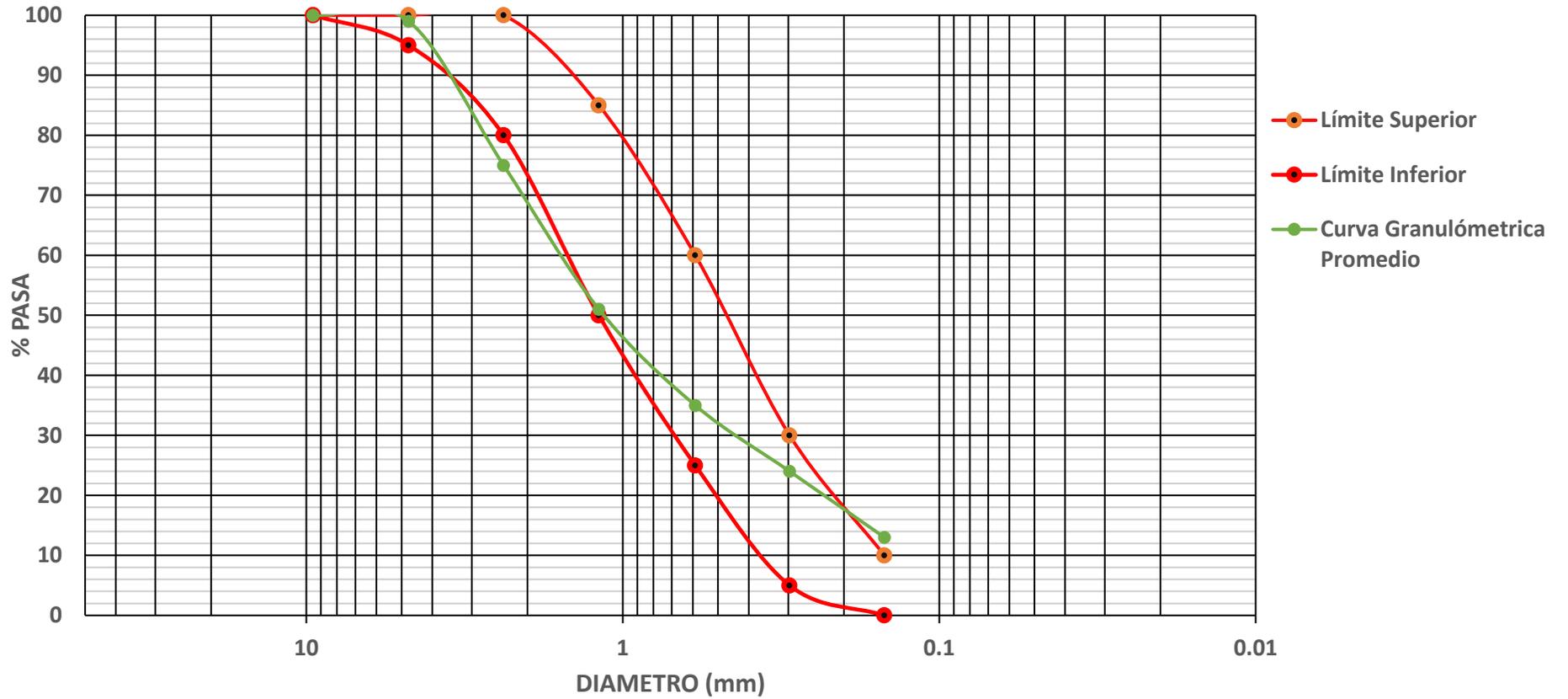
Figura 38. Curva Granulométrica del promedio de 3 muestras de agregado grueso.



Fuente: Elaboración propia.

Curva Granulométrica del Agregado Fino

Figura 39. Curva Granulométrica del promedio de 3 muestras de agregado fino.



Fuente: Elaboración propia.

5.1.2. Pesos Unitarios

Se ensayaron tres muestras para cada uno de los agregados utilizados cuyos resultados se presentan en la **Tabla 8**. Para conocer a detalle los datos involucrados en el cálculo de los pesos unitarios ver **Anexo 3.4**.

Tabla 8. Densidad del agregado grueso y fino.

Muestra, M	Agregado Grueso		Agregado Fino	
	P.V.S.S. (kg/M ³)	P.V.S.C. (kg/M ³)	P.V.S.S. (kg/M ³)	P.V.S.C. (kg/M ³)
M – 1	1495	1586	1765	1967
M – 2	1489	1583	1777	1961
M – 3	1501	1591	1756	1974
M – Promedio	1495	1587	1766	1967

Los valores obtenidos de pesos unitarios indican que son agregados de densidad normal, dado que se encuentran dentro del rango de 1300 y 2000 kg/m³, según la clasificación detallada en **Anexo 1.2**. Es notable destacar, que estos valores son típicos en este tipo de agregados, puesto que provienen de rocas de origen volcánico.

5.1.3. Gravedad Específica y Absorción

Al igual que en los pesos unitarios, la gravedad específica y absorción fueron determinadas para 3 muestras de agregados. Los resultados obtenidos de los ensayos se presentan en la **Tabla 9**. En el **Anexo 3.5**, se encuentran con mayor detalle los datos de entrada, los resultados individuales y el promedio de las muestras ensayadas.

Tabla 9. Gravedad específica y % Absorción de los agregados.

Muestra, M	Agregado Grueso		Agregado Fino	
	G. Específica	% Absorción	G. Específica	% Absorción
M – 1	2.69	1.87%	2.72	2.00%
M – 2	2.72	1.75%	2.80	2.22%
M – 3	2.76	1.78%	2.71	2.02%
M – Promedio	2.72	1.80%	2.75	2.08%

Los datos obtenidos, son comunes en agregados con peso normal de origen volcánico (Agregados basálticos) cuyos rangos de valores varía entre 2.60 a 3.0; se caracterizan por tener un bajo contenido de poros, buena resistencia a la degradación ante cargas abrasivas, mayor durabilidad. En general, son agregados de buena calidad.

5.1.4. Desgaste por Abrasión¹⁶

Los resultados del desgaste por impacto y abrasión en la máquina de los Ángeles de 3 muestras ensayadas para los agregados gruesos empleados se presentan en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Porcentaje de Desgaste por abrasión del agregado grueso

Muestra, M	Agregado Grueso		
	W. Inicial (kg)	W. Final (kg)	% Desgaste
M – 1	5	3.267	35%
M – 2	5	3.165	37%
M – 3	5	3.183	36%
M - Promedio	5	3.205	36%

El porcentaje de desgaste obtenido en el agregado grueso cumple con el máximo permisible de la especificación ASTM C 33-08 (Máx. Permisible: 50%, **Ver Tabla A-7 (Anexo 1.7)**). Es un indicativo de la buena capacidad que tienen para resistir cargas abrasivas por impacto y abrasión, siendo ideales en la producción de concreto expuestos a estas cargas, tales como: pavimentos, pisos expuestos o estructuras frente al agua sujetas a mojarse frecuentemente.

5.1.5. Impurezas orgánicas

A continuación, se presentan en la **Tabla 11.**, los resultados de 3 muestras ensayadas de agregado fino de acuerdo con la norma ASTM C40 y el promedio de estos. (Ver **anexo 3.7**)

¹⁶ En **Anexo 3.6**, se muestra el formato utilizado para el procesamiento de los datos de entrada y la obtención de los resultados del ensayo según ASTM C 131-03.

Tabla 11. Materia orgánica en el agregado fino.

Número de Muestras	M-1	M-2	M-3	Promedio
No. Placa Orgánica	1	1	2	1
No. Placa Orgánica (Máx. Permisible)	3	3	3	3
Cumple con Norma ASTM C 40	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

Según los resultados obtenidos del ensayo de colorimetría, la arena utilizada no contiene impurezas orgánicas en cantidades perjudiciales, que afecten las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto. Destacando que, es característico en agregados manufacturados, donde se tiene un mejor control de estas impurezas. Siendo aptos para la producción de concretos.

5.2. Resumen de propiedades de los materiales

5.2.1. Agregados

Los resultados del promedio de 3 muestras ensayas para cada una de las propiedades del agregado grueso y fino utilizado, se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Resumen de propiedades de los agregados

Descripción	A. Grueso	A. Fino:
Granulometría		
3/4"	100	
1/2"	98	
3/8"	61	100
No. 4	13	99
No. 8	2	75
No. 16		51
No. 30		35
No. 50		24
No. 100		13
Tamaño Máx.	3/4"	3/8"
M. Finura	6.26	3.04
P.V.S.S. (kg/m ³)	1495	1766
P.V.S.C. (kg/m ³)	1587	1967
Gravedad Esp.	2.72	2.75
Absorción (%)	1.80 %	2.08 %
Desgaste L.A. (%)	36 %	-
Impurezas Orgánicas		Cumple

Como se muestra en la **Tabla 12**, tanto el agregado grueso (TMN ½”) como el agregado fino (material cero) utilizado, son adecuados para la fabricación de mezclas de concreto. El incumplimiento en 2 de los límites granulométricos (ASTM 33-08) del agregado fino — tamiz No. 8 (1.19 mm) y No. 100 (2.38 mm) —, no lo privan de su uso para la fabricación de mezclas de concreto, siempre y cuando produzcan concretos con propiedades satisfactorias y cumplan con los requisitos o especificaciones de determinado proyecto.

5.2.2. Cemento

Las propiedades del cemento utilizado en la fabricación de mezclas se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Propiedades del cemento

Cemento¹⁷	
Tipo	Canal-Tipo GU
Peso volumétrico, kg/m ³	1120
Gravedad Esp.	2.90

5.3. Proporcionamiento de mezclas

El proporcionamiento de todas las mezclas fabricadas, se realizó siguiendo la metodología citada en el apartado **4.3.3.3**. Para ello, los datos de entrada: cantidad de cemento, relación w/c, % vacíos en la mezcla y % agregado fino; se seleccionaron en base los rangos propuestos por el ACI 522 R-10:

- La cantidad de cemento: **270 a 415 kg/m³** de concreto,
- La relación w/c, **0.26 - 0.45**,
- El porcentaje de vacíos en la mezcla, **15% - 25%**, y
- El porcentaje de agregado fino¹⁸: **5% - 30%**.

¹⁷ Las propiedades del Cemento fueron recopiladas de la ficha técnica descrita en **Anexo 2.1**.

¹⁸ Los porcentajes de agregado fino corresponden al volumen total de agregados.

A continuación, se presenta el proporcionamiento de la Mezcla seleccionada (**Mezcla M - 11´A**) en la investigación, esta se desarrolló en unidades métricas.

Datos de entrada

La mezcla se dosificó con una relación w/c de 0.32, 15 % de agregado fino (respecto al volumen total de agregados), 25% de vacíos y una dosis de aditivo de 5.5 ml/kg de cemento. Con respecto a las propiedades de los agregados y el cemento utilizado, estas se presentan en las **Tabla 12 y 13** respectivamente. Cabe destacar que los agregados se encontraban totalmente secos, es decir, sin humedad en su interior y que la densidad del agua utilizada es de 1000 kg/m³.

Nota: Selección de la cantidad de cemento.

De acuerdo con el rango de cemento recomendado por el ACI 522 R-10 (270 a 415 kg/m³), se empleó una cantidad de 350 kg para un volumen absoluto de concreto.

Paso 1. Cálculo del volumen de Cemento.

$$\text{Vol.}_{\text{Cemento}} = \frac{W_{\text{Cemento}}}{\text{Grav. Esp.}_{\text{Cemento}} \times \gamma_{\text{Agua}}} = 0.121 \text{ m}^3$$

Paso 2. Cálculo de la cantidad de Agua.

$$W = (W_{\text{Cemento}}) \left(\frac{W}{C} \right) = 112 \text{ kg.}$$

Paso 3. Cálculo del volumen de Agua.

$$\text{Vol.}_{\text{Agua}} = \frac{W_{\text{Agua}}}{\gamma_{\text{Agua}}} = 0.112 \text{ m}^3$$

Paso 4. Cálculo del volumen de agregado.

$$\begin{aligned} \text{Vol. Agregados} &= (1 - \% \text{ Vacíos}) - \left[\left(\frac{W_{\text{Cemento}}}{\text{Grav. Esp.}_{\text{Cemento}} \times \gamma_{\text{Agua}}} \right) + \left(\frac{W_{\text{Agua}}}{\gamma_{\text{Agua}}} \right) \right] \\ &= 0.517 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Paso 5. Cálculo del volumen de agregado fino (Material Cero).

$$\text{Vol.}_{A.Fino} = (\text{Vol.}_{Agregado}) (\% \text{ Fino}) = 0.078 \text{ m}^3$$

Paso 6. Cálculo del peso de agregado fino.

$$W_{A.Fino} = (\text{Vol.}_{Fino}) (\text{Grav. Esp.}_{A.Fino}) (\gamma_{\text{Agua}}) = 214.50 \text{ kg.}$$

Paso 7. Cálculo del volumen de agregado grueso

$$\text{Vol.}_{A.Grueso} = \text{Vol.}_{Agregado} - \text{Vol.}_{A.Fino} = 0.439 \text{ m}^3$$

Paso 8. Cálculo del peso de agregado grueso.

$$W_{A.Grueso} = (\text{Vol.}_{A.Grueso}) (\text{Grav. Esp.}_{A.Grueso}) (\gamma_{\text{Agua}}) = 1194.08 \text{ kg}$$

Paso 9. Corrección del agua de mezclado por absorción y humedad de los agregados.

$$W_{\text{Corregida}} = W_{\text{Agua}} + [(W_{A.Grueso})(\% \text{ Abs.} - \% \text{ Hum.})] \\ + [(W_{A.Fino})(\% \text{ Abs.} - \% \text{ Hum.})] = 137.96 \text{ kg.}$$

Paso 10. Cálculo de la cantidad de aditivo.

$$\text{Cant. Aditivo} = (\text{Dosis de aditivo}) (W_{\text{cemento}}) = 1,925 \text{ ml.} \approx 1.925 \text{ lts.}$$

- **Resumen de cantidad de materiales para un volumen absoluto de concreto**

Descripción	Peso, kg.	Volumen, M ³
Cemento	350	0.121
Agregado fino (Material cero)	214.50	0.078
Agregado grueso (1/2")	1194.08	0.439
Agua total	137.96	0.138
Aditivo, Sika ViscoFlow	2.12	1.925 Lts.

Paso 11. Cantidades de materiales para un saco de cemento

Descripción	Ecuación	Resultado
Número de sacos de cemento:	$\frac{W_{\text{cemento}}}{W_{\text{saco de cemento}}}$	8.24 sacos
Cantidades de materiales para 1 saco de cemento		
Cemento	Peso de un saco de cemento	42.50 kg
Arena (Material Cero)	$\frac{(W_{\text{Arena}})(1 \text{ saco})}{\# \text{ sacos}}$	26.03 kg
Grava (1/2")	$\frac{(W_{\text{Grava}})(1 \text{ saco})}{\# \text{ sacos}}$	144.91 kg
Agua Total	$\frac{(\text{Cant.}_{\text{Agua}})(1 \text{ saco})}{\# \text{ sacos}}$	16.74 lts.
Aditivo	$\frac{(\text{Cant.}_{\text{Aditivo}})(1 \text{ saco})}{\# \text{ sacos}}$	0.23 lts.

Paso 12. Cálculo de Proporciones

A partir de las cantidades de materiales definidas para un saco de cemento, se calcularon los volúmenes para cada uno de los materiales como se muestra a continuación:

Partes por volumen:		
Descripción	Ecuación	Resultado
Cemento	$\text{Vol}_{\text{Cemento}} = \frac{W_{\text{Saco de cemento}}}{\text{PVSC}_{\text{Cemento}}}$	0.0283 m ³
Arena (Material Cero)	$\text{Vol}_{\text{Arena}} = \frac{W_{\text{A.Fino}}}{\text{PVSS}_{\text{Arena}}}$	0.0147 m ³
Grava (1/2")	$\text{Vol}_{\text{grava}} = \frac{W_{\text{A.Gruso}}}{\text{PVSS}_{\text{Grava}}}$	0.097 m ³

Finalmente, se realizó la división de los volúmenes correspondientes a cada material entre el volumen de cemento:

Descripción	Ecuación	Proporción
Cemento	$\frac{Vol_{Cemento}}{Vol_{Cemento}}$	1
Arena (Material Cero)	$\frac{Vol_{Arena}}{Vol_{Cemento}}$	0.52
Grava (1/2")	$\frac{Vol_{grava}}{Vol_{Cemento}}$	3.42

5.3.1. Mezclas fabricadas¹⁹

En el orden que sigue, se presentan los resultados del proporcionamiento de las mezclas desarrolladas en este trabajo:

- a. **5 Bachadas de prueba.**
- b. **7 Mezclas de prueba.**
- c. **18 mezclas fabricadas.**
- d. **3 mezclas ajustadas.**
- e. **Mezcla seleccionada.**

Estos resultados se presentan desde la **Tabla 14** hasta la **Tabla 18**. En estas se muestran las cantidades en peso de los materiales con su respectivo volumen absoluto para obtener 1 metro cúbico de concreto. Asimismo, se indica su proporción en partes por volumen suelto de cada material respecto al volumen de cemento, y su porcentaje de vacíos.

¹⁹ En el **Anexo No. 4**, se muestra a detalle el formato utilizado para el proporcionamiento de todas las mezclas fabricadas.

5.3.1.1. “5 Bachadas de prueba”.

Las 5 bachadas se dosificaron y fabricaron con el propósito de conocer al concreto permeable en su estado fresco: trabajabilidad, densidad y contenido de vacíos; definir las variables de entrada, la dosificación del aditivo y verificar la influencia del porcentaje de agregado fino (material cero) en el comportamiento de la mezcla recién fabricada.

Tabla 14. Proporcionamiento de 5 bachadas de pruebas.

Descripción	Cemento		Arena		Grava		Agua total		Aditivo ²⁰		Proporción	% Vacíos
	kg.	M ³	kg.	M ³	kg.	M ³	kg.	M ³	kg.	M ³		
Bach-1	300	0.103	0.00	0.00	1672	0.607	97	0.097	1.320	1.200 Lt.	1 : 0 : 5.60	20%
Bach-2	300	0.103	0.00	0.00	1568	0.569	85	0.085	1.320	1.200 Lt.	1 : 0 : 5.30	25%
Bach-3	300	0.103	133	0.048	1524	0.553	104	0.104	1.320	1.200 Lt.	1 : 0.38 : 5.1	20%
Bach-4	300	0.103	167	0.061	1502	0.546	103	0.103	1.320	1.200 Lt.	1 : 0.48 : 5.1	20%
Bach-5	300	0.103	165	0.06	1470	0.54	126	0.126	1.320	1.200 Lt.	1 : 0.47 : 5.0	20%

²⁰ La dosificación de aditivo utilizado en la 5 Bachadas de prueba fue de 4 ml/kg de cemento utilizado, según el rango de dosificación proporcionada por la ficha técnica: 4 a 16 ml/. Kg de cemento utilizado.

5.3.1.2. “7 Mezclas de prueba”.

Con los resultados de las primeras 5 bachadas en estado fresco, se procedió al proporcionamiento de 7 mezclas de pruebas. Las primeras 4 mezclas se dosificaron con un 10% de agregado fino (material cero) y con un 30%, las 3 mezclas restantes²¹. Se tomaron especímenes cilíndricos y viguetas con el fin de identificar la influencia del aumento progresivo del cemento, la reducción del porcentaje de vacíos teóricos y la adición de una cantidad sustancial de agregado fino (material cero) en la trabajabilidad, permeabilidad y resistencia del concreto.

Tabla 15. Proporcionamiento de 7 mezclas de prueba.

No. Mezcla	Cemento		Arena		Grava		Agua total		Aditivo ²²		Proporción	% Vacíos
	kg.	M ³	kg.	M ³	kg.	M ³	kg.	M ³	kg.	M ³		
Mezcla 1	270	0.093	171	0.062	1526	0.561	115	0.115	1.188	1.080 Lt.	1 : 0.57 : 6.0	20%
Mezcla 2	300	0.103	165	0.06	1470	0.54	126	0.126	1.320	1.200 Lt.	1 : 0.47 : 5.0	20%
Mezcla 3	350	0.121	162	0.059	1440	0.529	120	0.12	1.540	1.400 Lt.	1 : 0.41 : 4.3	20%
Mezcla 4	400	0.138	157	0.057	1396	0.513	119.8	0.12	1.760	1.600 Lt.	1 : 0.35 : 3.7	20%
Mezcla 5	270	0.093	557	0.2	1281	0.467	108.1	0.108	1.188	1.080 Lt.	1 : 1.86 : 5.0	15%
Mezcla 6	300	0.103	546	0.197	1253	0.459	114.6	0.115	1.320	1.200 Lt.	1 : 1.56 : 4.2	15%
Mezcla 7	350	0.121	525	0.191	1211	0.445	125.8	0.126	1.540	1.400 Lt.	1 : 1.31 : 3.6	15%

²¹ El ACI 522 R10 recomienda porcentaje de finos del **5% a 30%**. (% A.F. corresponde al volumen total de agregados) y % vacíos del 15% a 25%.

²² La dosificación de aditivo utilizado en la 7 Mezclas de prueba fue de 4 ml/kg de cemento utilizado, según el rango de dosificación proporcionada por la ficha técnica: 4 a 16 ml/. Kg de cemento utilizado.

Asimismo, se fabricaron para verificar que tan acertada es la ecuación propuesta por Ahmad y Shah (1985) (**Ecuación 14, Pág. 38**), que correlaciona la resistencia a compresión y flexión del concreto permeable, para su utilización en la investigación.

5.3.1.3. Para las 18 mezclas fabricadas.

Mediante lo observado y los resultados obtenidos de los ensayos en estado fresco y endurecido de las 7 mezclas de prueba, se proyectó la fabricación de 18 mezclas. Se varió la cantidad de cemento (300, 350 y 400 kg/metro cúbico de concreto) y la relación w/c (0.30, 0.32 y 0.34) con el objetivo de optimizar su resistencia y trabajabilidad (**Ver Tabla 16**). En este sentido, se utilizó un porcentaje de agregado fino (material cero) del 20%.

Cabe destacar que, el porcentaje de vacíos, el porcentaje de agregado fino, la relación w/c y la cantidad de cemento se seleccionaron con base en los rangos o limitantes recomendados por el ACI 522 R10 presentados en el **apartado 5.3**.

En cuanto a los especímenes, solo se fabricaron cilindros para determinar su resistencia a compresión (4"x8") y permeabilidad (4"x6"). La resistencia a flexión se obtuvo a partir de la correlación con la resistencia a compresión del concreto, aplicando la Ecuación 14 (**Ver Anexo 7**)

Tabla 16. Proporcionamiento de 18 mezclas fabricadas.

No. Mezcla	Cemento		Arena (M. Cero)		Grava (1/2")		Agua total		Aditivo ViscoFlow ²³		Proporción	% Vacíos
	kg.	M ³	kg.	M ³	kg.	M ³	kg.	M ³	kg.	M ³		
Mezcla 1'	300	0.103	334	0.121	1320	0.485	121	0.121	1.815	1.650 Lt.	1 : 0.95 : 4.4	20%
Mezcla 2'	350	0.121	316	0.115	1250	0.459	134	0.134	2.117	1.925 Lt.	1 : 0.79 : 3.7	
Mezcla 3'	400	0.138	298	0.108	1180	0.434	147	0.147	2.420	2.200 Lt.	1 : 0.66 : 3.1	
Mezcla 4'	300	0.103	306	0.111	1211	0.445	118	0.118	1.815	1.650 Lt.	1 : 0.87 : 4.1	25%
Mezcla 5'	350	0.121	288	0.105	1141	0.419	132	0.132	2.117	1.925 Lt.	1 : 0.72 : 3.4	
Mezcla 6'	400	0.138	271	0.098	1071	0.394	145	0.145	2.420	2.200 Lt.	1 : 0.60 : 2.8	
Mezcla 7'	300	0.103	330	0.120	1307	0.480	126	0.126	1.815	1.650 Lt.	1 : 0.94 : 4.4	20%
Mezcla 8'	350	0.121	312	0.113	1234	0.454	141	0.141	2.117	1.925 Lt.	1 : 0.78 : 3.6	
Mezcla 9'	400	0.138	294	0.107	1162	0.427	155	0.155	2.420	2.200 Lt.	1 : 0.65 : 3.0	
Mezcla 10'	300	0.103	303	0.110	1198	0.440	124	0.124	1.815	1.650 Lt.	1 : 0.86 : 4.0	25%
Mezcla 11'	350	0.121	285	0.103	1126	0.414	138	0.138	2.117	1.925 Lt.	1 : 0.71 : 3.3	
Mezcla 12'	400	0.138	266	0.097	1053	0.387	152	0.152	2.420	2.200 Lt.	1 : 0.59 : 2.7	
Mezcla 13'	300	0.103	327	0.119	1294	0.476	132	0.132	1.815	1.650 Lt.	1 : 0.93 : 4.3	20%
Mezcla 14'	350	0.121	308	0.112	1219	0.448	147	0.147	2.117	1.925 Lt.	1 : 0.77 : 3.6	
Mezcla 15'	400	0.138	289	0.105	1145	0.421	163	0.163	2.420	2.200 Lt.	1 : 0.64 : 3.0	
Mezcla 16'	300	0.103	300	0.109	1185	0.436	130	0.130	1.815	1.650 Lt.	1 : 0.85 : 4.0	25%
Mezcla 17'	350	0.121	281	0.102	1110	0.408	145	0.145	2.117	1.925 Lt.	1 : 0.70 : 3.3	
Mezcla 18'	400	0.138	262	0.095	1036	0.381	160	0.160	2.420	2.200 Lt.	1 : 0.58 : 2.7	

²³ La dosificación de aditivo utilizado en la 18 Bachadas de prueba para aumentar el tiempo de trabajabilidad fue de 5.5 ml/kg de cemento utilizado.

5.3.1.4. Mezclas Ajustadas.

Según el comportamiento en estado fresco y endurecido de las 18 mezclas fabricadas (trabajabilidad, porcentaje de vacíos, permeabilidad y resistencia a compresión) se seleccionaron 3 mezclas para realizar una reducción en 5% del porcentaje de agregado fino utilizados, es decir, de un 20% a un 15%.

Las mezclas seleccionadas para tal ajuste fueron: la **Mezcla 9', 11' y 15'**, las cuales fueron nombradas como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 17. Proporcionamiento de mezclas ajustadas

Mezcla	Materiales	Pesos	Volúmenes
		Kg	m ³
Mezcla 9'A	Cemento	400	0.14
	A. Fino (Material Cero)	219	0.08
	Grava (1/2")	1229	0.452
	Agua Total	155	0.155
	Aditivo ViscoFlow	2.42	2.200 Lt.
	Proporción	1 : 0.49 : 3.20	
Mezcla 11'A	Cemento	350	0.123
	A. Fino (Material Cero)	213	0.077
	Grava (1/2")	1191	0.438
	Agua Total	138	0.138
	Aditivo ViscoFlow	2.117	1.925 Lt.
	Proporción	1 : 0.52 : 3.42	
Mezcla 15'A	Cemento	400	0.14
	A. Fino (Material Cero)	216	0.079
	Grava (1/2")	1211	0.445
	Agua Total	162	0.162
	Aditivo ViscoFlow	2.42	2.200 Lt.
	Proporción	1 : 0.48 : 3.20	

Es importante mencionar que, para la selección de la mezcla final, fue necesario fabricar y ensayar viguetas con dimensiones de 6"x6"x21" para obtener valores medidos o reales de resistencia a flexión.

5.3.1.5. Mezcla seleccionada²⁴

Finalmente, se seleccionó la **Mezcla 11'A** como la óptima, en base a 3 criterios: **trabajabilidad, permeabilidad y resistencia a flexión**. Esta mezcla se reprodujo 5 veces con la finalidad de verificar la consistencia de los procesos realizados durante su fabricación y los resultados de las propiedades obtenidas. Puede ver estos resultados con más detalle en el **anexo 4.1**.

Tabla 18. Proporcionamiento de mezcla seleccionada para 5²⁵ reproducciones.

Mezcla	Materiales	Peso	Volumen
		kg	m ³
Mezcla Seleccionada: Mezcla 11'A	Cemento	350	0.121
	A. Fino (Material Cero)	213	0.078
	Grava (1/2")	1196	0.440
	Agua Total	138	0.138
	Aditivo ViscoFlow	2.117	1.925 Lt.
	Proporción	1 : 0.52 : 3.42	
	% Vacíos	25%	

²⁴ La mezcla seleccionada se reprodujo 4 veces con un volumen de 0.115 M³, para la fabricación de 14 cilindros (4"x8") y 5 viguetas con dimensiones 6"x6"x21".

²⁵ En la última reproducción se fabricó un volumen de 0.145 M³, para la fabricación de 14 cilindros (4"x8"), 5 viguetas con dimensiones 6"x6"x21 y una losa de 0.50 m.x0.50 m.x0.1m.

5.4. Resultados de ensayos

A continuación, desde la **Tabla 19** hasta la **Tabla 25**, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados a todas las mezclas fabricadas en la investigación. Específicamente se muestra la relación w/c, el porcentaje de vacíos teóricos, la cantidad de cemento y su proporción en partes por volumen suelto de cada material respecto al volumen de cemento. Asimismo, la densidad y porcentaje de vacíos en estado fresco, la resistencia a compresión desarrollada a distintas edades (7, 14 y 28 días) y su capacidad percolante.

5.4.1. “5 Bachadas de Prueba”.

Tabla 19. Resultados de ensayos en las 5 bachadas de prueba.

Descripción	Relación w/c				
	0.30	0.26	0.32	0.30	0.32
No Bachada	Bach. 1	Bach. 2	Bach. 3	Bach. 4	Bach. 5
% Vacíos de diseño	20%	25%	20%	20%	20%
Cemento, Kg.	300	300	300	300	300
% A. Fino (Material Cero)	0%	0%	8%	10%	10%
% Vacíos (Est. fresco)	29%	29%	23%	26%	22%
γ Est. Fresco, kg./M ³	1877	1873	1972	1896	1973
Proporción	1 : 0 : 5.6	1 : 0 : 5.3	1 : 0.38 : 5.1	1 : 0.48 : 5.1	1 : 0.47 : 5.0

El objetivo de las 5 bachadas fue conocer al concreto permeable en estado fresco. Se observó en las primeras 2 bachadas producidas únicamente con el uso de agregado grueso (1/2") que poseían nula o poca trabajabilidad y dificultad en la pasta de cemento al cubrir todos los agregados, trayendo consigo porcentajes de vacíos elevados (29%) y densidades cercanas a los 1900 kg/M³.

Por otro lado, en las bachadas 3, 4 y 5 con la inclusión del agregado fino (8% y 10%) se obtuvo una mejor trabajabilidad en las mezclas, el agregado grueso se encontraba rodeado por la cantidad justa de mortero, de tal forma que, permitió la adherencia de las partículas sin afectar su permeabilidad. Destacando que, todas las mezclas se caracterizaron por ser rígidas.

5.4.2. “7 Mezclas de Prueba”.

Tabla 20. Resultados de ensayos de las primeras 7 mezclas de prueba.

Descripción		No. Mezcla						
No. Mezcla		M – 1	M – 2	M – 3	M – 4	M – 5	M – 6	M – 7
% Vacíos		20%				15%		
% Agregado Fino (Material Cero)		10%				30%		
Cemento, kg/m ³		270	300	350	400	270	300	350
Relación w/c		0.31	0.32	0.26	0.23	0.33	0.3	0.27
% Vacíos (Est. Fresco)		24%	21%	22%	21%	4%	4%	3%
γ Est. Fresco, kg./M ³		1923	1972	1952	1969	2290	2301	2322
Resistencia Compresión, psi	7 días	932	1114	1063	1037	2416	2333	2960
	14 días	1106	1517	1246	1461	2880	2882	3565
	28 días	1332	1614	1519	1571	3310	3431	3977
Resistencia Flexión, psi	7 días	253	283	278	287	349	383	509
	14 días	284	345	323	364	542	503	538
	28 días	322	368	344	386	621	626	628
Permeabilidad, mm/s.		6.27	4.29	4.79	4.32	0.12	0.11	0.08
Proporción		1 : 0.57 : 6	1 : 0.47 : 5	1 : 0.41 : 4.3	1 : 0.35 : 3.7	1 : 1.86 : 5	1 : 1.56 : 4.2	1 : 1.31 : 3.6

En las primeras 4 mezclas fabricadas con un 10% de agregado fino (material cero), se obtuvieron mezclas rígidas, pero con trabajabilidad aceptable. La densidad fresca osciló entre los 1920 y 1970 kg/M³. En estado endurecido, la mezcla M-2 obtuvo el mejor comportamiento mecánico, con valores de resistencia a compresión (f'c) y flexión (MR) de **1614 psi y 368 psi** (edad: 28 días), respectivamente. Destacando que, estas mezclas tienen tasas de permeabilidades adecuadas, que se encuentran dentro del rango estipulado por el ACI 522 R10; **1.4 a 12.2 mm/s**.

Es importante mencionar, la incidencia de la cantidad de cemento utilizado en las mezclas. Al emplear una mayor cantidad de cemento se obtienen mayores resistencias, sin embargo, al utilizar una cantidad de cemento considerable (> 350 kg/M³) en combinación con bajas relaciones w/c (< 0.26) la adquisición de resistencia es menor debido a que la cantidad de pasta es insuficiente para cubrir los agregados.

En cambio, las últimas 3 mezclas (M-5, M-6 y M-7) con la adición de un 30% de agregado fino y al disminuir la cantidad de vacíos a 15%, se caracterizaban por ser mezclas rígidas con trabajabilidad adecuada en estado fresco. No obstante, presentaban **% vacíos menores al 5%**, reduciendo exponencialmente la tasa de percolación de las mezclas, a valores **inferiores 0.12 mm/s**. En estado endurecido, los valores de resistencia a compresión y flexión fueron superiores a **3000 psi y 600 psi**, respectivamente, a una edad de 28 días.

Por lo tanto, ninguna de estas 7 mezclas es considerada como la óptima y fue necesario fabricar 18 mezclas, variando los porcentajes de vacíos (20% y 25%) y utilizando en todas 20% de A. Fino. Todo ello, con el objetivo de seleccionar las mezclas que tenga resistencias a compresión cercanas a 3000 psi. En este sentido, mediante la comparación de los módulos de ruptura, obtenidos en los ensayos a flexión y los valores derivados de la aplicación de la ecuación propuesta por Ahmad y Shah (1985), se verificó que ofrece resultados aceptables para su utilización²⁶.

²⁶ En el **Anexo No.7** se realizó la comparación entre los valores obtenidos directamente por el Ensayo ASTM C78-09 y la ecuación de correlación. La ecuación se utilizó para seleccionar de las 18 mezclas fabricadas, las 3 mezclas con un F'c cercano a 3000 psi, dado que, éste equivale aprox. a un **MR de 500 psi**.

5.4.3. “18 Mezclas fabricadas”

En estado fresco, las 6 mezclas se caracterizaron por ser rígidas, pero con una adecuada trabajabilidad (aparición o brillo metálico). Como se muestra en la **Tabla 21**, el porcentaje de vacíos se encuentra inversamente relacionado con la densidad del concreto, de manera que, una mayor densidad trae consigo una reducción de los vacíos en la mezcla.

Tabla 21. Resultados de ensayos desde mezcla M-1' hasta mezcla M-6' de las 18 mezclas de prueba.

Descripción	Relación w/c						
	0.3						
No. Mezcla	M-1'	M-2'	M-3'	M-4'	M-5'	M-6'	
% Vacíos	20%			25%			
Cemento, kg/m ³	300	350	400	300	350	400	
% Vacíos (Estado Fresco)	17%	14%	12%	19%	16%	14%	
γ Estado Fresco, kg/m ³	2041	2109	2139	2013	2071	2105	
Resistencia a Compresión	7 días	1143	1509	1821	1094	1137	1274
	14 días	1459	1753	1845	1376	1441	1670
	28 días	1971	2219	2396	1764	2030	2197
Resist. Flexión, MR (psi, 28 días)	361	391	412	336	369	389	
Permeabilidad, mm/s.	3.37	2.68	2.01	3.79	3.01	2.47	

Al utilizar distintas cantidades de cemento, se confirmó que al igual que la cantidad de finos influye en la adquisición de la resistencia a compresión y en la reducción de los vacíos en la mezcla. Sin embargo, con la utilización de la relación w/c de 0.30 todas las mezclas tienen tasas de permeabilidades que se encuentran dentro del rango estipulado por el ACI 522 R10; **1.4 a 12.2 mm/s**. En cuanto las resistencias a compresión, estas varían entre los **1900 y 2400 psi**, por lo que no se seleccionó ninguna mezcla para realizar el ajuste en el porcentaje de agregados finos utilizados.

A continuación, en la **Tabla 22** se presentan los datos resultantes de los ensayos realizados a las 6 mezclas fabricadas con una relación w/c de 0.32. Al utilizar esta relación w/c; en estado fresco, las mezclas presentaron una trabajabilidad adecuada y la pasta que rodeaba los agregados tenía apariencia o brillo metálico. Asimismo, al realizar los ensayos, su densidad osciló entre 2060 y 2235 kg/m³ y el porcentaje de vacíos entre 8 y 16%. En cambio, en estado endurecido, los valores de permeabilidad (k) y resistencia a compresión (f'c) variaron desde 1 a 3 mm/s y 2100 a 3000 psi, respectivamente.

Tabla 22. Resultados de ensayos desde mezcla M-7' hasta mezcla M-12' de las 18 mezclas de prueba.

Descripción	Relación w/c						
	0.32						
No. Mezcla	M-7'	M-8'	M-9'	M-10'	M-11'	M-12'	
% Vacíos	20%			25%			
Cemento, kg/m ³	300	350	400	300	350	400	
% Vacíos (Estado Fresco)	14%	11%	8%	16%	12%	10%	
γ Estado Fresco, kg/m ³	2108	2179	2234	2068	2137	2164	
Resistencia a Compresión (f'c), psi	7 días	1400	2153	2460	1493	1606	2233
	14 días	1866	2480	2734	1824	1917	2363
	28 días	2121	2725	3012	2073	2591	2737
Resist. Flexión, MR (psi, 28 días)	380	449	480	374	434	450	
Permeabilidad, mm/s.	2.36	1.88	1.09	3.02	2.16	1.36	

Por lo tanto, es evidente que al utilizar esta relación w/c se mejora la trabajabilidad, densidad, resistencia, pero se reducen los vacíos y la permeabilidad de las mezclas. De las 9 mezclas, se seleccionaron las mezclas **M-9'** y **M-11'** para realizar el ajuste en el porcentaje de agregados finos utilizados. En este sentido, la mezcla M-9' se seleccionó en base al f'c que es aproximado a 3000 psi, en cambio, la mezcla M-11' considerando los criterios de permeabilidad y resistencia a compresión.

En la **Tabla 23**, se presentan los resultados de las 6 mezclas fabricadas con una relación w/c de 0.34. En su estado fresco, las mezclas eran rígidas, pero con muy buena trabajabilidad. Al utilizar estos porcentajes de agregados: 80% A. Grueso y 20% A. Fino (Volumen total de agregados), en combinación con esta relación w/c (0.34) se reducen considerablemente los vacíos y la tasa de infiltración, a cambio de resistencias a compresión aceptables. Asimismo, usar una cantidad de cemento por encima de los 300 kg/m³ de concreto reduce la permeabilidad, a tal punto que, con el empleo de una cantidad de 400 kg resulta un concreto casi impermeable.

Tabla 23. Resultados de ensayos desde mezcla M.13' hasta mezcla M-18' de las 18 mezclas de prueba.

Descripción	Relación w/c						
	0.34						
No. Mezcla	M-13'	M-14'	M-15'	M-16'	M-17'	M-18'	
% Vacíos	20%			25%			
Cemento, kg/m ³	300	350	400	300	350	400	
% Vacíos (Estado Fresco)	11%	7%	4%	12%	10%	6%	
γ Estado Fresco, kg/m ³	2161	2239	2293	2134	2172	2263	
Resistencia a Compresión (f'c), psi	7 días	1764	1928	2316	1681	1693	2060
	14 días	2136	2331	2692	2046	2301	2478
	28 días	2484	2878	3130	2396	2645	2985
Resist. Flexión, MR (psi, 28 días)	422	465	492	411	440	476	
Permeabilidad, mm/s.	1.67	0.92	0.28	1.92	1.29	0.47	
Proporción	1 : 0.93 : 4.3	1 : 0.77 : 3.6	1 : 0.64 : 3.0	1 : 0.85 : 4.0	1 : 0.70 : 3.3	1 : 0.58 : 2.7	

De las 6 mezclas, se seleccionó la mezcla **M-15'** para ajustar o reducir el porcentaje de A. Finos en 5%. Con la finalidad de verificar que tanta influencia tiene tal ajuste principalmente en la tasa de percolación del concreto, además, porque presentó una resistencia a compresión (f'c) superior a los 3000 psi.

5.4.4. Mezclas ajustadas

En las 3 mezclas (M-9', M-11' y M-15') se ajustó únicamente el porcentaje A. Finos a 15%²⁷. Con el objetivo de optimizar la permeabilidad y resistencia de las mezclas de concreto permeable.

Tabla 24. Resultados de ensayos en las mezclas ajustadas.

Descripción		Mezclas Ajustadas		
		M-9'A	M-11'A	M-15'A
Relación w/c		0.32	0.32	0.34
% Vacíos		20%	25%	20%
Cemento, kg/m ³		400	350	400
% Vacíos (Estado Fresco)		12%	15%	8%
γ Estado Fresco, kg/m ³		2126	2079	2227
Resistencia a Compresión (f'c), psi	7 días	1857	1402	2149
	14 días	2284	1779	2633
	28 días	2577	2388	2816
Resistencia a Flexión (MR), psi	7 días	302	294	412
	14 días	397	356	457
	28 días	492	472	526
Permeabilidad, mm/s.		1.92	2.59	1.03

En estado fresco, la reducción del % A. Fino trajo consigo una disminución en la densidad, resistencia a compresión y flexión del concreto²⁸, pero la tasa de percolación y los vacíos aumentaron en la mezcla. Con los resultados de la mezcla M-15'A, se verifica que porcentajes de vacíos medidos por debajo del 10% dan como resultado mezclas poco permeables.

De las tres mezclas ajustadas; en base a los resultados de permeabilidad, resistencia a flexión (MR), trabajabilidad y la cantidad de cemento utilizado, se seleccionó como mezcla óptima, la mezcla **M-11'A**. Esta presentó una resistencia a flexión aproximada de 500 psi (472 psi) y una tasa de percolación de 2.59 mm/s (**1.4 a 12.2 mm/s**) utilizando una cantidad de cemento de 350 kg/m³ de concreto. Esta mezcla fue reproducida **5 veces** para constatar los resultados obtenidos.

²⁷ Las mezclas seleccionadas previamente fueron fabricadas con un 20% de agregados finos, este porcentaje corresponde al volumen total de agregados.

²⁸ El MR las 18 mezclas se obtuvo mediante la aplicación de la **Ecuación 14**, que correlaciona la resistencia a compresión y flexión del concreto.

5.4.5. Mezcla seleccionada

En la **Tabla 25**, se presentan los resultados de los ensayos realizados en las 5 reproducciones de la mezcla seleccionada (M-11'A). Con la reproducción de la mezcla, se constató que el procedimiento utilizado para la fabricación, curado y ensayo de especímenes permite obtener resultados consistentes y confiables.

Tabla 25. Resultados de ensayos en la reproducción de la mezcla seleccionada.²⁹

Descripción		Mezcla Seleccionada _ Mezcla 11'A					
		R-1	R-2	R-3	R-4	R-5	Prom.
No. Reproducción							
Relación w/c		0.32					
% Vacíos		25					
% Agregado Fino		15%					
Cemento, kg/m ³		350					
% Vacíos (Estado Fresco)		13%	14%	15%	16%	14%	14%
γ Estado Fresco, kg/m ³		2119	2106	2095	2063	2112	2098
Resistencia a Compresión (f'c), psi	7 días	1708	1694	1765	1729	1772	1734
	14 días	2163	2135	2128	2163	2142	2146
	28 días	2481	2424	2353	2149	2481	2378
Resistencia a Flexión (MR), psi	7 días	302	297	313	317	335	313
	14 días	373	361	369	364	371	368
	28 días	487	475	469	475	459	473
Permeabilidad., mm/seg.		2.32	2.53	2.73	3.03	2.46	2.51
% Degradación por impacto y abrasión.		21%	24%	25%	25%	24%	24%

En estado fresco, la mezcla era rígida, pero con la trabajabilidad necesaria para ser colocada en los moldes. La densidad en estado fresco cumple la tolerancia de ± 80 kg/m³ con relación al valor obtenido del ajuste, **2079 kg/m³**. En estado endurecido, presento una tasa de infiltración promedio de **2.51 mm/s**, que cumple con el rango de **1.4 a 12.2 mm/s** estipulado por ACI 522R-10, la resistencia a flexión es de 473 psi y el porcentaje de degradación por impacto y abrasión del 24%, que indica que es propenso a sufrir disgregación de agregados bajo la incidencia de estas acciones.

²⁹ En **Anexo 5**, se realizó una comparación de la producción en bruto (costo de materiales) de un volumen unitario de concreto convencional y concreto permeable (mezcla seleccionada).

- En **Anexo 6**, se muestra los formatos para el procesamiento de datos en los ensayos en estado fresco y endurecido de **Mezcla Seleccionada (M11'A)**.

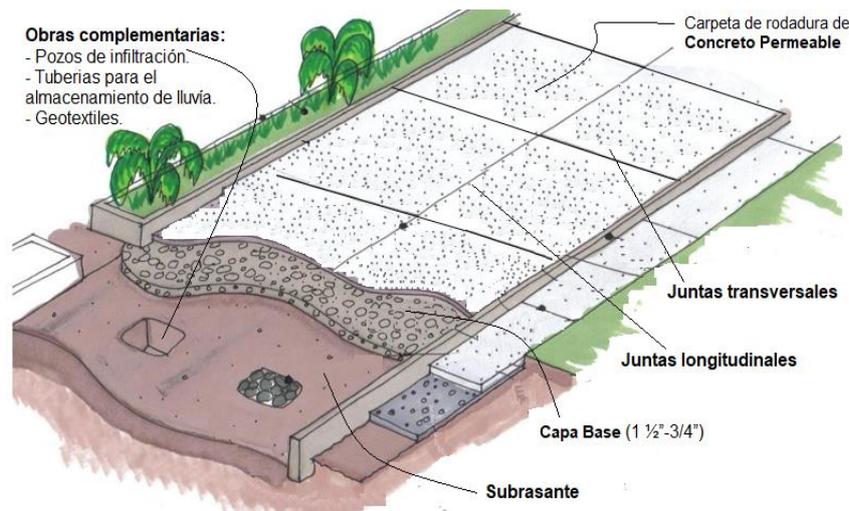
- La tasa de infiltración medida según ASTM C 1701 en una losa de dimensión 0.50x0.50x0.10m en la R-5 es de 319 pulg/h (39,399 mm/h). **Ver Anexo 6.5.**

5.5. Guía simplificada para la construcción de pavimentos de concreto permeable.

La construcción de pavimentos permeables puede hacerse de muchas formas diferentes y presentar variantes en su estructura o elementos adicionales que dependen de factores como: las condiciones ambientales, los materiales, el tamaño y finalidad del proyecto etc...

Típicamente, como se muestra en la **Figura 40**, estos pavimentos están compuestos por carpeta de rodadura de concreto permeable, base, subrasante u otras obras complementarias (filtros, tuberías, pozos de infiltración etc....) en función de los beneficios adicionales que se requieran obtener.

Figura 40. Composición de una estructura típica de concreto permeable.



Fuente: Adoptado de VERDECRETO, Construcción de Concreto Permeable, México, 2015.

5.5.1. Consideraciones previas a la construcción

Para garantizar el éxito de estos pavimentos y la continuidad de los procesos en su construcción, se debe cumplir con los planos del proyecto y las especificaciones de producto terminado. Además, se requiere tomar en cuenta ciertas consideraciones:

5.5.1.1. Planificación

Según el ACI 522 R-10 (2015), es recomendable realizar una Conferencia de preinstalación y construir un tramo de prueba para abordar lo siguiente:

- Confirmar que todo el personal está trabajando conforme los planos y las especificaciones del proyecto, y que todas las revisiones estén documentadas,
- Verificar que todos los documentos requeridos hayan sido finalizados,
- Determinar la secuencia de construcción y la separación de las juntas;
- Organizar el acceso adecuado para los camiones mezcladores y sistemas de transporte,
- Selección de la cuadrilla óptima para el tamaño del proyecto y condiciones previstas. En este aspecto, ARGOS (2016) agrega que es importante definir los roles de la cuadrilla. Generalmente la cuadrilla se divide en 3 grupos:
 - a) descarga y colocación,
 - b) compactación,
 - c) acabado, corte de juntas y curado.
- Coordinación de las inspecciones in situ y/o ensayos de materiales,
- Verificar el diseño de mezcla propuesto, la disponibilidad de los materiales, la mezcla y el calendario de aplicación propuesto con el proveedor de concreto; y
- Verificar que el contratista, el personal de la planta dosificadora y de ensayo, estén debidamente capacitados.

5.5.1.2. Producción de Concreto³⁰

Por las características especiales del concreto permeable, en cualquier aplicación donde se requiera su uso, se recomienda emplear **concreto elaborado en planta** (premezclado) puesto que asegura lo siguiente:

- Un estricto control de calidad que se ejecuta en los procesos de elaboración,
- Una mejor capacidad de producción y entrega,
- Un Mayor control de los materiales (almacenamiento, estudio de propiedades y selección del material), y
- La fabricación del concreto según los requerimientos del proyecto.

³⁰ El concreto se puede elaborar en campo con mezcladoras siempre y cuando este un ingeniero especialista o capacitado en la elaboración de mezclas de concreto permeable.

Figura 41. Traslado del concreto en camiones mezcladores.



Fuente: IMCYC, Pavimentos Permeables, México, s.f.

5.5.1.3. Clima

Es importante verificar las condiciones climáticas. Los efectos negativos de los extremos térmicos, como las altas temperaturas con humedad relativa y condiciones de viento; se agudizan más en un concreto permeable debido a su superficie expuesta, dificultando la descarga, colocación, compactación, y durabilidad del concreto.

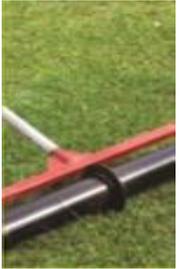
Por lo tanto, se deben tomar medidas necesarias para mitigar estos efectos. ARGOS (2016), menciona algunas medidas que se pueden aplicar:

- Reducir el tiempo de exposición del concreto a estas condiciones,
- Usar barreras de viento,
- Definir horas alternativas para la colocación (a primeras horas de la mañana o por la noche),
- Ubicar la planta dosificadora lo más próximo al sitio de colocación y
- Proteger al concreto en todo momento durante su período de curado.

5.5.2. Recursos necesarios

5.5.2.1. Equipo y herramientas

Las herramientas que generalmente se utilizan para la colocación del concreto permeable son las siguientes (Ídem).

Rodillo compactador principal longitudinal	Rodillo manual	Rodillo corta-juntas (cortador de pizza)	Pisón
			

Palas	Bordeadora	Aspersor manual	Plástico transparente (Cal. 600)	Formaleta
				

5.5.2.2. Mano de Obra

Para la construcción de un pavimento de concreto permeable, se requiere que el personal o recurso humano esté adecuadamente capacitado, dado que los procesos de construcción a llevar a cabo no son sencillos. Una cuadrilla usualmente se compone de **6 a 12 personas** (Ídem).

5.5.3. Procedimiento de Construcción

El procedimiento que se describe a continuación explica las principales actividades efectuadas en la construcción de una estructura típica (**Ver Figura 40**) de una vía nueva de pavimento con concreto permeable:

5.5.3.1. Adecuación de la subrasante

La subrasante es el material sobre el cual se construirá la estructura de pavimento; esta debe ser capaz de soportar los diferentes esfuerzos y las condiciones hidráulicas a las que estará sometida.

Figura 42. Movimiento de tierra en la preparación de la subrasante.



Fuente: ARGOS, Característica y Función de la subrasante en pavimentos, Colombia, 2015.

La uniformidad del soporte de la subrasante es un criterio clave para la colocación del concreto permeable. SOLANO (2014) menciona que, generalmente para la adecuación de esta capa se realiza lo siguiente:

- a. **Escarificación y homogenización.** El procedimiento consiste en disgregar la superficie del suelo a lo largo y ancho de lo que será la calzada en una profundidad especificada, permitiendo que adquiera una condición suelta.
- b. **Humectación del suelo.** Si el suelo estuviese muy seco de acuerdo con la humedad especificada del material a compactar, éste puede humedecerse hasta llevarlo a una condición de ± 2 % con respecto a la humedad óptima de compactación.

- c. **Aireación del suelo.** Si la humedad natural es mayor que la óptima, se deberá airear el suelo removiéndolo de un lado a otro por medio de una motoniveladora ($\pm 2\%$ de la humedad óptima).
- d. **Compactación.** Según el tipo de suelo la subrasante se compacta entre un 90% (grado de compactación ideal) y 95% de la densidad determinada por ASTM D 698 o AASHTO T 99, debido a que una mayor compactación perjudica la permeabilidad del suelo.
- e. **Recepción de la capa de subrasante.** Debe cumplir con las especificaciones técnicas del proyecto. Para ello, se recomienda ejecutar lo siguiente:
- Determinar el coeficiente de balasto (módulo de reacción) en campo, según ASTM D4429, para determinar la capacidad de carga o resistencia del suelo según lo requerido en el diseño.
 - Confirmar la tasa de filtración del agua en la subrasante según lo especificado en el diseño. Para ello, se determina la permeabilidad de acuerdo con la norma ASTM D 3385 (o cualquier otro ensayo que mida la permeabilidad del suelo).
 - Cualquier disconformidad en la elevación, permeabilidad u otro parámetro relevante de la subrasante debe ser solucionado antes de seguir con la colocación de la siguiente capa.

5.5.3.2. Adecuación de la base o capa reservorio

La base puede definirse como una capa de material granular colocada sobre la subrasante con el propósito de proveer un depósito para el almacenamiento del agua, ayudar al tiempo de recuperación del sistema y proporcionar estabilidad a las losas de concreto permeable (Kevern, Wang, Suleiman, & Schaefer, 2006).

Para el proceso de conformación de la capa de base, se realiza el suministro de agregados granulares (1 ½"-1/2"), que se colocaran de conformidad con los alineamientos verticales, pendientes y dimensiones indicadas en los planos del proyecto.

Según ARGOS (2016), la base especificada debe cumplir con los siguientes requerimientos generales:

- Estar conformada por agregado limpio (lavado), para evitar el riesgo de obstrucción en la superficie del geotextil (si se utiliza).
- Conservar los niveles dentro de las tolerancias especificadas.
- El material debe cumplir con la densidad establecida en las especificaciones (compactación por medio de rodillos vibratorios), manteniendo el contenido de vacíos que permita gestionar el agua de lluvia y permita reducir los esfuerzos del tránsito durante la construcción.
- Humedecer la superficie de la base un día antes de la colocación del concreto y previo a la descarga (sin formar charcos).

Figura 43. Humedecimiento de la base.



Fuente: ARGOS, Concreto Permeable-Aplicación, Colombia, s.f.

5.5.3.3. Colocación de formaletas.

Un pavimento de concreto permeable puede colocarse tanto con formaletas fijas como con formaletas deslizantes. Sin embargo, la mejor manera de hacerlo es con formaletas sobre el terreno (NRMCA, s.f.).

Figura 44. Colocación de formaletas en base granular.



Fuente: ARGOS, Construcción de pavimentos de concreto, Colombia, s.f.

Cuando se utilizan las formaletas, estas deben de ser fabricadas de un material resistente, durable y de espesor constante (INCYC, s.f.). Con relación a su instalación, se procede una vez preparada la base.

No obstante, El ICPC (1991) menciona que para obtener una buena calidad superficial del pavimento, se debe realizar lo siguiente.:

- a. La colocación de las formaletas se debe realizar con la ayuda de un levantamiento topográfico para poder asegurar que el pavimento cumpla con los niveles especificados.
- b. El alineamiento se realiza con estacas de referencia, colocadas a ambos lados de la vía a pavimentar.

- c. Se deben colocar de tal forma que la base de la formaleta se apoye completamente sobre la capa base y el borde superior coincida con la trayectoria del hilo.
- d. Las formaletas se fijan al terreno por medio de los pasadores de anclaje, verificando que haya conexiones herméticas en sus extremos.
- e. Verificar que estén lubricadas con un material de desmolde adecuado.
- f. **Revisar periódicamente los sistemas de fijación**, ya que el paso de los equipos empleados para descargar el concreto e incluso acciones involuntarias por parte de los operarios pueden aflojar las formaletas.

Por último, la separación de las formaletas será igual al ancho de carril conforme las especificaciones técnicas y se deben de marcar la ubicación de las juntas en las formaletas para que evitar retrasos en los siguientes procesos (ARGOS, 2016).

5.5.3.4. Transporte del Concreto

Este proceso involucra todas aquellas actividades necesarias para trasladar la mezcla de concreto desde la planta dosificadora hasta el sitio de pavimentación. Las principales actividades que se realizan en este punto, de manera general, son las siguientes: **carga del camión mezclador, revisión en planta, transporte al sitio de pavimentación, revisión en la obra, descarga** y regreso a la planta.

Antes de la salida del camión mezclador de la planta dosificadora de concreto, se verifica la consistencia mediante una evaluación cualitativa (Método de Hand-Squeeze) tal como se describe en ítem **3.6.1.1**.

Además, el contratista y la empresa proveedora de concreto deben de trabajar de manera conjunta para definir la programación de los despachos y la recepción del concreto, según el rendimiento de la cuadrilla de colocación y el plan de trabajo.

5.5.3.5. Colocación del Concreto

Una vez preparada la subrasante, la capa base y terminado la colocación de las formaletas. Se procede a las siguientes actividades para la colocación del concreto:

- Control de Calidad en Estado Fresco

La aceptación del concreto se realiza en base al peso unitario según ASTM C1688 como se describe en acápite 3.6.1.2., cuya tolerancia esta entre $\pm 80 \text{ kg/m}^3$ y además se verifica la consistencia del concreto (brillo metálico de la pasta que recubra todos los agregados).

Figura 45. Ensayo de Densidad del Concreto permeable según ASTM C 1688.



Fuente: Fuente propia, Lamsa Ingenieros Consultores, Managua, Junio 2017.

- Descarga del concreto

La descarga puede realizarse de dos maneras: lateral y frontal (**Ver Figura 46**), pero para una mejor distribución y disminuir la necesidad de mover el concreto se recomienda la descarga frontal. **Es importante designar a una persona de la cuadrilla para guiar los camiones en el proceso de descarga.**

Una mezcla de concreto permeable debe ser descargada completamente dentro de una hora después de la mezcla inicial, aunque, el uso de aditivos retardantes o aditivos de hidratación-estabilización pueden extender los tiempos de descarga para 1 ½ horas o más (ARGOS, 2016).

Figura 46. Descarga frontal y lateral del concreto permeable.



Fuente: a) ARGOS, Concreto Permeable-Aplicación, Colombia, s.f.
b) Sika, Concreto Permeable: Construcción, s.f.

Durante la descarga se debe tener cuidado de no verter el concreto a una altura mayor a 1 m. para evitar problemas de segregación de la mezcla. También se deben de minimizar el número de extensiones de la canaleta de descarga y procurar darle la mayor pendiente posible para facilitar el trabajo (INCYC, s.f.).

- **Distribución/Extensión.**

La extensión del concreto se realiza con rastrillos y palas, pero se debe manipular lo menos posible. ARGOS (2016) brinda las siguientes recomendaciones:

- **Descargar el concreto en áreas no muy extensas.** Para un mejor manejo del concreto, se debe de trabajar de tal forma que la descarga se realice en semicírculos consecutivos.
- **Prestar atención que la cuadrilla no pise el concreto.** Se debe trabajar de forma que el frente de avance en la descarga no se adelante mucho al frente de avance en la distribución del concreto.
- **Evitar los vaciados de forma discontinua.** Si se realizan se debe aislar al concreto aplicado con una junta, y con cuidado aplicar el concreto nuevo,

Figura 47. Colocación del concreto permeable.



Fuente: ARGOS, Concreto Permeable – Aplicación, Colombia, s.f.

Para asegurar una compactación adecuada y una superficie uniforme, **se coloca parte del concreto, de manera que tenga una altura por encima de la formaleta de $\frac{1}{2}$ a $\frac{3}{4}$ pulg.**, antes de pasar el rodillo principal (ACI 522 R-10, 2015).

5.5.3.6. Compactación

Una compactación adecuada del concreto es clave para lograr un óptimo desempeño y durabilidad de cualquier pavimento. De la misma manera que el pavimento convencional, el equipo de compactación se define en dependencia del tamaño, logística y requerimientos de cada proyecto. Los más usados para este fin son:

- Regla vibratoria,
- Rodillos vibratorios y
- Pavimentadoras de formaletas deslizantes.

Sin embargo, generalmente **la compactación se realiza con un rodillo giratorio (rodillo compactador principal o longitudinal) con un ancho adecuado, que es colocado sobre la formaleta y halado por dos personas en sentido de la descarga del concreto** para garantizar una superficie lisa y uniforme. **Ver Figura 48.**

Figura 48. Compactación de concreto permeable en parqueo de WALMART en la ciudad de Denver, Colorado.



Fuente: NRMCA, Aplicaciones del concreto permeable, s.f

En algunos lugares, como los bordes o esquinas requieren de una sobre compactación debido a que son los puntos más expuestos a la disgregación. Para ello, se realiza una compactación manual mediante un pisón, y se debe de finalizar con la bordeadora o con un rodillo pequeño manual (Ver **Figura 49**). Para garantizar que no se tengan irregularidades en las zonas apisonadas, se adiciona un poco de concreto en ellas y nuevamente se pasa el rodillo compactador principal.

Figura 49. Compactación del concreto permeable en zonas frágiles.



Fuente: ARGOS, Concreto Permeable – Aplicación, Colombia, s.f.

5.5.3.7. Corte de juntas

El corte se realiza con el concreto en estado fresco, inmediatamente después de la compactación; utilizando un equipo llamado “**cortador de juntas o pizza**”.

Figura 50. Corte de juntas en parqueo de WALMART en la ciudad de Denver, Colorado.



Fuente: NRMCA, Aplicaciones del concreto permeable, s.f

Según ARGOS (2016), para garantizar la funcionalidad de las juntas se debe realizar lo siguiente:

- Evitar distancias mayores a 4.6 m entre juntas.
- Las losas deben ser lo más cuadradas posible, manteniendo la relación longitud/ancho menor a 1.5.
- La profundidad del corte debe ser entre 1/4 y 1/3 del espesor de la losa.
- Las juntas de dilatación, control y contracción se deben definir de la misma forma que para un pavimento tradicional.
- **El corte se debe realizar en un sentido, siempre halando el rodillo y no empujándolo.**

5.5.3.8. Curado

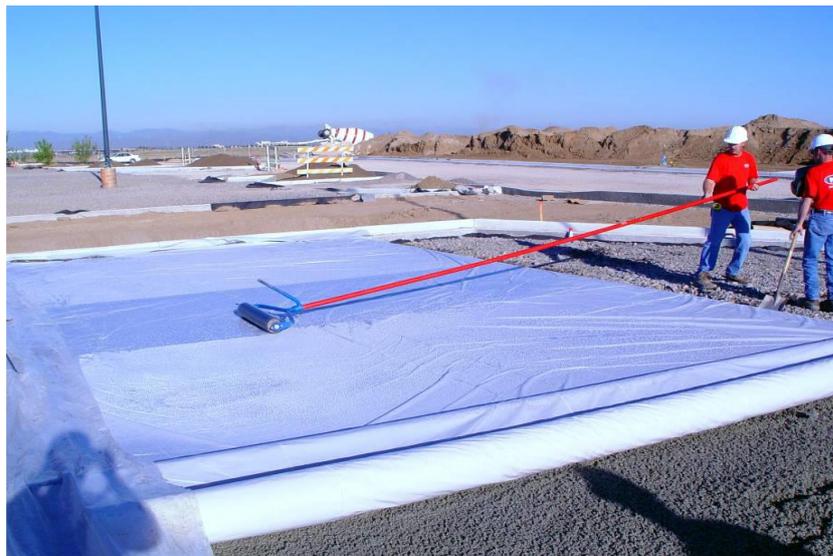
En el concreto permeable, es crucial un buen curado debido a su estructura de poros y a la poca cantidad de agua utilizada en su fabricación. Por tanto, es considerada como la tarea más importante en el proceso constructivo.

Para evitar la pérdida de humedad excesiva ARGOS (2016), afirma que “el descargue, la compactación, el corte de juntas y la protección del concreto con plástico para garantizar un curado adecuado, no deben tomar más de 20 minutos” (p. 11).

El curado se realiza inmediatamente después del corte de juntas, cubriendo la totalidad de la superficie de concreto con láminas plásticas (transparente de 0.15 mm de espesor) por un período de 7 días. Asimismo, para un curado satisfactorio, ARGOS (2016) indica que se debe realizar lo siguiente:

- El pavimento debe permanecer libre de todo tipo de tráfico durante el proceso de curado,
- Enrollar el plástico en el extremo inicial del tramo para ir cubriendo el pavimento a medida que la cuadrilla de colocación avanza,
- El plástico debe estar bien extendido y templado, de no ser así se pueden presentar marcas de diferentes coloraciones en el pavimento por la acumulación de humedad en las zonas donde hay arrugas.

Figura 51. Curado de concreto permeable en parqueo de WALMART en la ciudad de Denver, Colorado.



Fuente: NRMCA, Aplicaciones del concreto permeable, s.f

5.5.3.9. Post- Construcción

- **Control de Calidad en Estado Endurecido**

Según NRMCA (s.f.), previo a que el pavimento entre en operación o servicio y pueda cumplir con su finalidad (estructuralmente e hidrológicamente) es necesario realizar lo siguiente:

- a. A una edad no menor a 7 días, **extraer 3 núcleos por cada 450 m²** de superficie permeable (según ASTM C 42 y ASTM D 3665) con un diámetro no menor a 10 cm. Esto con el propósito de:
 - Inspeccionar visualmente los núcleos para validar que se tenga una losa con red de vacíos interconectados, en especial su parte inferior (no se haya sellado en su parte inferior).
 - Determinar la altura de cada núcleo, la densidad y el contenido de vacíos (según ASTM C 1754). Para verificar que el promedio de la altura de los 3 núcleos no sea menor a 0.5 cm ni mayor de 3.5 cm del espesor de losas especificado y ninguna lectura individual sea menor a 1.25 cm del espesor de losa especificado.
- b. **Evaluar la capacidad de infiltración del pavimento (según ASTM C 1701)**, para verificar que se cumpla con el valor objetivo (valor o tolerancias según las especificaciones) y tenerlo como referencia para evaluar necesidad y efectividad del mantenimiento.

- **Aceptación y Apertura al Tráfico**

Cuando el pavimento permeable se diseña como un sistema activo de mitigación (diseñado para tratar la escorrentía de lugares adyacentes); este debe entrar en servicio siempre y cuando todas las zonas alteradas que drenan al sistema se hayan sido estabilizadas con vegetación. El pavimento se abrirá al tráfico una vez que haya cumplido con 7 días de curado de manera ininterrumpida y que haya sido aceptado por el dueño del proyecto o contratista. En general, esto ocurre cuando se cumple con las especificaciones técnicas del proyecto.

Capítulo VI. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Los agregados basálticos de la cantera “El Portillo” de Veracruz (Managua), poseen características y propiedades aceptables para la fabricación de concretos con moderada permeabilidad y resistencia.

En general, estos agregados cumplen satisfactoriamente con las especificaciones de agregados para concreto de las ASTM C 33-08 (Especificación estándar para agregados de concreto).

Se diseñaron y fabricaron un total de 25 mezclas de concreto permeable utilizando agregado grueso de 1/2" y Material Cero como agregado fino, estudiándose 4 variables: la cantidad de cemento, la relación agua-cemento, el porcentaje de agregado fino y el porcentaje de vacíos.

Mediante los ensayos en estado fresco y endurecido realizados en las mezclas de concreto fabricadas, se verificó que la inclusión de mayor cantidad de agregado fino mejora notablemente la trabajabilidad y resistencia tanto a compresión como flexión del concreto. Sin embargo, el uso de finos por arriba del 15% disminuye considerablemente los vacíos y por tanto la permeabilidad de dicho concreto.

Las mezclas diseñadas con una relación agua-cemento de 0.34 y un porcentaje de finos del 20% presentan resistencias entre **2400 psi** y **3130 psi**, pero una reducida tasa de percolación por debajo de **2.0 mm/s**. En cambio, las mezclas fabricadas con menor relación agua-cemento (0.32) mantienen resistencias similares, pero mejoran la tasa de percolación hasta los **3.0 mm/s** aproximadamente.

La mezcla de concreto con los mejores resultados obtenidos en cuanto a permeabilidad y resistencia se refiere, es la mezcla **M 11´A**. Esa mezcla presentó valores promedios de tasa de infiltración y módulo de ruptura de 2.50 mm/s y 473 psi, respectivamente.

El consumo de cemento de la mezcla seleccionada es de 350 kg/metro cúbico de concreto, con una relación agua-cemento de 0.32, porcentaje de agregados finos del 15% y de vacíos medido de 14%. Por lo tanto, esta mezcla es la que se concluye como adecuada para su utilización como carpeta de rodadura únicamente en pavimentos permeables de bajo tráfico vehicular.

Con relación a la guía simplificada, se logró realizar una recopilación sintetizada de las principales actividades relacionadas con la instalación del concreto permeable como carpeta de rodadura en pavimentos urbanos de bajo tráfico vehicular. En este sentido, se toma en cuenta las consideraciones del ACI 522 R-10, así como las recomendaciones de empresas especialistas en la instalación de este concreto. Finalmente, se recalca que la aplicación de dicha guía depende de las características locales y la finalidad del proyecto.

6.2. Recomendaciones

- En concretos para carpetas de rodadura de pavimentos urbanos de bajo tráfico vehicular, se recomienda utilizar la mezcla M 11´A de este estudio, donde se alcanzó una resistencia a la flexión y permeabilidad promedio de 473 psi y 2.50 mm/s respectivamente.
- Para construcciones que no requieran altas solicitaciones mecánicas durante la vida de servicio, tales como: cunetas, capa base en pavimentos, andenes peatonales, ciclo vías, tapas en cajas de registro etc...., se recomienda la mezcla M-2, M-1´ y M-4´ de la investigación, con las cuales se obtuvo resistencias entre los 1600 y 2000 psi; y permeabilidades superiores a 3 mm/s.
- En futuras investigaciones evaluar el comportamiento de las mezclas utilizando agregados gruesos con TMN de 3/4" y 3/8"; para determinar la posibilidad de disminuir el uso de agregado fino, manteniendo la resistencia y mejorando la permeabilidad.
- Fabricar mezclas de concreto permeable utilizando Arena Motastepe como agregado fino para descubrir su influencia en las resistencias y permeabilidad del concreto o bien, verificando su comportamiento con la no inclusión de finos.
- Fabricar mezclas utilizando otros materiales como tiras de polipropileno y fibras de acero, para contrastar el comportamiento de la resistencia a flexión del concreto permeable.
- Antes de la colocación del concreto permeable, se recomienda capacitar a la cuadrilla de colocación, determinar las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo para verificar la necesidad de sistemas complementarios como pozos de infiltración, tuberías sistemas de recolección de agua o uso de geo - textiles.

Bibliografía

- ACI 212. (1991). *Chemical Admixtures for Concrete*. Obtenido de <http://en.fsajedi.ir/wp-content/uploads/2012/06/Chemical-admixtures-for-concrete-ACI-212.3R-91.pdf>
- ACI 318. (2014). *Requisitos para concreto estructural y cometarios*. Obtenido de <http://santiagovelez87.blogspot.com/2015/12/aci-318-14-espanol.html>
- ACI 522 R-10. (2015). *American Concrete Institute, Reporte de Concreto Poroso 2010*. (G. Traductor, Trad.) Recuperado el Mayo de 2015
- Alcaldía de Managua. (Noviembre de 2011). *Características Generales de los Distritos de Managua*. Managua, Nicaragua. Recuperado el 01 de Febrero de 2016
- Aoki, Y. (2009). *Development of Pervious Concrete*. Sydney. Recuperado el 28 de Junio de 2016, de <https://opus.lib.uts.edu.au/bitstream/10453/20311/2/02Whole.pdf>
- ARGOS. (01 de Diciembre de 2013). *Concreto de Color*. Colombia, Colombia. Obtenido de <http://blog.360gradosenconcreto.com/concreto-de-color/>
- ARGOS. (21 de 4 de 2015). *Caracterización física y química de los agregados*. Obtenido de http://argos.e-trainme.co/contenido/modulo_conferencias/presentaciones/archivos/41/caracterizaci%C3%B3nfisica_quimica_agregados.pdf
- ARGOS. (2 de Abril de 2016). Obtenido de *Concreto Permeable, Guia Práctica Constructiva*: <http://s3.amazonaws.com/argositebucket/plataforma360/documents/GuiaPracticaConstructivaConcretoPermeable.pdf>
- ARGOS. (19 de Febrero de 2016). *Concreto Permeable*. Colombia. Recuperado el 28 de Junio de 2016, de http://argos.e-trainme.co/contenido/modulo_conferencias/presentaciones/archivos/122/concreto_permeable1.pdf
- Arrieta, I. R., & Carro, M. I. (04 de Mayo de 2011). *Concreto Permeable: Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad*. Costa Rica. Recuperado el 10 de Junio de 2016, de revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/download/1982/1949
- ASOCRETO. (2010). *Tecnología del concreto*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/234779446/Tecnologia-Del-Concreto-Tomo-1>
- ASTM. (2003). *ASTM C 125*. Obtenido de <ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/.cuentasbajadas29092009/harenas.anterior/docs/LABORATORIO%20MATERIALES%20I/INFORMES%20DE%20LABORATORIO/ASTM%20C125%20TERMINOLOGIA.PDF>
- ASTM. (Noviembre de 2010). https://www.astm.org/SNEWS/ND_2010/c0949_nd10.html. Obtenido de American Society Testin Materials: https://www.astm.org/SNEWS/ND_2010/c0949_nd10.html
- ASTM C 192. (s.f.). <http://conred.gob.gt/www/>. Recuperado el 23 de Abril de 2016, de Coordinadora Nacional para la Reducción de desastres.: <http://www.conred.gob.gt/www/normas/NRD3/NTG41060.pdf>

- Banco Interamericano de Desarrollo. (21 de Agosto de 2012). <http://www.iadb.org>. Recuperado el 06 de Junio de 2016, de <http://www.iadb.org/es/noticias/anuncios/2012-08-21/certificacion-eficiencia-energetica-y-sostenibilidad,10088.html>
- Blanco, M., & Matuz, I. (s.f.). *Guía de laboratorio de materiales de construcción*. Managua, Nicaragua. Obtenido de UNI: [http://www.ftc.uni.edu.ni/pdf/guias_laboratorio/Guias_de_Laboratorio_de_Material es-de_Construccion.pdf](http://www.ftc.uni.edu.ni/pdf/guias_laboratorio/Guias_de_Laboratorio_de_Material_es-de_Construccion.pdf)
- Burton, M. C. (Diciembre de 2011). Pervious Concrete with Titanium Dioxide as a photocatalyst compound for a greener urban road environment. *PERVIOUS CONCRETE WITH TITANIUM DIOXIDE AS A PHOTOCATALYST*. Washintong. Recuperado el 25 de Junio de 2016, de http://www.dissertations.wsu.edu/Thesis/Fall2011/m_burton_112111.pdf
- CEMEX. (2014). Tipos de concretos. *Tipos de concretos*, (pág. 104). Managua.
- CFE. (2001). *Manual de Tecnología del Concreto*. México, D.F.: LIMUSA.
- Civilgeeks. (2011). Obtenido de Elementos contaminantes del agregado: <http://civilgeeks.com/2011/09/24/elementos-contaminantes-del-agregado/>
- Flores, C. F., & Pacompia, I. A. (2015). Diseño de Mezclas de Concreto Permeable con Adición de Tiras de Plástico para Pavimentos f'c 175 kg/cm² en la Ciudad de Puno. Puno, Perú. Recuperado el 25 de Junio de 2016, de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/unappuno/310>
- Florida Concrete & Products Association, Inc. (s.f.). Portland Cement Pervious Pavement Manual. Orlando, Florida. Obtenido de <http://www.ieua.org/wp-content/uploads/2014/09/Porous-Concrete-EPA-Manual.pdf>
- García, E. (Octubre de 2011). Control de escorrentías urbanas mediante pavimentos permeables: Aplicación en climas mediterráneos. Valencia. Recuperado el 29 de Abril de 2014, de <http://hdl.handle.net/10251/15383>
- Gómez, P. J. (s.f.). *Materiales de Construcción*. Recuperado el 2016, de <http://civilgeeks.com/2014/07/18/libro-de-materiales-de-construccion-ph-d-jorge-gomez/>
- Hwee Tan, K. e., Emiko, L., & Fang, T. (Octubre de 2015). Stell fiber-reinforced pervious concrete for urban roads. Singapore. Recuperado el 27 de Junio de 2016, de http://www.nset.org.np/usmca2015/session8/2_SN8-2_fullpaper_TanKH.pdf
- ICPA. (Agosto de 1998). Estado del arte en el uso de hormigones porosos. *CARRETERAS*, 52-62. Recuperado el 10 de Junio de 2016, de http://www.aacarreteras.org.ar/uploads/pdf/pdf_Revts/154.pdf
- ICPC. (1991). Recuperado el 20 de Marzo de 2019, de imcyc: <http://imcyc.com/biblioteca/ArchivosPDF/Pavimentos%20de%20Concreto/4%20Construcci%C3%B3n%20De%20Pavimentos%20De%20Concreto.pdf>
- IMCYC. (2011). *Concreto para técnicos de la construcción*. Mexico D.F.
- INCYC. (s.f.). *Guía Básica para la Construcción de Pavimentos de Concreto hidráulico* (Primera edición ed.). Managua, Nicaragua.

- Instituto del Cemento Portland Argentino. (Agosto de 1998). Estado del arte en el uso de hormigones porosos. *CARRETERAS*, 52-62. Recuperado el 10 de Junio de 2016, de http://www.aacarreteras.org.ar/uploads/pdf/pdf_Revts/154.pdf
- Kevern, J., Wang, K., Suleiman, M., & Schaefer, V. (Mayo de 2006). Obtenido de Pervious Concrete Construction: Methods and Quality Control: <http://www.rmc-foundation.org/images/PCRC%20Files/Construction%20Techniques/Pervious%20Concrete%20Construction%20-%20Methods%20and%20Quality%20Control.pdf>
- Meiniger, R. (August de 1988). No-Fines Pervious Concrete for Paving. *No-Fines Pervious Concrete for Paving*. Recuperado el 29 de Junio de 2016, de <http://www.rmc-foundation.org/images/PCRC%20Files/Applications%20&%20Case%20Studies/No-Fines%20Pervious%20Concrete%20for%20Paving-Meiniger.pdf>
- Montenegro, J. (2011). Obtenido de Elementos contaminantes del agregado: <http://civilgeeks.com/2011/09/24/elementos-contaminantes-del-agregado/>
- Mulligan, A. M. (2005). Attainable Compressive Strength of Pervious Concrete Paving Systems. Orlando, Florida, Estados Unidos. Obtenido de <http://www.rmc-foundation.org/images/PCRC%20Files/Structural%20Design%20&%20Properties/Attainable%20Compressive%20Strength%20of%20Pervious%20Concrete%20Paving%20Systems.pdf>
- Naik, T. R. (Mayo de 1997). Concrete durability as influenced by density and/or porosity. Milwaukee, Winconsin. Recuperado el 17 de Junio de 2016, de <https://www4.uwm.edu/cbu/Papers/1997%20CBU%20Reports/REP-298.pdf>
- Neithalath, N. (Mayo de 2004). <https://www.researchgate.net>. Recuperado el 05 de Junio de 2016, de https://www.researchgate.net/profile/Narayanan_Neithalath/publication/27233663_Development_and_characterization_of_acoustically_efficient_cementitious_materials/links/00b495385880658a97000000.pdf
- NRMCA. (s.f.). <http://www.nrmca.org/>. Obtenido de CIP 38- Concreto Permeable: <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/38p.pdf>
- NRMCA. (s.f.). *Pervious Concrete Pavement Maintenance Guidelines*. Recuperado el 06 de 08 de 2016, de National Ready Mixed Concrete Association: <https://www.chaneyenterprises.com/files/productdocs/Pervious-Concrete-Maintenance-Guidelines.pdf>
- Ong, S. K., Wang, K., Ling, Y., & Shi, G. (Abril de 2016). Pervious Concrete Physical Characteristics and Effectiveness in Stormwater Pollution Reduction. Iowa. Recuperado el 28 de Junio de 2016, de http://www.intrans.iastate.edu/research/documents/research-reports/pervious_concrete_in_stormwater_pollution_reduction_w_cvr.pdf
- Onstenk, E., Aguado, A., Eicksehen, E., & Josa, A. (s.f.). Laboratory study of porous concrete for its use as top-layer of concrete pavements. Recuperado el 17 de Junio de 2016
- PCA. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Obtenido de Scrib: <https://es.scribd.com/doc/189238711/Libro-Diseno-y-control-de-mezclas-de-concreto-PCA-1>

- Pérez, I. D. (Agosto de 2010). Estudio experimental de concretos permeables con agregados andesíticos. Distrito Federal, México. Recuperado el 30 de Abril de 2015, de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/3443/1/perezamos.pdf>
- Rivera, G. A. (s.f.). *Concreto simple*. Obtenido de Civilgeeks: <http://civilgeeks.com/2013/08/28/libro-de-tecnologia-del-concreto-y-mortero-ing-gerardo-a-rivera-l/>
- Rizvi, R. (2009). Incorporating Recycled Concrete Aggregate in Pervious Concrete Pavements. Recuperado el 17 de Junio de 2016, de <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2009/pdf/Rizvi.pdf>
- Rodas, N. I. (Agosto de 2012). Desarrollo y uso de bloques de concreto permeable en senderos ecológicos. Guatemala, Guatemala. Recuperado el 02 de Febrero de 2016, de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3428_C.pdf
- Saucedo, A. (Agosto de 2010). Concreto hidráulico permeable, una alternativa para la recarga de los mantos acuíferos del valle de México. Mexico. Recuperado el 30 de Abril de 2015, de <http://132.248.52.100:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/529/A1.pdf?sequence=1>
- SOLANO, G. E. (2014). Recuperado el 19 de Marzo de 2018, de civilgeeks: <https://civilgeeks.com/2015/05/31/guia-de-procesos-constructivos-de-una-via-en-pavimento-flexible/>
- Tennis, P., Leming, M., & Akers, D. (2004). Pervious Concrete Pavements. Recuperado el 16 de Junio de 2016, de <http://www.rmcfoundation.org/images/PCRC%20Files/Applications%20&%20Case%20Studies/Pervious%20Concrete%20Pavement%20On%20Slope.pdf>
- Universidad Continental. (s.f.). *Concretos Especiales*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/309850593/CONCRETOS-ESPECIALES>
- Universidad Técnica de Machala. (01 de Junio de 2015). CONCRETO POROSO: Constitución, Variables Influyentes y Protocolos para su caracterización. *Cumbres, Revista Científica, I*, 65-70. Recuperado el 10 de Junio de 2016, de https://issuu.com/jorgemaza85/docs/revista_cumbres_-_edicion_digital_j
- Vigil S., M. E. (Mayo de 2012). Diseño, proceso constructivo y evaluación post construcción de un pavimento rígido de concreto permeable. San Salvador, El Salvador. Recuperado el 02 de Febrero de 2016, de <http://ri.ues.edu.sv/3929/1/Dise%C3%B1o,%20proceso%20constructivo%20y%20evaluaci%C3%B3n%20post%20construccci%C3%B3n%20de%20un%20pavimento%20r%C3%ADgido%20de%20concreto%20permeable.pdf>
- Wanielista, M., & Chopra, M. (Junio de 2007). Obtenido de Construction and Maintenance Assessment of Pervious Concrete Pavements: <http://www.rmcfoundation.org/images/Construction%20and%20Maintenance%20Assessment.pdf>

ANEXOS

Anexo 1:
Tablas consultadas

Anexo 1.1. Clasificación de los agregados según su tamaño.

Tabla A-1. Clasificación de agregados según el tamaño de sus partículas (Tabla 2.6, Concreto simple, Ing. Gerardo Rivera)

TAMAÑO EN mm.	DENOMINACIÓN MÁS COMÚN	CLASIFICACIÓN	USO COMO AGREGADO DE MEZCLAS
< 0,002	Arcilla	Fracción muy fina	No recomendable
0,002 – 0,074	Limo	Fracción fina	No recomendable
0,074 – 4,76 #200 - #4	Arena	Agregado fino	Material apto para mortero o concreto
4,76 – 19,1 #4 – ¾"	Gravilla	Agregado grueso	Material apto para concreto
19,1 – 50,8 ¾" – 2"	Grava		Material apto para concreto
50,8 – 152,4 2" – 6"	Piedra		
> 152,4 6"	Rajón, Piedra bola		Concreto ciclópeo

Anexo 1.2. Clasificación de agregados según su densidad.

Tabla A-2. Clasificación de agregados según su densidad. (Tabla 3, Materiales para el concreto, Universidad del Valle)

CLASIFICACIÓN DEL AGREGADO	DENSIDAD APROXIMADA (KG/M³)		VARIEDADES MÁS COMUNES DE LOS AGREGADOS	EJEMPLO DE USO
	Del agregado	Del concreto		
Liviano	460 – 1300	1350 – 1000	Pizarras expandidas, esquistos, escoria, arcilla.	Concretos livianos, estructurales
		500 - 1350	Piedra pómez, diatomita, icopor.	Concreto para aislamiento
Normal	1300 - 2000	2000 - 2600	Arena, grava, piedra triturada, Clinker, escoria de fundición	Estructuras de concreto en general.
Pesado	2000 – 5600	Mayor a 2600	Barita, hierro, limonita, magnetita, limadura de acero, hematita	Concreto para macizos de anclaje, para protección contra radiaciones.

Anexo 1.3. Gravedad específica de algunas rocas.

Tabla A-3. Gravedad específica de algunas rocas (Tabla 4.23, Tecnología del concreto y del mortero, Diego Sánchez de Guzmán)

Grupo de roca	Intervalo de densidad
Basáltico	2.6 – 3.0
Pedernalino	2.4 – 2.6
Gábrico	2.7 – 3.4
Granílico	2.6 – 3.0
Arenisco	2.6 - 2.9
Homofélsico	2.7 – 3.0
Calizo	2.5 - 2.8
Porfirítico	2.6 - 2.9
Cuarzoso	2.6 - 2.7
Esquistoso	2.4 - 2.6

Anexo 1.4. Proporciones típicas de materiales en mezclas de concreto permeable.

Tabla A-4. Rangos típicos* de proporciones de materiales en concreto permeable+ (Tabla 6.2 ACI 522R-10)

Descripción	Proporciones, lb. /yd ³ (kg/m ³)
Materiales cementantes	450 A 700 (270 a 415)
Agregado	2000 A 2500 (1190 a 1480)
W/cm, en masa	0,26 A 0,45
Relación agregado : cemento , en masa	4 A 4:1
Multa: relación agregado grueso, de la masa	0 A 1:1

* Estas proporciones se dan sólo para información. Mezcla diseño con éxito dependerá de las propiedades de los materiales utilizados y particular debe ser probado en el juicio los lotes para establecer proporciones adecuadas y determinar comportamiento esperado. Los productores de hormigón puede tener proporciones de mezcla de concreto anterior optimizado para el rendimiento con materiales locales. En tales casos, esos porcentajes son preferibles.

+ Aditivos químicos retardadores, especialmente los estabilizadores y la hidratación, también se usan comúnmente, a las dosis recomendadas por el fabricante. Uso de materiales cementantes suplementarios, como cenizas volantes y escorias, es común también.

‡ Porcentajes mayores han sido utilizados, pero importantes reducciones de resistencia y durabilidad.

§ Adición de agregado fino, disminuirá el contenido de vacío y aumentara la resistencia.

Anexo 1.5. Requisitos de granulometría para agregados gruesos de peso normal según ASTM C33-08.

Tabla A-5. Límites granulométricos para agregado grueso (Tabla 2, Especificación ASTM C33-08).

Size Number	Nominal Size (Sieves with Square Openings)	Amounts Finer than Each Laboratory Sieve (Square-Openings), Mass Percent													
		100 mm (4 in.)	90 mm (3½ in.)	75 mm (3 in.)	63 mm (2½ in.)	50 mm (2 in.)	37.5 mm (1½ in.)	25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (¾ in.)	12.5 mm (½ in.)	9.5 mm (¾ in.)	4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)	300 µm (No.50)
1	90 to 37.5 mm (3½ to 1½ in.)	100	90 to 100	...	25 to 60	...	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...	...
2	63 to 37.5 mm (2½ to 1½ in.)	...	...	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...	...
3	50 to 25.0 mm (2 to 1 in.)	...	...	...	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...
357	50 to 4.75 mm (2 in. to No. 4)	...	...	...	100	95 to 100	...	35 to 70	...	10 to 30	...	0 to 5	...	...	...
4	37.5 to 19.0 mm (1½ to ¾ in.)	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...
467	37.5 to 4.75 mm (1½ in. to No. 4)	...	...	...	...	100	95 to 100	...	35 to 70	...	10 to 30	0 to 5	...	...	...
5	25.0 to 12.5 mm (1 to ½ in.)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 10	0 to 5	...	...	...	...
56	25.0 to 9.5 mm (1 to ¾ in.)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	40 to 85	10 to 40	0 to 15	0 to 5	...	...	...
57	25.0 to 4.75 mm (1 in. to No. 4)	...	...	...	...	...	100	95 to 100	...	25 to 60	...	0 to 10	0 to 5	...	...
6	19.0 to 9.5 mm (¾ to ¾ in.)	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 15	0 to 5	...	...	...
67	19.0 to 4.75 mm (¾ in. to No. 4)	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	...	20 to 55	0 to 10	0 to 5	...	...
7	12.5 to 4.75 mm (½ in. to No. 4)	...	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	40 to 70	0 to 15	0 to 5	...	...
8	9.5 to 2.36 mm (¾ in. to No. 8)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 to 100	10 to 30	0 to 10	0 to 5	...
89	9.5 to 1.18 mm (¾ in. to No. 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	5 to 30	0 to 10	0 to 5
9 ^A	4.75 to 1.18 mm (No. 4 to No. 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 to 100	10 to 40	0 to 10	0 to 5

^A Size number 9 aggregate is defined in Terminology C 125 as a fine aggregate. It is included as a coarse aggregate when it is combined with a size number 8 material to create a size number 89, which is a coarse aggregate as defined by Terminology C 125.

Anexo 1.6. Requisitos de granulometría para agregados finos de peso normal según ASTM C33-08

Tabla A-6. Límites granulométricos para agregado fino
(Numeral 6.1, Adoptado de Especificación ASTM C33-08).

Sieve (Especificación E 11)	Percent Passing
9.5 mm(3/8 in)	100
4.75 mm (No.4)	95 to 100
2.36 mm (No.8)	80 to 100
1.18 mm (No. 16)	50 to 85
600 μ m (No. 30)	25 to 60
300 μ m (No. 50)	5 to 30
150 μ m (No. 100)	0 to 10

Anexo 1.7. Límites para sustancias nocivas y requisitos de propiedades físicas del agregado grueso para hormigón peso normal según ASTM C33-08.

Tabla A-7. Límites para sustancias nocivas y requisitos de propiedades físicas del agregado grueso.

NOTE 1—See Fig. 1 for the location of the weathering regions and Note 9 for guidance in using the map. The weathering regions are defined as follows:
 (S) Severe Weathering Region—A cold climate where concrete is exposed to deicing chemicals or other aggressive agents, or where concrete may become saturated by continued contact with moisture or free water prior to repeated freezing and thawing.
 (M) Moderate Weathering Region—A climate where occasional freezing is expected, but where concrete in outdoor service will not be continually exposed to freezing and thawing in the presence of moisture or to deicing chemicals.
 (N) Negligible Weathering Region—A climate where concrete is rarely exposed to freezing in the presence of moisture.

Class Designation	Type or Location of Concrete Construction	Maximum Allowable, %						
		Clay Lumps and Friable Particles	Chert (Less Than 2.40 sp gr SSD)	Sum of Clay Lumps, Friable Particles, and Chert (Less Than 2.40 sp gr SSD)	Material Finer Than 75-µm (No. 200) Sieve	Coal and Lignite	Abrasion ^A	Magnesium Sulfate Soundness (5 cycles) ^B
Severe Weathering Regions								
1S	Footings, foundations, columns and beams not exposed to the weather, interior floor slabs to be given coverings	10.0	...	...	1.0 ^C	1.0	50	...
2S	Interior floors without coverings	5.0	...	...	1.0 ^C	0.5	50	...
3S	Foundation walls above grade, retaining walls, abutments, piers, girders, and beams exposed to the weather	5.0	5.0	7.0	1.0 ^C	0.5	50	18
4S	Pavements, bridge decks, driveways and curbs, walks, patios, garage floors, exposed floors and porches, or water-front structures, subject to frequent wetting	3.0	5.0	5.0	1.0 ^C	0.5	50	18
5S	Exposed architectural concrete	2.0	3.0	3.0	1.0 ^C	0.5	50	18
Moderate Weathering Regions								
1M	Footings, foundations, columns, and beams not exposed to the weather, interior floor slabs to be given coverings	10.0	...	...	1.0 ^C	1.0	50	...
2M	Interior floors without coverings	5.0	...	...	1.0 ^C	0.5	50	...
3M	Foundation walls above grade, retaining walls, abutments, piers, girders, and beams exposed to the weather	5.0	8.0	10.0	1.0 ^C	0.5	50	18
4M	Pavements, bridge decks, driveways and curbs, walks, patios, garage floors, exposed floors and porches, or water-front structures subject to frequent wetting	5.0	5.0	7.0	1.0 ^C	0.5	50	18
5M	Exposed architectural concrete	3.0	3.0	5.0	1.0 ^C	0.5	50	18
Negligible Weathering Regions								
1N	Slabs subject to traffic abrasion, bridge decks, floors, sidewalks, pavements	5.0	...	...	1.0 ^C	0.5	50	...
2N	All other classes of concrete	10.0	...	...	1.0 ^C	1.0	50	...

^A Crushed air-cooled blast-furnace slag is excluded from the abrasion requirements. The rodded or jigged bulk density (unit weight) of crushed air-cooled blast-furnace slag shall be not less than 1120 kg/m³ (70 lb/ft³). The grading of slag used in the bulk density (unit weight) test shall conform to the grading to be used in the concrete. Abrasion loss of gravel, crushed gravel, or crushed stone shall be determined on the test size or sizes most nearly corresponding to the grading or gradings to be used in the concrete. When more than one grading is to be used, the limit on abrasion loss shall apply to each.

^B The allowable limits for soundness shall be 12% if sodium sulfate is used.

^C This percentage under either of the following conditions: (1) is permitted to be increased to 1.5 if the material is essentially free of clay or shale; or (2) if the source of the fine aggregate to be used in the concrete is known to contain less than the specified maximum amount passing the 75-µm (No. 200) sieve (Table 1) the percentage limit (L) on the amount in the coarse aggregate is permitted to be increased to $L = 1 + [(P)/(100 - P)](T - A)$, where P = percentage of sand in the concrete as a percent of total aggregate, T = the Table 1 limit for the amount permitted in the fine aggregate, and A = the actual amount in the fine aggregate. (This provides a weighted calculation designed to limit the maximum mass of material passing the 75-µm (No. 200) sieve in the concrete to that which would be obtained if both the fine and coarse aggregate were supplied at the maximum tabulated percentage for each of these ingredients.)

Anexo 1.8. Coeficiente de permeabilidad "k" de distintos tipos de suelos y métodos adecuados para su medición.

Tabla A-8. Valores de Coeficiente de permeabilidad "k" de distintos tipos de suelos.

		"K" en cm. por seg. (escala log.)											
		10 ²	10 ¹	1.0	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
Propiedad de Drenaje		Buen Drenaje					Mal Drenaje			Prácticamente Impermeables			
	Aplicación en Presas de Tierra y Diques	Secciones Permeables de Presas y Diques						Secciones Impermeables de Presas de Tierra y Diques					
Tipos de Suelos		Grava Limpia	Arenas Limpias Mezclas de Grava y Arena Limpias				Arenas muy Finas, Limos Orgánicos e Inorgánicos, Mezclas de Arena, Limo y Arcilla, Morena Glacial, Depósitos de Arcilla Estratificados, etc.				Suelos "Impermeables", v.g. Arcillas Homogéneas abajo de la zona de intemperismo.		
								"Suelos impermeables" que han sido modificados por los efectos de la vegetación y del intemperismo.					
Determinación Directa del coeficiente de permeabilidad		Prueba Directa de los Suelos en su Posición Original (v.g. Pozos de bombeo) Confiable si se conduce apropiadamente. Requiere Considerable Experiencia.											
		Permeámetro de Carga Constante Requiere poca Experiencia											
						Confiable Requiere poca Experiencia		Permeámetro de Carga Variable		Rango de Permeabilidad inestable Requiere Mucha Experiencia para una Correcta Interpretación		Aceptable Requiere Considerable Experiencia	
Determinación Indirecta del coeficiente de permeabilidad		Cálculo de la distribución granulométrica, (v.g. Fórmula de A. Hazen) Aplicable únicamente a Gravas y Arenas Limpias sin cohesión											
								Prueba Horizontal de Capilaridad Requiere Muy Poca Experiencia. Especialmente Útil para la Prueba Rápida de un gran Número de Muestras en el Campo sin Equipo de Laboratorio				Cálculos de los Pruebas de Consolidación. Equipo de Laboratorio Costoso. Requiere considerable experiencia.	

Anexo 2:
Fichas Técnicas

Anexo 2.1. Ficha Técnica del Cemento Tipo GU

							
INFORME DE RESULTADOS							
Fecha Emisión: 10 de Marzo 2017							
Producto: Cemento CANAL Clasificación: Tipo GU Norma de Producción: NTON 12 006 11							
Norma de producción: NTON 12 006-11 Norma bajo la cual se realizan los ensayos de Resistencia de a la Compresión: ASTM C-109 Norma bajo la cual se realizan los análisis químicos: ASTM C114 Método mediante el cual se realizan los análisis químicos: XRF Fecha de producción: Febrero 2017							
Ensayos Físicos							
Finezas				Fraguados			
Tamiz 325(%Ret.)	11.00			Vicat Inicial (min.)	195	NTON 12 006 11 min, 45	
Blaine(cm ² /gr.)	3,490			Vicat Final (min.)	260	max, 420	
Resistencia a la Compresión (MPa) (MPa) NTON 12 006 11				Ensayos Varios			
1 Dia			-----	Exp. Autoclave(%)	0.02	NTON 12 006 11 0.8	
3 Dias	14	min, 10		Flujo de Agua(%)	105.0	-----	
7 Dias	18	min, 17		Peso específico, kg/m ³	2.9		
28 Dias	29	min, 25		Peso volumétrico, kg/m ³	1.12		
Este informe fue firmado electrónicamente por:				Ing. Evangelina López Davila Gerencia de Gestión de Aseguramiento de la Calidad y Medio Ambiente CEMEX NICARAGUA			

Anexo 2.2. Ficha Técnica del Aditivo Sika ViscoFlow®-10MX

Construcción

Hoja Técnica
Edición 0204201202
Identificación No. 428730
Sika ViscoFlow®-10 MX

Sika ViscoFlow®-10 MX

Aditivo súper-plastificante de alto desempeño y retenedor de trabajabilidad para concreto.

Descripción	<p>Sika ViscoFlow®-10 MX es un aditivo para concreto específicamente desarrollado para incrementar el tiempo de trabajabilidad. Está diseñado para producir concretos que necesitan mantener la fluidez por varias horas.</p> <p>Cumple con la norma ASTM-C-494 tipo F a las edades de 3, 7 y 28 días y con la norma ASTM-C-1017 tipo I.</p>
Usos	<ul style="list-style-type: none">■ Transporte del concreto a lo largo de grandes distancias.■ Procesos constructivos que requieran mucho tiempo para la colocación y compactación del concreto.■ Para concretos a suministrarse en obras ubicadas en lugares remotos o de elevado congestionamiento de tránsito.■ Transporte y colocación del concreto en condiciones medio ambiental es muy rigurosas, baja humedad relativa, muy alta velocidad de viento y temperaturas extremas en el concreto.■ Para elevar la permanencia del concreto en tuberías y cañerías durante el bombeo.■ Con el uso de cementos de elevada reactividad inicial, como por ejemplo ricos en aluminato tricálcico (AC3), de elevada finura o de alta resistencia.
Ventajas	<p>Sika ViscoFlow®-10 MX es un aditivo que basa su accionar en una combinación de efectos: eléctricos, de adsorción y de repulsión estérica, de tal manera que las partículas sólidas son efectivamente dispersadas y un alto nivel de fluidificación puede mantenerse en el tiempo con menor contenido de agua.</p> <ul style="list-style-type: none">■ Sika ViscoFlow®-10 MX es un reductor de agua de alto rango por lo que no es necesario utilizar fluidificantes adicionales.■ El uso de ViscoFlow®-10 MX permite la producción de concretos de alto desempeño.■ Efectividad en concretos con un amplio rango de relaciones agua/cemento (a/c) y temperaturas.■ Provee concretos de mayor estabilidad y tiempo de trabajabilidad que aquellos elaborados con dispersantes y reductores de agua convencionales.■ Compatibilidad con otros aditivos Sika.■ Retiene la trabajabilidad por más tiempo manteniendo el desarrollo de las resistencias iniciales.■ Se puede aplicar a cementos de alta reactividad, los cuales pueden conducir a una elevada rigidez inicial.■ No es necesario recurrir a un acelerante para activar la hidratación ya que no modifica sustancialmente el desarrollo del fraguado (una vez que pasa el efecto de retención de trabajabilidad).■ Se puede utilizar en estructuras de concreto armado y pretensado ya que Sika ViscoFlow®-10 MX no contiene cloruros ni otro componente que promueva la corrosión del acero.
Modo de Empleo	<ul style="list-style-type: none">■ ViscoFlow®-10 MX se añade en el agua de mezcla o sobre la masa del concreto. Para asegurar la máxima eficacia se recomienda ampliar el tiempo de mezclado medio minuto más por cada metro cúbico de concreto.■ El ViscoFlow®-10 MX puede usarse en sinergia con otros aditivos Sika, se recomienda apoyarse en el equipo técnico Sika.■ No debe agregarse al cemento seco.

1Sika ViscoFlow®-10 MX 1/2

Dosificación	Entre 4,0 y 16,0 ml/kg de cemento (0,44% y 1,76% del peso del cemento) dependiendo del tiempo que se requiera extender la trabajabilidad.
Datos Técnicos	Tipo: aditivo líquido Color: amarillo turbio Densidad: 1,10 kg/l aprox.
Precauciones	La dosis y el diseño de mezcla óptimo deberán determinarse mediante ensayos previos con los materiales y las condiciones de la obra. Si bien la mayoría de los aditivos de Sika compatibles entre sí, cuando se usen sinergias siempre deberán realizarse ensayos de laboratorio previos para asegurar el cumplimiento de las especificaciones del concreto.
Medidas de Seguridad	En caso de contacto con la piel, lave la zona afectada inmediatamente con agua y jabón. En caso de contacto con los ojos lávelos en seguida con agua abundante durante 15 minutos y acuda al médico. En caso de ingestión no provoque el vómito y solicite ayuda médica. Para mayor información y en caso de derrames consulte la hoja de seguridad.
Almacenamiento	Seis (6) meses en su empaque original, en lugar fresco, bajo techo y protegido de la humedad.
Advertencia	Toda la información contenida en este documento y en cualquiera otra asesoría proporcionada, fueron dadas de buena fe, basadas en el conocimiento actual y la experiencia de Sika Mexicana de los productos siempre y cuando hayan sido correctamente almacenados, manejados y aplicados en situaciones normales y de acuerdo a las recomendaciones de Sika Mexicana. La información es válida únicamente para la(s) aplicación(es) y el(los) producto(s) a los que se hace expresamente referencia. En caso de cambios en los parámetros de la aplicación, como por ejemplo cambios en los sustratos, o en caso de una aplicación diferente, consulte con el Servicio Técnico de Sika Mexicana previamente a la utilización de los productos Sika. La información aquí contenida no exonera al usuario de hacer pruebas sobre los productos para la aplicación y la finalidad deseadas. En todo caso referirse siempre a la última versión vigente de la Hoja Técnica del Producto. Los pedidos son aceptados en conformidad con los términos de nuestras condiciones generales vigentes de venta y suministro.

Para dudas o aclaraciones:

Sika responde
01 800 123 SIK
7 4 5 2
soporte.tecnico@mx.sika.com
sika.responde@mx.sika.com
www.sika.com.mx



Anexo 3:
Caracterización de agregados

Anexo 3.1. Muestreo de los agregados

El muestreo de los agregados se realizó en el plantel “El Portillo” de PROINCO. Se realizó conforme a la norma **ASTM D 75-03 “Practica estándar para el muestreo de agregados”**.

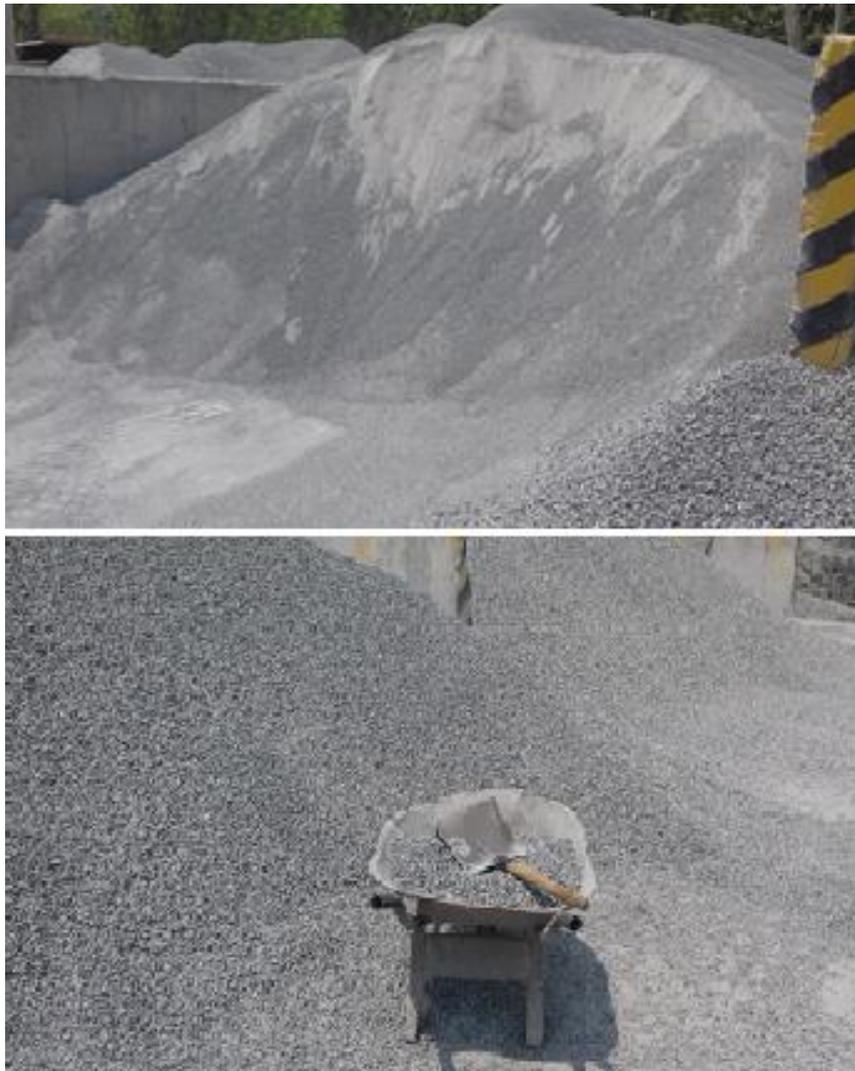


Figura A-1. Apilamiento de Agregado Grueso y Muestreo de Agregado Grueso, según ASTM D 75.

Fuente: Fotografía tomada en el plantel “El Portillo”, Veracruz-Nindirí, Marzo 2016.

Anexo 3.2. Reducción de muestras de agregados a tamaños de prueba.

La reducción de las muestras a tamaños de prueba se realizó por medio de un divisor mecánico (Método A) de la norma “**ASTM C 702-98: Práctica Estándar para Reducción de las Muestras de Agregado a Tamaños de Prueba**”.



Figura A–2. Reducción de muestras a tamaño de prueba según ASTM C 702.

Fuente: Fotografía tomada en Lab. Lamsa Ingenieros Consultores, Managua, Marzo2017.

Anexo 3.3. Granulometría de los agregados

Anexo 3.3.1. Análisis granulométrico del agregado grueso (Muestra 1).

Muestra 1							
Granulometría del Material					ASTM C 33-08 (% Pasa)		
Tamices	Peso retenido en cada tamiz, Gr.	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% que pasa	N° de Tamaño		7
					Lím. Inferior	Lím. Superior	Parámetro
1 1/2"	0	0 %	0 %	100 %	-	-	
1"	0	0 %	0 %	100 %	-	-	
3/4"	0	0 %	0 %	100 %	100	100	Cumple
1/2"	39.9	2 %	2 %	98 %	90	100	Cumple
3/8"	698.25	35 %	37 %	63 %	40	70	Cumple
No. 4	957.6	48 %	85 %	15 %	0	15	Cumple
No. 8	259	13 %	98 %	2 %	0	5	Cumple
Pasa No.8	37	2 %	100 %	0 %			
Suma	1,993	100 %					
Módulo de Finura							
$M.F = \left[\frac{\sum \% \text{ Ret. Acomulado desde Tamiz } 3'' \text{ a No. } 100}{100} \right]$					6.22		

Anexo 3.3.2. Curva granulométrica del Agregado grueso (Muestra 1).

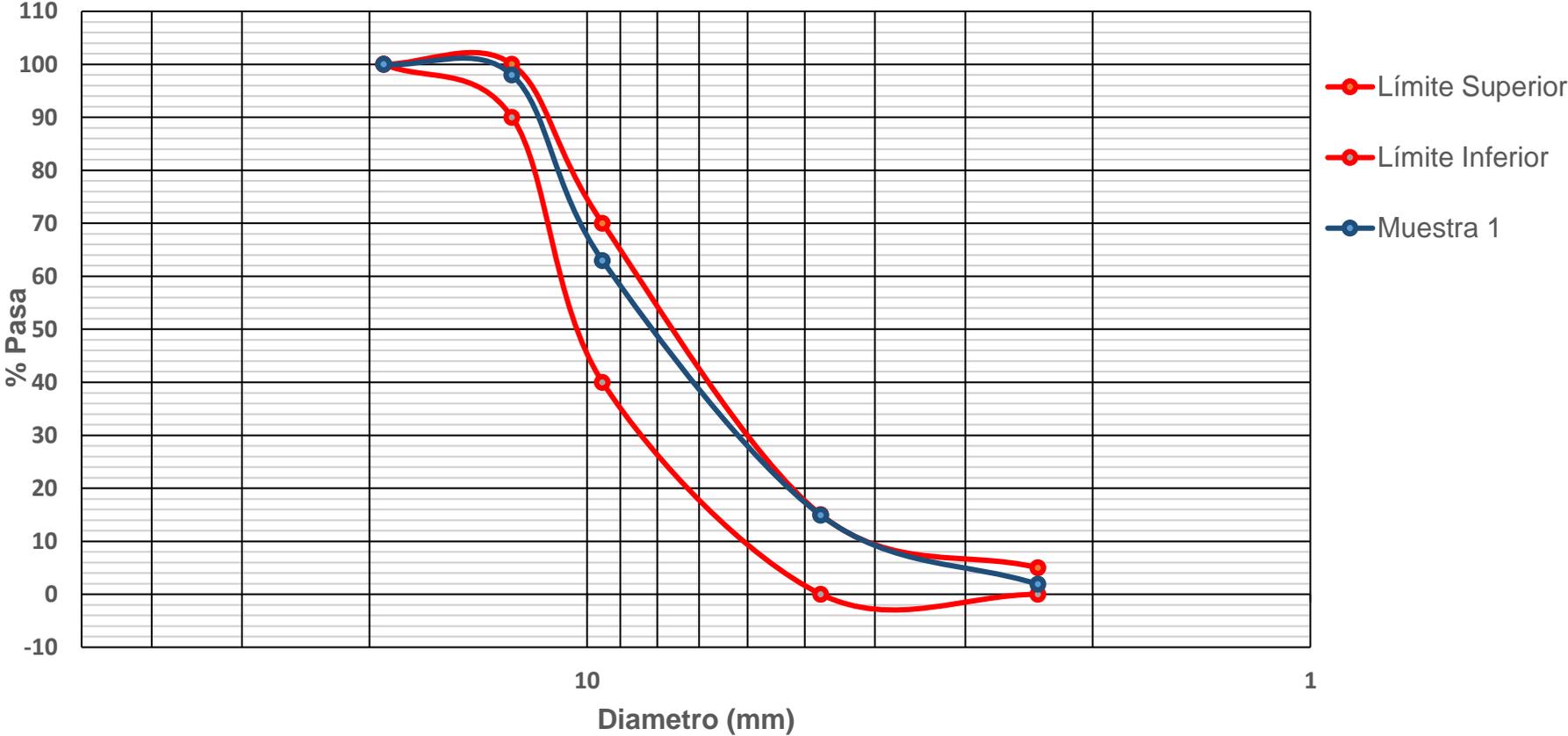


Figura A-3. Curva granulométrica de muestra 1 de agregado grueso

Anexo 3.3.3. Análisis granulométrico del agregado grueso (Muestra 2).

Muestra 2							
Granulometría del Material					ASTM C 33-08 (% Pasa)		
Tamices	Peso retenido en cada tamiz	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% que pasa	N° de Tamaño		7
					Límite Inferior	Límite Superior	Parámetro
1 1/2"	0	0 %	0 %	100 %	-	-	
1"	0	0 %	0 %	100 %	-	-	
3/4"	0	0 %	0 %	100 %	100	100	Cumple
1/2"	59.83	3 %	3 %	97 %	90	100	Cumple
3/8"	735.79	37 %	40 %	60 %	40	70	Cumple
No. 4	921.51	46 %	86 %	14 %	0	15	Cumple
No. 8	233.78	12 %	98 %	2 %	0	5	Cumple
Pasa No.8	43	2 %	100 %	0 %			
Suma	1,994	100 %					
Módulo de Finura							
$M.F = \left[\frac{\sum \% Ret. Acomulado desde Tamiz 3" a No. 100}{100} \right]$						6.27	

Anexo 3.3.4. Curva granulométrica del Agregado grueso (Muestra 2).

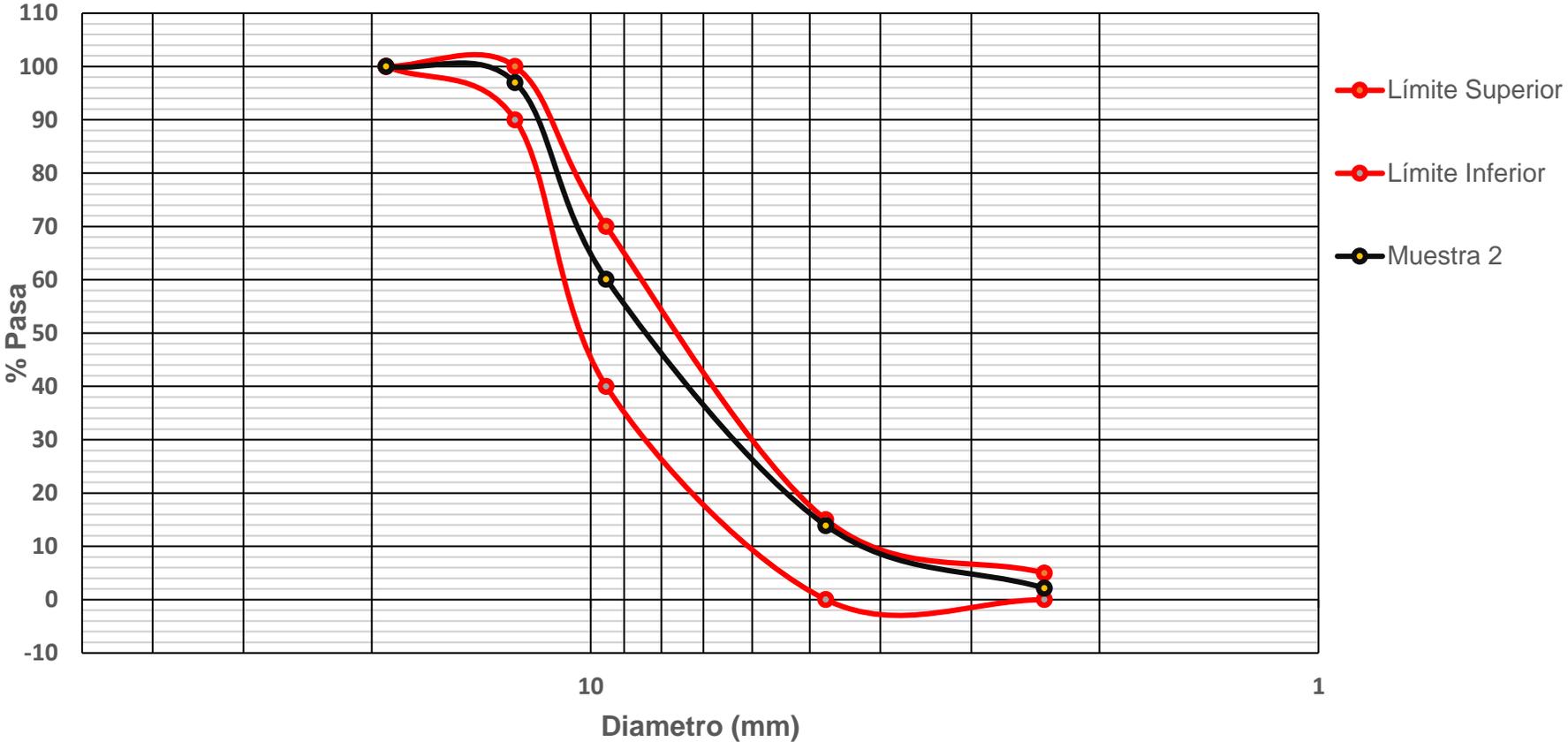


Figura A-4. Curva granulométrica de muestra 2 de agregado grueso.

Anexo 3.3.5. Análisis granulométrico del agregado grueso (Muestra 3).

Muestra 3							
Granulometría del Material					ASTM C 33-08 (% Pasa)		
Tamices	Peso retenido en cada tamiz	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% que pasa	N° de Tamaño		7
					Límite Inferior	Límite Superior	Parámetro
1 1/2"	0	0 %	0 %	100 %	-	-	
1"	0	0 %	0 %	100 %	-	-	
3/4"	0	0 %	0 %	100 %	100	100	Cumple
1/2"	47.64	2 %	2 %	98 %	90	100	Cumple
3/8"	721.92	36 %	39 %	61 %	40	70	Cumple
No. 4	1020	51 %	90 %	10 %	0	15	Cumple
No. 8	157	8 %	98 %	2 %	0	5	Cumple
Pasa No.8	41	2 %	100 %	0 %			
Suma	1,987	100 %					
Módulo de Finura							
$M.F = \left[\frac{\sum \% \text{ Ret. Acomulado desde Tamiz } 3'' \text{ a No. } 100}{100} \right]$						6.28	

Anexo 3.3.6. Curva granulométrica del Agregado grueso (Muestra 3).

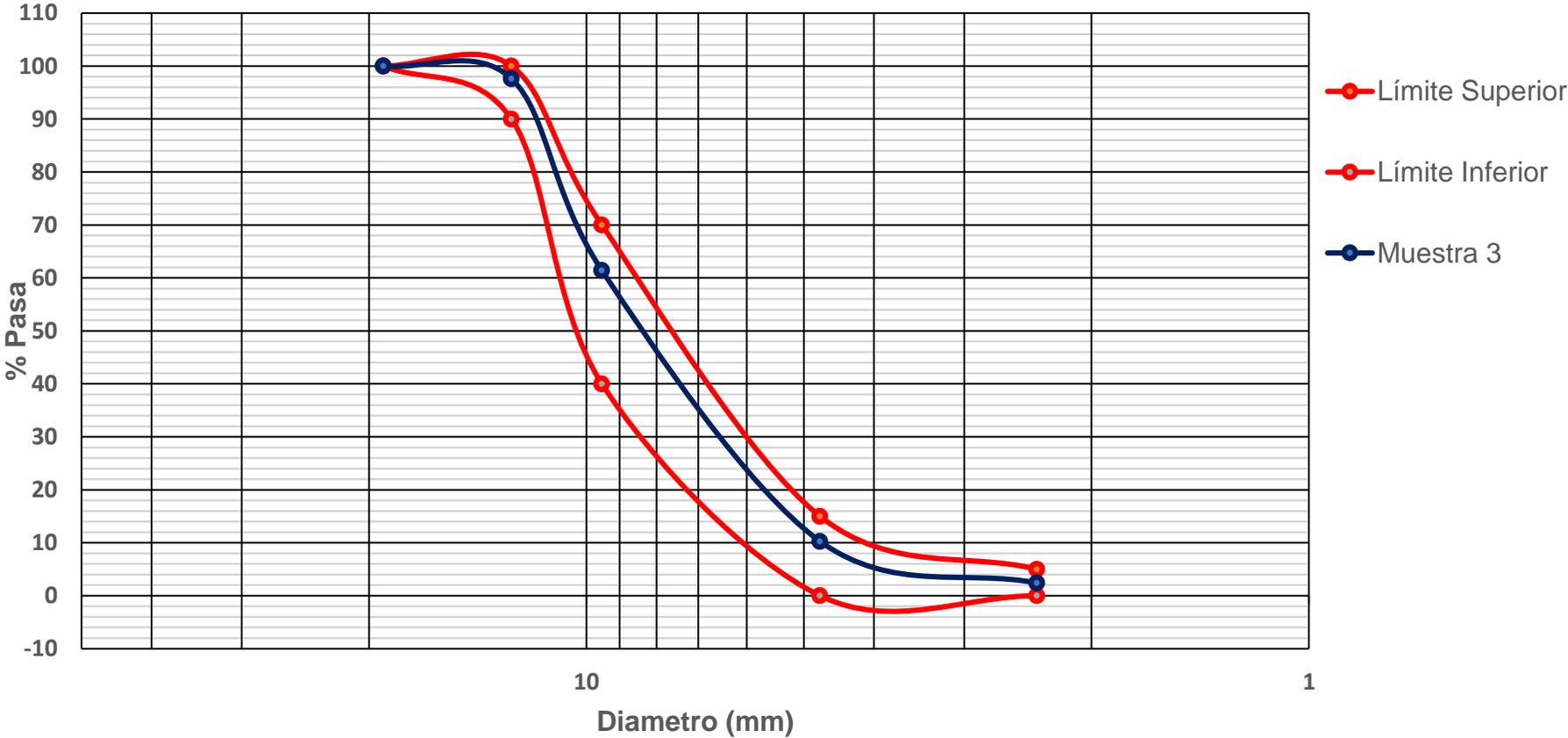


Figura A-5. Curva granulométrica de muestra 3 de agregado grueso

Anexo 3.3.7. Análisis granulométrico del agregado fino (Muestra 1).

Muestra 1						
Tamices	Peso Ret. en cada tamiz, Gramos	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% que pasa	Especificaciones	Comparación con Norma
					% que pasa	
3/8	0	0 %	0 %	100 %	100	Cumple
No. 4	4.85	1 %	1 %	99 %	95 a 100	Cumple
No. 8	117.12	24 %	25 %	75 %	80 a 100	No Cumple
No. 16	117.12	24 %	49 %	51 %	50 a 85	Cumple
No. 30	78.08	16 %	65 %	35 %	25 a 60	Cumple
No. 50	48.8	10 %	75 %	25 %	5 a 30	Cumple
No. 100	63.44	13 %	88 %	12 %	0 a 10	No Cumple
No. 200	48.8	10 %	98 %	2 %		
Pasa No.200	9.79	2 %	100 %	0 %		
Suma	488	100 %				
Módulo de Finura						
$M.F = \left[\frac{\sum \% \text{ Ret. Acomulado desde Tamiz } 3/8'' \text{ a No. } 100}{100} \right]$					3.03	

Anexo 3.3.8. Curva granulométrica del Agregado fino (Muestra 1).

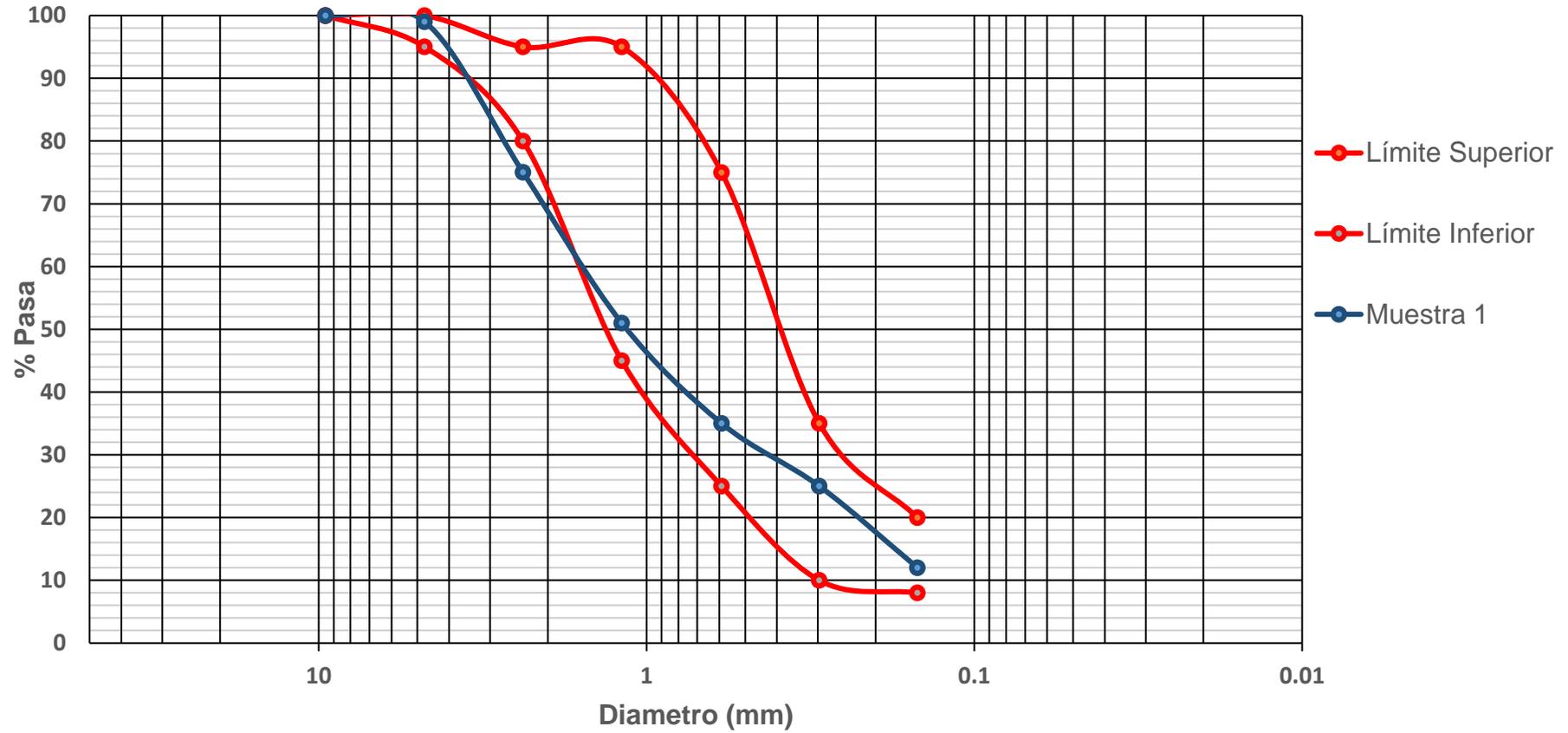


Figura A-6. Curva granulométrica de muestra 1 de agregado fino.

Anexo 3.3.9. Análisis granulométrico del agregado fino (Muestra 2).

Muestra 2						
Tamices	Peso Ret. en cada tamiz, Gramos	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% que pasa	Especificación	Comparación con Norma
					% que pasa	
3/8	0	0 %	0 %	100 %	100	Cumple
No. 4	9.82	2 %	2 %	98 %	95 a 100	Cumple
No. 8	117.84	24 %	26 %	74 %	80 a 100	No Cumple
No. 16	108.02	22 %	48 %	52 %	50 a 85	Cumple
No. 30	73.65	15 %	63 %	37 %	25 a 60	Cumple
No. 50	49.1	10 %	73 %	27 %	5 a 30	Cumple
No. 100	68.74	14 %	87 %	13 %	0 a 10	No Cumple
No. 200	29.46	6 %	93 %	7 %		
Pasa No.200	34.37	7 %	100 %	0 %		
Suma	491	100 %				
Módulo de Finura						
$M.F = \left[\frac{\sum \% \text{ Ret. Acomulado desde Tamiz } 3/8'' \text{ a No. } 100}{100} \right]$					<p style="text-align: center;">2.99</p>	

Anexo 3.3.10. Curva granulométrica del Agregado fino (Muestra 2).

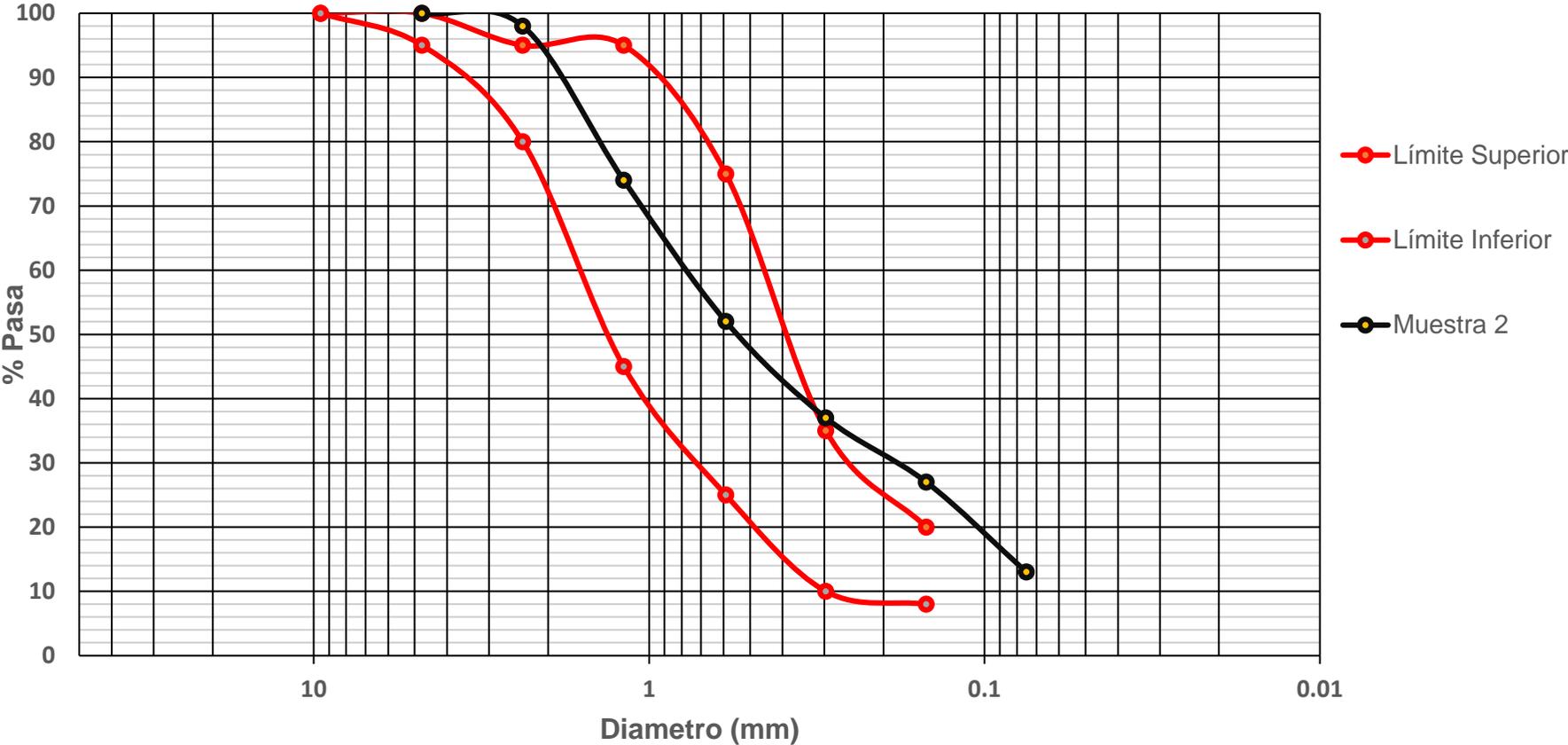


Figura A-7. Curva granulométrica de muestra 2 de agregado fino

Anexo 3.3.11. Análisis granulométrico del agregado fino (Muestra 3).

Muestra 3						
Tamices	Peso Ret. en cada tamiz, Gramos	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% que pasa	Especificación	Comparación con Norma
					% que pasa	
3/8	0	0 %	0 %	100 %	100	Cumple
No. 4	4.89	1 %	1 %	99 %	95 a 100	Cumple
No. 8	115.53	24 %	25 %	75 %	80 a 100	No Cumple
No. 16	126.62	26 %	50 %	50 %	50 a 85	Cumple
No. 30	82.81	17 %	67 %	33 %	25 a 60	Cumple
No. 50	58.41	12 %	79 %	21 %	5 a 30	Cumple
No. 100	38.94	8 %	87 %	13 %	0 a 10	No Cumple
No. 200	29.26	6 %	93 %	7 %		
Pasa No.200	30.54	6 %	99 %	1 %		
Suma	487	99 %				
Módulo de Finura						
$M.F = \left[\frac{\sum \% \text{ Ret. Acomulado desde Tamiz } 3/8" \text{ a No. } 100}{100} \right]$					3.09	

Anexo 3.3.12. Curva granulométrica del Agregado fino (Muestra 3).

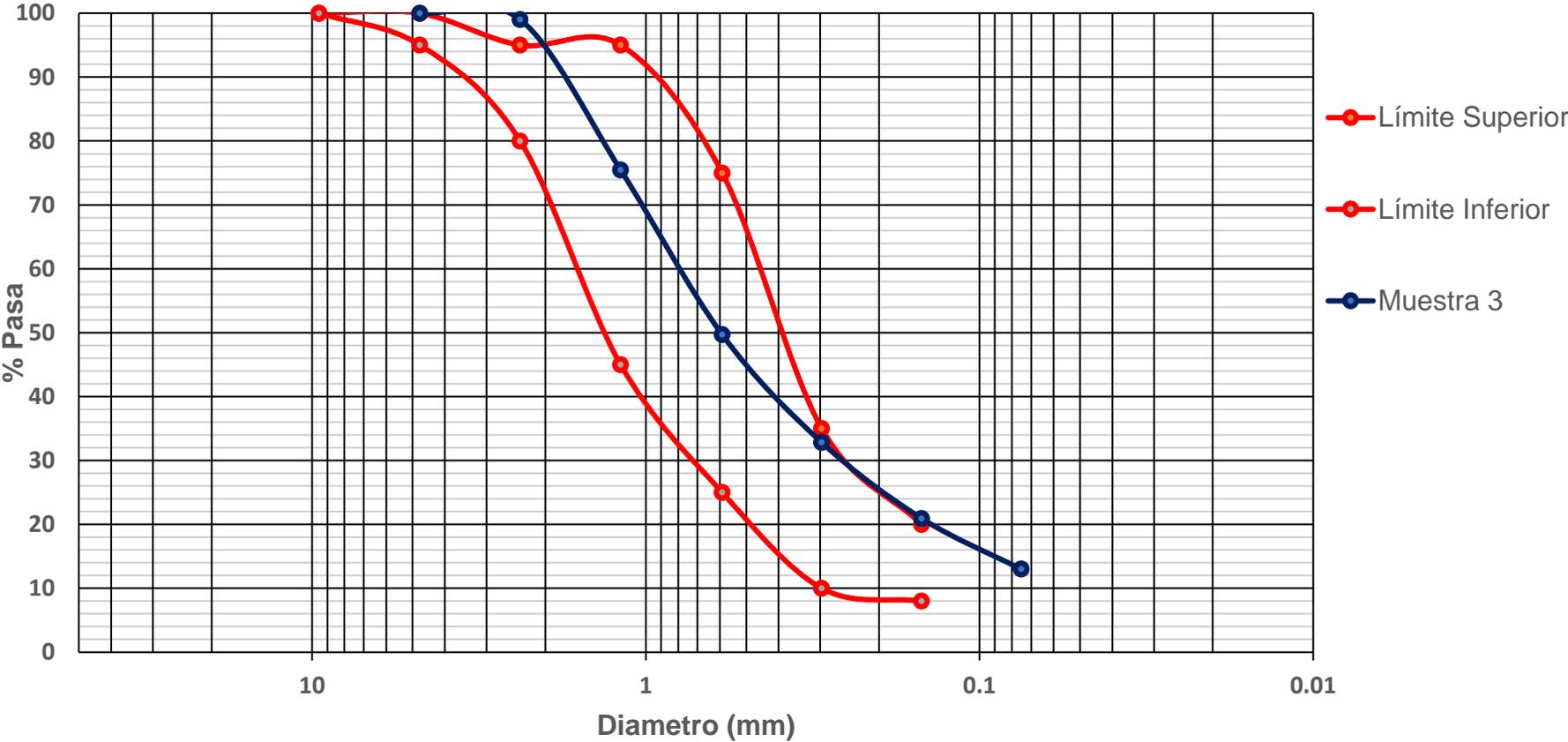


Figura A-8. Curva granulométrica de muestra 3 de agregado fino.

Anexo 3.4. Pesos unitarios de los agregados

Anexo 3.4.1. Peso unitario seco suelto del agregado grueso.

Proyecto	Diseño de Mezclas de Concreto Permeable con Agregados Basálticos
Norma aplicada	ASTM C29 -03 –Determinación de PVSS y PVSC de los agregados
Procedencia de Agregado	Cantera Veracruz, Nindirí.

Cálculo del Peso Volumétrico Seco Suelto(PVSS)			
Ensaye no.	1	2	3
Código del Molde	MLD-01	MLD-01	MLD-01
Volumen del molde	0.00706 m ³	0.00706 m ³	0.00706 m ³
Peso del molde	2.42 kg.	2.42 kg.	2.42 kg.
Peso del agregado seco suelto + molde	12.97 kg.	13.01 kg.	12.93 kg.
Peso del agregado seco suelto en el molde	10.55 kg.	10.51 kg.	10.59 kg.
Peso volumétrico seco suelto	1495 kg/m ³	1489 kg/m ³	1501 kg/m ³
Peso volumétrico promedio seco suelto	1495 kg/m³		
Ecuación			
$PVSS \left(\frac{Kg}{M^3} \right) = \frac{(\text{Peso de material suelto} + \text{recipiente}) - \text{Peso de recipiente}}{\text{Volumen del recipiente}}$			

Anexo 3.4.2. Peso unitario seco compacto del agregado grueso.

Proyecto	Diseño de Mezclas de Concreto Permeable con Agregados Basálticos
Norma aplicada	ASTM C29 -03 –Determinación de PVSS y PVSC de los agregados
Procedencia de Agregado	Cantera Veracruz, Nindirí.

Cálculo del Peso Volumétrico Seco Compacto (PVSC)			
Ensaye no.	1	2	3
Código del Molde	MLD-01	MLD-01	MLD-01
Volumen del molde	0.00706 m ³	0.00706 m ³	0.00706 m ³
Peso del molde	2.42 kg.	2.42 kg.	2.42 kg.
Peso del agregado seco compacto + molde	13.61 kg.	13.59 kg.	13.65 kg.
Peso del agregado seco compacto en el molde	11.19 kg.	11.17 kg.	11.23 kg.
Peso volumétrico seco compacto	1586 kg/m ³	1583 kg/m ³	1591 kg/m ³
Peso volumétrico promedio seco compacto	1587 kg/m³		
Ecuación			
$PVSC \left(\frac{Kg}{M^3} \right) = \frac{(\text{Peso de material compacto + recipiente}) - \text{Peso de recipiente}}{\text{Volumen del recipiente}}$			

Anexo 3.4.3. Peso unitario seco suelto del agregado fino.

Proyecto	Diseño de Mezclas de Concreto Permeable con Agregados Basálticos
Norma aplicada	ASTM C29 -03 –Determinación de PVSS y PVSC de los agregados
Procedencia	Cantera Veracruz, Nindirí.

Peso volumétrico seco suelto (PVSS)			
	1	2	3
Muestra no.			
Código del Molde	MLD-01	MLD-01	MLD-01
Volumen del molde	0.00706 m ³	0.00706 m ³	0.00706 m ³
Peso del molde	2.42 kg.	2.42 kg.	2.42 kg.
Peso del agregado seco suelto + molde	14.88 kg.	14.96 kg.	14.81 kg.
Peso del agregado seco suelto en el molde	12.46 kg.	12.54 kg.	12.39 kg.
Peso volumétrico seco suelto	1765 kg/m ³	1777 kg/m ³	1756 kg/m ³
Peso volumétrico promedio seco suelto	1766 kg/m³		
Ecuación			
$PVSS \left(\frac{Kg}{M^3} \right) = \frac{(\text{Peso de material suelto} + \text{recipiente}) - \text{Peso de recipiente}}{\text{Volumen del recipiente}}$			

Anexo 3.4.4. Peso unitario seco compacto del agregado fino.

Proyecto	Diseño de Mezclas de Concreto Permeable con Agregados Basálticos
Norma aplicada	ASTM C29 -03 –Determinación de PVSS y PVSC de los agregados
Procedencia	Cantera Veracruz, Nindirí.

Cálculo del Peso Volumétrico Seco Compacto (PVSC)			
	1	2	3
Ensaye no.			
Código del Molde	MLD-01	MLD-01	MLD-01
Volumen del molde	0.00706 m ³	0.00706 m ³	0.00706 m ³
Peso del molde	2.42 kg.	2.42 kg.	2.42 kg.
Peso del agregado seco compacto + molde	16.30 kg.	16.26 kg.	16.35 kg.
Peso del agregado seco compacto en el molde	13.88 kg.	13.84 kg.	13.93 kg.
Peso volumétrico seco compacto	1967 kg/m ³	1961 kg/m ³	1974 kg/m ³
Peso volumétrico promedio seco compacto	1967 kg/m³		
Ecuación			
$PVSC \left(\frac{Kg}{M^3} \right) = \frac{(\text{Peso de material compacto} + \text{recipiente}) - \text{Peso de recipiente}}{\text{Volumen del recipiente}}$			

Anexo 3.5. Gravedad específica y % absorción de los agregados.

Anexo 3.5.1. Gravedad específica y % Absorción del agregado grueso.

Proyecto	Diseño de Mezclas de Concreto Permeable con Agregados Basálticos
Ensaye	ASTM C127 -01 –Determinación de la Grav. Específica y % Absorción del Agregado Grueso
Procedencia de Agregado	Cantera Veracruz, Nindirí.

Ítem	Muestra No.	1	2	3
1	Peso de Cesta en el aire	0.483 kg.	0.482	0.48
2	Peso Cesta + Muestra S.S.S. en el aire	1.793 kg.	2.40 kg.	2.49 kg.
3	Peso de Cesta en agua	0.305 kg.	0.306 kg.	0.305 kg.
4	Ws, Peso de Muestra S.S.S., (2-1)	1.310 kg.	1.918 kg.	2.005 kg.
5	Peso sumergido en agua: Cesta + Muestra S.S.S.	1.137 kg.	1.53 kg.	1.60 kg.
6	Wma, Peso de muestra saturada superficialmente seca en agua, (5--3)	0.832	1.224	1.290
7	Wo. Peso de muestra secada a peso constante	1.286 kg.	1.885 kg.	1.970 kg.
8	Gravedad Específica de la Grava, $7 \div (4-6)$	2.69	2.72	2.76
9	Gravedad Específica Promedio de la Grava	2.72		
10	Peso humedad de la muestra S.S.S., (4-7)	0.02 kg.	0.03 kg.	0.03 kg.
11	Absorción (%), $(10 \div 7)$	1.87%	1.75%	1.78%
12	Absorción Promedio (%)	1.80%		
13	Gravedad Específica S.S.S., $4 \div (4-6)$	2.74	2.76	2.80
14	Gravedad Específica S.S.S Promedio de la Grava	2.77		
15	Gravedad Específica Aparente, $7 \div (7-6)$	2.83	2.85	2.90
16	Promedio de Gravedad Específica Aparente	2.86		

Anexo 3.5.2. Gravedad específica y % Absorción del agregado fino.

Proyecto	Diseño de Mezclas de Concreto Permeable con Agregados Basálticos
Ensayo	ASTM C128 -01 –Determinación de la Grav. Específica y % Absorción del Agregado Fino
Procedencia de Agregado	Cantera Veracruz, Nindirí.

Ítem	Muestra No.	1	2	3
1	Frasco No.	01	02	03
2	Peso de Frasco seco y limpio	178.60 gr.	170.30 gr.	180.00 gr.
3	Peso de la arena en condición S.S.S.	498.00 gr.	500.00 gr.	498.00 gr.
4	Peso del frasco seco y limpio + Muestra S.S.S	676.60 gr.	670.30 gr.	678.00 gr.
5	Peso del Frasco + Agua + Arena	997.40 gr.	995.50 gr.	998.15 gr.
6	Código de Tara	W-20	P-4	W-22
7	Ws, Peso de Arena seca	488.23 gr.	489.12 gr.	488.16 gr.
8	Gravedad Específica de la Arena, $8 \div ([500 \text{ Cm}^3] - (5+4))$	2.72	2.80	2.71
9	Gravedad Específica Promedio de la Arena	2.75		
10	Contenido de agua, 3-9	9.77 gr.	10.88 gr.	9.84 gr.
11	Absorción (%), $12 \div 9$	2.00%	2.22%	2.02%
12	Absorción Promedio (%)	2.08%		
13	Gravedad Específica S.S.S.	2.78	2.86	2.77
14	Gravedad Específica S.S.S Promedio de la Arena	2.80		
15	Gravedad Específica Aparente	2.88	2.98	2.87
16	Promedio de Gravedad Específica Aparente	2.91		

Anexo 3.6. Porcentaje de Desgaste del agregado grueso.

Proyecto	Diseño de Mezclas de Concreto Permeable con Agregados Basálticos
Actividad	Ensayo de “Desgaste del agregado grueso en Máquina de los Ángeles” según ASTM C 131-03
Procedencia de Agregado	Cantera Veracruz, Nindirí.

Muestra, M	Agregado Grueso		
	W. Inicial (kg.)	W. Final (kg.)	% Desgaste
M - 1	5	3.267	35%
M - 2	5	3.165	37%
M - 3	5	3.183	36%
M - Promedio	5	3.205	36%

Anexo 3.7. Impurezas orgánicas en el agregado fino.

Proyecto	Diseño de Mezclas de Concreto Permeable con Agregados Basálticos
Norma aplicada	ASTM C 40-11- Determinación de Materia Orgánica en los agregados finos para concreto.
Procedencia de Agregado	Cantera Veracruz, Nindirí.

Escala de colores en placa orgánica					
No. De Color Estándar Gardner	5	8	11	14	16
No. Placa Orgánica	1	2	3 (Máx. Permisible)	4	5

Resultados y comparación con escala de colores			
Número de Muestras	M-1	M-2	M-3
No. Placa Orgánica	1	1	2
No. Placa Orgánica (Máx. Permisible)	3	3	3
Cumple con Norma ASTM C 40	Cumple	Cumple	Cumple

Interpretación
Las 3 muestras ensayadas siguiendo la norma ASTM C 40 están por debajo del color máximo permisible (Color #3 o en placa orgánica), por lo que se consideran que no contiene materia orgánica perjudicial.

Anexo 4:
Proporcionamiento de Mezclas

Anexo 4.1. Proporcionamiento de mezcla seleccionada (M 11'A).

Datos de entrada		
Dosificación Aditivo, Ml.		5.5
Resistencia a 28 días, psi		3000
Relación w/c		0.32
Peso Cemento/M³		350
Porcentaje de vacíos		25
Porcentaje de A. Finos		15.00%
Proporción A.G: A.F		85 :15
Proporcionamiento para 1 M³ de Mezcla de Concreto		
Volúmenes absolutos de materiales a utilizar		
Descripción	Ecuación	Resultado
Cemento	$Vol_{Cemento} = \left(\frac{W_{Cemento}}{G \cdot Esp \cdot cemento \cdot \gamma_w} \right)$	0.121
Agua de Diseño, Lts.	$W = c(w/cm)$	112
Vol. Total de Agregados	$Vol. Total = 1 - \% vacíos - Vol_{agua} - Vol_{Cemento}$	0.517
Agregado Fino (Cero)	$Vol_{A.Fino} = (Vol_{Agregados})(\% A. Fino)$	0.078
Agregado Grueso (Grava 1/2")	$Vol_{A.Grueso} = (Vol_{Agregados})(\% A. Grueso)$	0.439
Aditivo, Ml.	$Cant. Aditivo = (Dosif \cdot Kilo Cemento)(W_{Cemento})$	1925
Peso de materiales a utilizar		
Cemento, kg.	La cantidad fue definida como dato de entrada	350
Agua, kg	El peso del agua, fue calculado anteriormente mediante la ecuación $W = c(w/c)$	112
Agregado Fino (Cero)	$W_{A.Fino} = Vol. Fino \cdot G \cdot Esp \cdot A.Fino \cdot \gamma_w$	214.50
Agregado Grueso (Grava 1/2")	$W_{A.Grueso} = Vol. Grueso \cdot G \cdot Esp \cdot A.Grueso \cdot \gamma_w$	1196.02
Corrección Agua por Absorción, Lts.	$W_{Absorbida} = \left[\frac{(W_{Grueso})(\% Abs.Grueso) + (W_{Fino})(\% Abs.Fino)}{\gamma_w} \right]$	25.97
Resumen de Materiales en peso		
Material	Cantidad	Comentarios
Cemento, Kg.	350	El agua Total es la suma del Agua de diseño y el Agua absorbida por los agregados
Agua diseño, Lts.	112	
Agua Total, Lts.	137.96	

A. Fino (cero), Kg.	214.50	
A. Grueso de 1/2", Kg.	1194.08	
Aditivo Sika, Lts.	1.925	

Proporcionamiento en peso para 1 saco de Cemento ¹		
Descripción	Ecuación	Resultado
Cemento, Kg.	1 Bolsa de Cemento equivale a	42.5
No. Bolsas de Cemento en 1 M ³	$No. Bolsas = \left(\frac{W. Cemento para 1 M^3}{Peso de 1 Bolsa Cemento} \right)$	8.24
Agua Diseño, Lts.	$W_{Agua} = \frac{W. Agua para 1 M^3}{No. Bolsas}$	13.59
A. Fino, Kg.	$W_{A.Fino} = \frac{W. Árido Fino para 1 M^3}{No. Bolsas}$	26.03
A. Grueso, Kg.	$W_{A.Grueso} = \frac{W. Árido Grueso para 1 M^3}{No. Bolsas}$	144.91
Aditivo, Lts.	$Aditivo = \frac{Cant. aditivo para 1 M^3}{No. Bolsas}$	0.23
Agua absorbida, Lts.	$W_{Absorbida} = \frac{W. Agua absorbida en 1 M^3}{No. Bolsas}$	3.15
Resumen de Materiales en peso		
Material	Cantidad	Comentarios
Cemento, Kg.	42.5	El agua Total es la suma del Agua de diseño y el Agua absorbida por los agregados
Agua diseño, Lts.	13.59	
Agua Total, Lts.	16.74	
A. Fino (cero), Kg.	26.03	
A. Grueso de 1/2", Kg.	144.91	
Aditivo Sika, Lts.	0.23	
Proporcionamiento por partes		
Vol. Cemento	$Vol. Cemento = \frac{Peso\ saco\ Cemento}{PVSC_{Cemento}}$	0.0283
Cemento	$Cemento = \frac{Vol. Cemento}{Vol. Cemento}$	1
Arena	$Arena = \left[\frac{W_{Arena\ en\ 1\ saco\ de\ Cemento}}{(PVSS_{Arena}) (Vol. Cemento)} \right]$	0.52
Grava	$Grava = \left[\frac{W_{Grava\ en\ 1\ saco\ de\ Cemento}}{(PVSS_{Grava}) (Vol. Cemento)} \right]$	3.42
Proporción		
Cemento	Arena	Grava 1/2"
1	0.52	3.42

¹ Todas las mezclas se proporcionaron siguiendo este procedimiento.

Datos de entrada		
Dosificación Aditivo		5.5
Resistencia a 28 días, psi		3000
Relación A/C		0.32
Peso Cemento/M ³		350
Porcentaje de vacíos		25
Porcentaje de A. Finos		0.15
Proporción A.G : A.F		85:15
Volumen a producir, M ³		0.115
Proporcionamiento por peso para 1 M ³ de Mezcla de Concreto		
Resumen de Materiales en peso		
Material	Peso, kg.	Volumen, M ³
Cemento	350	0.121
Agua diseño.	112	0.112
Agua Total.	138	0.138
A. Fino (cero)	214.5	0.078
A. Grueso de 1/2"	11964	0.439
Aditivo Sika.	2.12	1.925 Lts.
Proporcionamiento por partes		
Cemento	Arena	Grava 1/2"
1	0.52	3.42

Las cantidades de materiales obtenidas para producir un volumen unitario de concreto se multiplicaron **0.115 M³**, este es el volumen que se utilizó en las primeras 4 reproducciones de la mezcla seleccionada (**M 11´A**). En la última reproducción (5 vez) de la mezcla seleccionada, fu necesario un volumen de **0.145M³** divididos en 0.058 M³ para cilindros y losa, y 0.087 M³ para viguetas.

Anexo 5:

Comparación Económica

Para realizar la comparación económica, se realizó el diseño de una mezcla de concreto convencional para un $F'c$ de diseño 210 kg/M³ (3000 psi) utilizando el Método ACI 211. Esta se diseñó con los agregados utilizados en la dosificación de la mezcla de concreto permeable.

Lo anterior, tiene como objeto obtener las cantidades de materiales necesarios para la producción de 1 Metro Cúbico de concreto convencional, para comparar los costos de materiales que incurre la producción de una unidad cúbica de ambos tipos de concreto y establecer la competitividad económica del concreto permeable que permita su uso en varias aplicaciones.

Diseño de concreto convencional

El diseño se hizo con la ayuda de la herramienta MS Excel (Macro) para una mejor comprensión y control de las variables que interviene en proceso de proporcionamiento:

- **Datos de entrada**

Para realizar el diseño se requiere información relacionada a las propiedades de los materiales a utilizar y especificaciones de la mezcla. A continuación se resumen:

Resultado de los ensayos de laboratorio		
Descripción:	A. Fino	A. Grueso
Peso específico:	2.75	2.72
% De absorción:	2.8	1.8
% Contenido de humedad:	0	0
Módulo de fineza:	3	---
Tamaño máximo nominal:	---	1/2"
Peso unitario compactado, kg/m ³ :	---	1587
Peso unitario suelto, kg/m ³ :	1766	1495

Datos de entrada		
Descripción:	Concreto Convencional	Concreto Permeable
Consistencia	Plástica	SECA
Asentamiento	3" - 4"	0" - 1"
Resistencia a los 28 días (psi)	3,000 PSI	3,000 PSI
Contenido de aire/% vacíos	Sin aire incorporado	0.25
Exposición a sulfatos	Despreciable	Despreciable
Grav. Especifica cemento	2.9	2.9
% Finos	-	0.15
Relación w/c	0.558	0.32
Cantidad de cemento, kg/m ³	-	350

- **Procesamiento de datos**

Menú principal de la plantilla para el diseño de mezcla:

DM-CONCRET 2014

DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO POR EL MÉTODO DEL COMITÉ DE LA ACI

INSERTAR EXPORTAR RESULTADOS TABLAS DE DISEÑO MANUAL DE LABORATORIO DE CONCRETO ACERCA DE


 PARA EL AGREGADO FINO

 PARA EL AGREGADO GRUESO


 INSERTE PROP. DEL CONCRETO

 DESVIACIÓN STANDAR

 PESO ESPECIFICO DEL CEMENTO

 EXPOSICIÓN A SULFATOS

SE CALCULO CON EXITO LA RESISTENCIA PROMEDIO CUMPLE

PROPIEDADES DE CONCRETO		RESULTADOS DEL LABORATORIO	
		FINO	GRUESO
CONSISTENCIA:	PLASTICA	PESO ESPECIFICO DE LA MASA (gr/cm3):	2.75 | 2.72
RESISTENCIA A LOS 28 DIAS:	210	ABSORCIÓN (%):	2.8 | 1.8
CONTENIDO DE AIRE:	SIN AIRE INCORPORAD	CONTENIDO DE HUMEDAD (%):	0 | 0
FACTOR DE SEGURIDAD:	POR REGLAMENTO	MÓDULO DE FINEZA:	3 | --
EXPOSICIÓN A LOS SULFATOS:	DESPRECIABLE	TAMAÑO MAXIMO NOMINAL:	-- | 1/2"
PESO ESPECIFICO DEL CEMENTO (gr/cm3):	2.9	PESO UNITARIO COMPACTADO (Kg/m3):	-- | 1587
DESVIACIÓN STANDAR (kg.f/cm2):	84	PESO UNITARIO SUELTO (Kg/m3):	1766 | 1495
RESULTADO		VOLUMEN ABSOLUTO DE LOS MATERIALES	
RESISTENCIA PROMEDIO (kg.f/cm2)	294	CEMENTO (m3):	0.133 | ENTONCES DETERMINAMOS EL A. FINO

- **Introducción de datos de entrada**

1. **Propiedades del agregado fino**

DM-CONCRET 2014

DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO POR EL MÉTODO DEL COMITÉ DE LA ACI

INSERTAR EXPORTAR RESULTADOS TABLAS DE DISEÑO MANUAL DE LABORATORIO DE CONCRETO ACERCA DE

PARA EL AGREGADO FINO
PARA EL AGREGADO GRUESO

INSERTE RESULT. DE LABORATORIO

INSERTE PROP. DEL CONCRETO

DESVIACIÓN STANDAR

PESO ESPECIFICO DEL CEMENTO

EXPOSICIÓN A SULFATOS

SE CALCULO CON EXITO LA RESISTENCIA PROMEDIO CUMPLE

RESULTADOS DEL LABORATORIO DEL AGR. FINO

PESO ESPECIFICO DE LA MASA (gr/cm³) 2.75

ABSORCIÓN (%) 2.8

CONTENIDO DE HUMEDAD (%) 0

MÓDULO DE FINEZA 3

PESO UNITARIO SUELTO SECO (kg/m³) 1766

CANCELAR ACEPTAR

RESULTADOS DEL LABORATORIO

	FINO	GRUESO
PESO ESPECIFICO DE LA MASA (gr/cm ³):	2.75	2.72
ABSORCIÓN (%):	2.8	1.8
CONTENIDO DE HUMEDAD (%):	0	0
MÓDULO DE FINEZA:	3	---
TAMAÑO MAXIMO NOMINAL:	---	1/2"
PESO UNITARIO COMPACTADO (Kg/m ³):	---	1587
PESO UNITARIO SUELTO (Kg/m ³):	1766	1495

VOLUMEN ABSOLUTO DE LOS MATERIALES

RESISTENCIA PROMEDIO (kg.f/cm²) 294 CEMENTO (m³): 0.133 ENTONCES DETERMINAMOS EL A. FINO

2. **Propiedades del agregado grueso**

DM-CONCRET 2014

DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO POR EL MÉTODO DEL COMITÉ DE LA ACI

INSERTAR EXPORTAR RESULTADOS TABLAS DE DISEÑO MANUAL DE LABORATORIO DE CONCRETO ACERCA DE

PARA EL AGREGADO FINO
PARA EL AGREGADO GRUESO

INSERTE RESULT. DE LABORATORIO

INSERTE PROP. DEL CONCRETO

DESVIACIÓN STANDAR

PESO ESPECIFICO DEL CEMENTO

EXPOSICIÓN A SULFATOS

SE CALCULO CON EXITO LA RESISTENCIA PROMEDIO CUMPLE

RESULTADOS DE LABORATORIO DEL AGR. GRUESO

PESO ESPECIFICO DE LA MASA (gr/cm³) 2.72

ABSORCIÓN (%) 1.8

CONTENIDO DE HUMEDAD (%) 0

TAMAÑO MAXIMO NOMINAL 1/2"

PESO UNITARIO COMPACTADO SECO (kg/m³) 1587

PESO UNITARIO SUELTO SECO (kg/m³) 1495

CANCELAR ACEPTAR

RESULTADOS DEL LABORATORIO

	FINO	GRUESO
PESO ESPECIFICO DE LA MASA (gr/cm ³):	2.75	2.72
ABSORCIÓN (%):	2.8	1.8
CONTENIDO DE HUMEDAD (%):	0	0
MÓDULO DE FINEZA:	3	---
TAMAÑO MAXIMO NOMINAL:	---	1/2"
PESO UNITARIO COMPACTADO (Kg/m ³):	---	1587
PESO UNITARIO SUELTO (Kg/m ³):	1766	1495

VOLUMEN ABSOLUTO DE LOS MATERIALES

RESISTENCIA PROMEDIO (kg.f/cm²) 294 CEMENTO (m³): 0.133 ENTONCES DETERMINAMOS EL A. FINO

3. Especificación de la mezcla

RECOMENDACIONES

REFERENCIA

TIPO DE CONSTRUCCIÓN	MAXIMA	MINIMO
-Zapata y Muros de cimentación Reforzados.	3"	1"
-Zapata simples, cajones y muros de subestructura	3"	1"
-Vigas y Muros reforzados	4"	1"
-Columnas de edificios	4"	1"
-Pavimentos y Losas	3"	1"
-Concreto ciclopeo:	2"	1"

CONCRETO

CONSISTENCIA: PLASTICA

ASENTAMIENTO

Seca: 0" a 2"

Plastica: 3" a 4"

Fluida: >= 5"

4. Datos del cemento

CEMENTO

CUADRO DE REFERENCIA

SEGUN LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA DEL PERU

MARCA	TIPO	PESO ESPECIFICO
SOL	I	3.11
ATLAS	IP	2.97
ANDINO	I	3.12
ANDINO	II	3.17
ANDINO	V	3.15
PACASMAYO	I	3.11
YURA	IP	3.06
YURA	IPM	3.09
RUMI	IPM	-----

PESO ESPECIFICO DEL CEMENTO (gr/cm3): 2.9

ACEPTAR

CANCELAR

5. Datos sobre el grado de exposición

DM-CONCRET 2014

DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO POR EL MÉTODO DEL COMITÉ DE LA ACI

INSERTAR EXPORTAR RESULTADOS TABLAS DE DISEÑO MANUAL DE LABORATORIO DE CONCRETO ACERCA DE

PARA EL AGREGADO FINO

PARA EL AGREGADO GRUESO

INSERTE RESULT. DE LABORATORIO

INSERTE CARACTERÍSTICAS DE LA EXPOSICIÓN DE LOS SULFATOS

CUADRO DE REFERENCIA

EXPOSICIÓN A SULFATOS	SULFATOS SOLUBLES EN AGUA (SO ₄),	SULFATOS (SO ₄) EN AGUA p.p.m.	TIPO DE CEMENTO	RESISTENCIA MÍNIMA RECOMENDADA
DESPRECIABLE	0.00 < SO ₄ < 0.10	0.00 < SO ₄ < 150		
MODERADO	0.10 < SO ₄ < 0.20	150 < SO ₄ < 1500	II, IP (MS), IS (MS), P (MS), I (PM), (MS), I (SM) (MS)	280
SEVERO	0.2 < SO ₄ < 2.00	1500 < SO ₄ < 10 000	V	310
MUY SEVERO	SO ₄ > 0.20	SO ₄ > 10 000	V (mas puzolana)	310

EXPOSICIÓN A SULFATOS
DESPRECIABLE

ACERTAR

CANCELAR

PESO ESPECÍFICO DEL CEMENTO (gr/cm³): 2.9 PESO UNITARIO COMPACTADO (kg/m³): 1587

DESVIACIÓN STANDAR (kg.f/cm²): 84 PESO UNITARIO SUELTO (Kg/m³): 1766 1495

RESULTADO

RESISTENCIA PROMEDIO (kg.f/cm²): 294

VOLUMEN ABSOLUTO DE LOS MATERIALES

CEMENTO (m³): 0.133

ENTONCES DETERMINAMOS EL A. FINO

DM-CONCRET 2014

DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO POR EL MÉTODO DEL COMITÉ DE LA ACI

INSERTAR EXPORTAR RESULTADOS TABLAS DE DISEÑO MANUAL DE LABORATORIO DE CONCRETO ACERCA DE

PARA EL AGREGADO FINO

PARA EL AGREGADO GRUESO

INSERTE RESULT. DE LABORATORIO

INSERTE PROP. DEL CONCRETO

DESVIACIÓN STANDAR

PESO ESPECÍFICO DEL CEMENTO

EXPOSICIÓN A SULFATOS

SE CALCULO CON EXITO

LA RESISTENCIA PROMEDIO CUMPLE

PROPIEDADES DE CONCRETO

CONSISTENCIA: PLASTICA

RESISTENCIA A LOS 28 DIAS: 210

CONTENIDO DE AIRE: SIN AIRE INCORPORADO

FACTOR DE SEGURIDAD: POR REGLAMENTO

EXPOSICIÓN A LOS SULFATOS: DESPRECIABLE

PESO ESPECÍFICO DEL CEMENTO (gr/cm³): 2.9

DESVIACIÓN STANDAR (kg.f/cm²): 84

RESULTADO

RESISTENCIA PROMEDIO (kg.f/cm²): 294

RESULTADOS DEL LABORATORIO

	FINO	GRUESO
PESO ESPECÍFICO DE LA MASA (gr/cm ³):	2.75	2.72
ABSORCIÓN (%):	2.8	1.8
CONTENIDO DE HUMEDAD (%):	0	0
MÓDULO DE FINEZA:	3	---
TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL:	---	1/2"
PESO UNITARIO COMPACTADO (Kg/m ³):	---	1587
PESO UNITARIO SUELTO (Kg/m ³):	1766	1495

VOLUMEN ABSOLUTO DE LOS MATERIALES

CEMENTO (m³): 0.133

ENTONCES DETERMINAMOS EL A. FINO

- **Generación de resultados**

DM-CONCRET 2014

DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO POR EL MÉTODO DEL COMITÉ DE LA ACI

INSERTAR EXPORTAR RESULTADOS TABLAS DE DISEÑO MANUAL DE LABORATORIO DE CONCRETO ACERCA DE

PARA EL AGREGADO FINO
PARA EL AGREGADO GRUESO

INSERTE RESULT. DE LABORATORIO

INSERTE PROP. DEL CONCRETO

DESVIACIÓN STANDAR

PESO ESPECIFICO DEL CEMENTO

EXPOSICIÓN A SULFATOS

SE CALCULO CON EXITO

LA RESISTENCIA PROMEDIO CUMPLE

RESULTADO		VOLUMEN ABSOLUTO DE LOS MATERIALES		
RESISTENCIA PROMEDIO (kgf/cm ²)	294	CEMENTO (m ³)	0.133	ENTONCES DETERMINAMOS EL A. FINO A. FINO (m ³) : 1 - SUMATORIA A. FINO (m ³) : 0.316
ASENTAMIENTO:	3" - 4"	AIRE (m ³)	0.025	
VOLUMEN UNITARIO DE AGUA (lt/m ³)	216	AGUA (m ³)	0.216	
CONTENIDO DE AIRE (%)	2.5	A. GRUESO (m ³)	0.309	
RELACIÓN AGUA - CEMENTO:	0.5584	SUMATORIA:	0.684	
CONTENIDO DE AGREGADO GRUESO:	0.53			

PESO DE DISEÑO DE LOS MATERIALES		CORRECCIÓN POR HUMEDAD		VOLUMEN EN OBRA	
CEMENTO (kg/m ³)	386.819	CEMENTO (kg/m ³)	386.819	CEMENTO (pies)	9.102
A. FINO (kg/m ³)	870.051	A. FINO (kg/m ³)	870.051	A. FINO (pies)	17.398

DM-CONCRET 2014

DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO POR EL MÉTODO DEL COMITÉ DE LA ACI

INSERTAR EXPORTAR RESULTADOS TABLAS DE DISEÑO MANUAL DE LABORATORIO DE CONCRETO ACERCA DE

PARA EL AGREGADO FINO
PARA EL AGREGADO GRUESO

INSERTE RESULT. DE LABORATORIO

INSERTE PROP. DEL CONCRETO

DESVIACIÓN STANDAR

PESO ESPECIFICO DEL CEMENTO

EXPOSICIÓN A SULFATOS

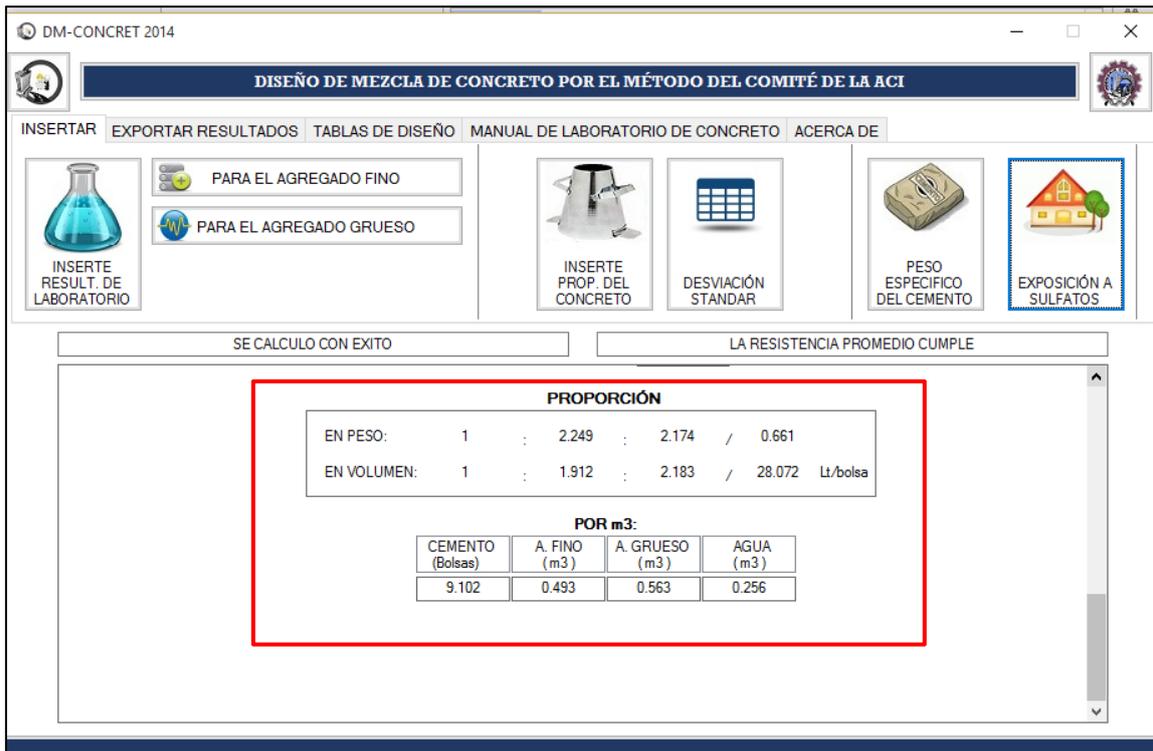
SE CALCULO CON EXITO

LA RESISTENCIA PROMEDIO CUMPLE

PESO DE DISEÑO DE LOS MATERIALES		CORRECCIÓN POR HUMEDAD		VOLUMEN EN OBRA	
CEMENTO (kg/m ³)	386.819	CEMENTO (kg/m ³)	386.819	CEMENTO (pies)	9.102
A. FINO (kg/m ³)	870.051	A. FINO (kg/m ³)	870.051	A. FINO (pies)	17.398
A. GRUESO (kg/m ³)	841.110	A. GRUESO (kg/m ³)	841.110	A. GRUESO (pies)	19.869
AGUA (Lt/m ³)	216.000	AGUA (Lt/m ³)	255.501	AGUA (Lt/m ³)	255.501

PROPORCIÓN					
EN PESO:	1	:	2.249	:	2.174 / 0.661
EN VOLUMEN:	1	:	1.912	:	2.183 / 28.072 Lt/bolsa

POR m³:



A continuación se presentan las cantidades de materiales obtenidos del proceso de proporcionamiento de la mezcla de concreto:

Peso de diseño de los materiales:		
Descripción:	Concreto Convencional	Concreto Permeable
Cemento (kg/m3):	387	350
A. Fino (kg/m3):	870	213
A. Grueso (kg/m3):	841	1191
Agua (Lt/m3):	216	112
Proporción	1 : 2.249 : 2.174 / 0.661	1: 0.609 : 3.403/0.394
Peso de materiales corregido por humedad:		
Descripción:	Concreto Convencional	Concreto Permeable
Cemento (kg/m3):	387	350
A. Fino (kg/m3):	870	213
A. Grueso (kg/m3):	841	1191
Agua Total (Lt/m3):	255.501	137.967
Volúmenes Absolutos :		
Descripción:	Concreto Convencional	Concreto Permeable
Cemento (m3):	0.133	0.121
Aire (m3):	0.025	0.250
A. Fino (m3):	0.316	0.078
A. Grueso (m3):	0.309	0.440
Agua Total (m3):	0.255	0.138
Proporción	1 : 1.912 : 2.183 / 28.072 Lt/bolsa	1 : 0.52 : 3.4/16.753 Lt/bolsa

Comparación Económica

Concreto Convencional:				
Descripción:	Cantidad	Precio	Costo	
Cemento	10.00 Bolsas	9.50 U\$/Bolsa	U\$ 95.00	
A. Fino	0.316 M3	18.00 U\$/M3	U\$ 5.69	
A. Grueso	0.309 M3	16.00 U\$/M3	U\$ 4.94	
Agua	0.255 M3	0.49 U\$/M3	U\$ 0.12	
Total, U\$ (C\$)			U\$ 105.75	C\$ 3,206
Concreto Permeable*:				
Descripción:	Cantidad	Precio	Costo	
Cemento	9.00 Bolsas	9.50 U\$/Bolsa	U\$ 85.50	
A. Fino	0.078	18.00 U\$/M3	U\$ 1.40	
A. Grueso	0.44	16.00 U\$/M3	U\$ 7.04	
Agua	0.138	0.49 U\$/M3	U\$ 0.07	
Total, U\$ (C\$)			U\$ 94.01	C\$ 2,850

* Las cantidades de materiales utilizados en la mezcla de concreto permeable corresponden a la mezcla óptima de la investigación.

Es evidente la diferencia en las proporciones en ambos tipos de mezclas, la principal es la cantidad de agregados utilizados. En cuanto al costo de la producción de 1 metro cúbico entre ambas mezclas, es mínima, aproximadamente **U\$ 12**, pero es incuestionable su viabilidad económica dado los beneficios ambientales aportados por la estructura porosa del concreto permeable.

Anexo 6:
Ensayos de Mezcla Seleccionada
(Mezcla 11´A)

**Estado Fresco:
Densidad y Contenido de Vacíos
(ASTM C 1688)**

Anexo 6.1: Densidad y Contenido de Vacíos de Mezcla 11'A².

DENSIDAD REAL DEL CONCRETO			
Datos de entrada			
Peso del Molde (M), Kg.			2.6
Volumen del Molde (V), M ³			0.0071
Peso del Molde + Concreto (N), Kg.			17.645
Densidad del Aditivo, Kg/M ³			1.12
Densidad del Agua, Kg/M ³			1000
Determinación de Densidad Real			
Descripción	Ecuación		Resultado
Densidad Real (D.R.), Kg/M ³	$D.R. = \frac{N - M}{V}$		2119
Determinación de Densidad Teórica			
Peso de Materiales para producir la bachada			
Material	Cantidad	Corrección de Agua	
Cemento, Kg.	40.42	Agua Añadida	0.14
Agua Total, kg.	15.93	Agua utilizada en Bachada	16.07
A. Fino (cero), Kg.	24.64	Agua utilizada en 1M ³	113.21
A. Grueso de 1/2", Kg.	138.12	Relación w/c de diseño	0.32
Aditivo Sika plastificante, Kg.	0.00019848	Relación w/c utilizada	0.323
Total, Kg.	219.25		
Volumen de Materiales para producir la bachada			
Material	Cantidad	Comentario	
Cemento, M ³ .	0.01394	En el cálculo del peso de los áridos, se tomó en cuenta el Agua absorbida por los mismos.	
Agua diseño, M ³ .	0.01607		
A. Fino (cero), M ³ .	0.00896		
A. Grueso de 1/2", M ³ .	0.05078		
Aditivo Sika plastificante, Lts.	1.7722E-07		
Total, M ³ .	0.08975		
Cálculo de Densidad Teórica (T)			
Descripción	Ecuación		Resultado
Densidad Teórica (T), Kg/M ³	$T = \frac{\text{Peso Mat. utilizados en la Bachada}}{\text{Vol. de Mat. utilizados en la Bachada}}$		2442
Porcentaje de Vacíos			
% Vacíos (U)	$U = \frac{T - D.R.}{T} \times 100$		13%

² Este formato corresponde a la mezcla M11'A (Reproducción 1-R1).

Todas las mezclas siguieron este procedimiento para la determinación del porcentaje de vacíos y la densidad en estado fresco según ASTM C16688-10a

En Estado Endurecido

Anexo 6.2. Resistencia a Compresión de Mezcla Seleccionada (M -11'A).

• **Reproducción 1.**

Reproducción 1								Desarrollo de Resistencia								
No. Cilindro	MS R1	MS R1-1	MS R1-2	MS R1-3	MS R1-4	MS R1-5	MS R1-6	<p>Resistencia Compresión vs Edad</p> <table border="1"> <caption>Data for Resistencia Compresión vs Edad</caption> <thead> <tr> <th>Edad, días</th> <th>Resistencia a Compresión, psi</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7</td> <td>1708</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>2163</td> </tr> <tr> <td>28</td> <td>2481</td> </tr> </tbody> </table>	Edad, días	Resistencia a Compresión, psi	7	1708	14	2163	28	2481
Edad, días	Resistencia a Compresión, psi															
7	1708															
14	2163															
28	2481															
Fecha de Elaboración	17/7/2017															
Fecha de ruptura	24/7/2017		31/7/2017		14/8/2017											
Edad, días	7		14		28											
Peso, Kgs.	4.665	4.65	4.67	4.645	4.675	4.66	4.73									
Longitud, Cms.	20.56	20.525	20.58	20.55	20.61	20.58	20.595									
Diámetro, Cms.	10.825	10.825	10.825	10.825	10.825	10.825	10.825									
Área, Cm ²	92.03	92.03	92.03	92.03	92.03	92.03	92.03									
Volumen, M ³	0.00189	0.00189	0.0019	0.0019	0.0019	0.00189	0.0019									
Carga Aplicada, Lbs.	24246	24617	30650	30983	35410	35336	35465									
Carga Aplicada, Kgs.	10996	11164	13900	14051	16059	16025	16084									
Resistencia a Compresión	Kg./Cm ²	119	121	151	153	174	174	175								
	Promedio	120		152		174										
	PSI	1693	1722	2149	2177	2476	2476	2490								
	Promedio	1708		2163		2481										

- Reproducción 2.

Reproducción 2																
No. Cilindro	MS R2	MS R 2-1	MS R 2-2	MS R 2-3	MS R 2-4	MS R 2-5	MS R 2-6	Desarrollo de Resistencia								
Fecha de Elaboración	17/7/2017															
Fecha de ruptura	24/7/2017		31/7/2017		14/8/2017			<p style="text-align: center;">Resistencia Compresión vs Edad</p> <table border="1"> <caption>Data for Resistencia Compresión vs Edad</caption> <thead> <tr> <th>Edad (días)</th> <th>Resistencia a Compresión (psi)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7</td> <td>1694</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>2135</td> </tr> <tr> <td>28</td> <td>2424</td> </tr> </tbody> </table>	Edad (días)	Resistencia a Compresión (psi)	7	1694	14	2135	28	2424
Edad (días)	Resistencia a Compresión (psi)															
7	1694															
14	2135															
28	2424															
Edad, días	7		14		28											
Peso, Kgs.	4.615	4.635	4.665	4.685	4.595	4.684	4.65									
Longitud, Cms.	20.55	20.63	20.65	20.667	20.58	20.62	20.592									
Diámetro, Cms.	10.825	10.825	10.825	10.825	10.825	10.825	10.825									
Área, Cm ²	92.03	92.03	92.03	92.03	92.03	92.03	92.03									
Volumen, M ³	0.00189	0.0019	0.0019	0.0019	0.00189	0.0019	0.0019									
Carga Aplicada, Lbs.	23465	24815	30270	30640	33639	35030	34845									
Carga Aplicada, Kgs.	10642	11254	13728	13896	15256	15887	15803									
Resistencia a Compresión	Kg./Cm ²	116	122	149	151	166	173	172								
	Promedio	119		150		170										
	PSI	1651	1736	2120	2149	2362	2462	2448								
	Promedio	1694		2135		2424										

- Reproducción 3.

Reproducción 3																
No. Cilindro	MS R3	MS R 3-1	MS R 3-2	MS R 3-3	MS R 3-4	MS R 3-5	MS R 3-6	Desarrollo de Resistencia								
Fecha de Elaboración	20/7/2017															
Fecha de ruptura	27/7/2017		3/8/2017		17/8/2017			<p style="text-align: center;">Resistencia Compresión vs Edad</p> <table border="1"> <caption>Data for Resistencia Compresión vs Edad</caption> <thead> <tr> <th>Edad, días</th> <th>Resistencia a Compresión, psi</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7</td> <td>1765</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>2128</td> </tr> <tr> <td>28</td> <td>2353</td> </tr> </tbody> </table>	Edad, días	Resistencia a Compresión, psi	7	1765	14	2128	28	2353
Edad, días	Resistencia a Compresión, psi															
7	1765															
14	2128															
28	2353															
Edad, días	7		14		28											
Peso, Kgs.	4.675	4.625	4.66	4.655	4.595	4.645	4.66									
Longitud, Cms.	20.45	20.53	20.453	20.35	20.433	20.5	20.7									
Diámetro, Cms.	10.825	10.825	10.825	10.825	10.825	10.825	10.825									
Área, Cm ²	92.03	92.03	92.03	92.03	92.03	92.03	92.03									
Volumen, M ³	0.00188	0.00189	0.00188	0.00187	0.00188	0.00189	0.00191									
Carga Aplicada, Lbs.	25137	25072	30061	30580	33110	33432	34174									
Carga Aplicada, Kgs.	11400	11371	13633	13868	15016	15162	15498									
Resistencia a Compresión	Kg./Cm ²	124	124	148	151	163	165		168							
	Promedio	124		150		165										
	PSI	1765	1765	2106	2149	2319	2348	2391								
	Promedio	1765		2128		2353										

- Reproducción 4.

Reproducción 4																
No. Cilindro	MS R4	MS R 4-1	MS R 4-2	MS R 4-3	MS R 4-4	MS R 4-5	MS R 4-6	Desarrollo de Resistencia								
Fecha de Elaboración	21/7/2017															
Fecha de ruptura	28/7/2017		4/8/2017		18/8/2017			<p style="text-align: center;">Resistencia Compresión vs Edad</p> <table border="1"> <caption>Data for Resistencia Compresión vs Edad</caption> <thead> <tr> <th>Edad, dias</th> <th>Resistencia a Compresión, psi</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7</td> <td>1729</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>2163</td> </tr> <tr> <td>28</td> <td>2149</td> </tr> </tbody> </table>	Edad, dias	Resistencia a Compresión, psi	7	1729	14	2163	28	2149
Edad, dias	Resistencia a Compresión, psi															
7	1729															
14	2163															
28	2149															
Edad, días	7		14		28											
Peso, Kgs.	4.71	4.645	4.655	4.64	4.675	4.665	4.645									
Longitud, Cms.	20.61	20.58	20.435	20.56	20.63	20.59	20.69									
Diámetro, Cms.	10.825	10.825	10.825	10.825	10.825	10.825	10.825									
Área, Cm ²	92.03	92.03	92.03	92.03	92.03	92.03	92.03									
Volumen, M ³	0.0019	0.00189	0.00188	0.00189	0.0019	0.00189	0.0019									
Carga Aplicada, Lbs.	25114	24157	30678	30984	30885	30671	30479									
Carga Aplicada, Kgs.	11390	10956	13913	14052	14007	13910	13823									
Resistencia a Compresión	Kg./Cm ²	124	119	151	153	152	151		150							
	Promedio	122		152		151										
	PSI	1765	1693	2149	2177	2163	2149	2135								
	Promedio	1729		2163		2149										

- Reproducción 5.

Reproducción 5																
No. Cilindro	MS R5	MS R 5-1	MS R 5-2	MS R 5-3	MS R 5-4	MS R 5-5	MS R 5-6	Desarrollo de Resistencia								
Fecha de Elaboración	24/7/2017															
Fecha de ruptura	31/7/2017		7/8/2017		21/8/2017			<p>Resistencia Compresión vs Edad</p> <table border="1"> <caption>Data for Resistencia Compresión vs Edad</caption> <thead> <tr> <th>Edad, días</th> <th>Resistencia a Compresión, psi</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7</td> <td>1772</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>2142</td> </tr> <tr> <td>28</td> <td>2481</td> </tr> </tbody> </table>	Edad, días	Resistencia a Compresión, psi	7	1772	14	2142	28	2481
Edad, días	Resistencia a Compresión, psi															
7	1772															
14	2142															
28	2481															
Edad, días	7		14		28											
Peso, Kgs.	4.645	4.67	4.63	4.683	4.63	4.67	4.74									
Longitud, Cms.	20.55	20.62	20.65	20.45	20.4	20.6	20.5									
Diámetro, Cms.	10.825	10.825	10.825	10.825	10.825	10.825	10.825									
Área, Cm ²	92.03	92.03	92.03	92.03	92.03	92.03	92.03									
Volumen, M ³	0.00189	0.0019	0.0019	0.00188	0.00188	0.0019	0.00189									
Carga Aplicada, Lbs.	25173	25446	30385	30714	34605	35376	36173									
Carga Aplicada, Kgs.	11416	11540	13780	13929	15694	16044	16405									
Resistencia a Compresión	Kg./Cm ²	124	125	150	151	171	174	178								
	Promedio	125		151		174										
	PSI	1765	1779	2135	2149	2433	2476	2533								
	Promedio	1772		2142		2481										

Anexo 6.3. Resistencia a Flexión de Mezcla seleccionada (M-11´A).

- **Reproducción 1.**

Reproducción 1						Desarrollo de Resistencia								
No. Cilindro	MOR 1-1	MOR 1-2	MOR 1-3	MOR 1-4	MOR 1-5	<p>Resistencia Flexión vs Edad</p> <table border="1"> <caption>Data for Resistencia Flexión vs Edad</caption> <thead> <tr> <th>Edad, días</th> <th>Resistencia a Flexión, psi</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7</td> <td>302</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>373</td> </tr> <tr> <td>28</td> <td>487</td> </tr> </tbody> </table>	Edad, días	Resistencia a Flexión, psi	7	302	14	373	28	487
Edad, días	Resistencia a Flexión, psi													
7	302													
14	373													
28	487													
Fecha de Elaboración	17/7/2017													
Fecha de ruptura	24/7/2017	31/7/2017		14/8/2017										
Edad, días	7	14		28										
Longitud de Claro (L), Pulg.	17.72	17.72	17.72	17.72	17.72									
Profundidad (d), Pulg.	6	6	6	6	6									
Ancho (b), Pulg.	6	6	6	6	6									
Sección, Pulg ²	36	36	36	36	36									
Volumen, M ³	0.01045	0.01045	0.01045	0.01045	0.01045									
Carga Aplicada, Lbs.	3681	4437	4656	5827	6046									
Carga Aplicada, Kgs.	1669	2012	2112	2643	2742									
Resistencia a Flexión	PSI	302	364	382	478	496								
	Promedio	302	373		487									
	Kg./Cm ²	21	26	27	34	35								
	Promedio	21	27		35									

- Reproducción 2.

Reproducción 2						Desarrollo de Resistencia								
No. Cilindro	MO R 2-1	MO R 2-2	MO R 2-3	MO R 2-4	MO R 2-5		<p style="text-align: center;">Resistencia Flexión vs Edad</p> <table border="1"> <caption>Data for Resistencia Flexión vs Edad</caption> <thead> <tr> <th>Edad (días)</th> <th>Resistencia a Flexión (psi)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7</td> <td>297</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>361</td> </tr> <tr> <td>28</td> <td>475</td> </tr> </tbody> </table>	Edad (días)	Resistencia a Flexión (psi)	7	297	14	361	28
Edad (días)	Resistencia a Flexión (psi)													
7	297													
14	361													
28	475													
Fecha de Elaboración	17/7/2017													
Fecha de ruptura	24/7/2017	31/7/2017		14/8/2017										
Edad, días	7	14		28										
Longitud de Claro (L), Pulg.	17.72	17.72	17.72	17.72	17.72									
Profundidad (d), Pulg.	6	6	6	6	6									
Ancho (b), Pulg.	6	6	6	6	6									
Sección, Pulg ²	36	36	36	36	36									
Volumen, M ³	0.01045	0.01045	0.01045	0.01045	0.01045									
Carga Aplicada, Lbs.	3620	4376	4413	5839	5741									
Carga Aplicada, Kgs.	1642	1985	2001	2648	2604									
Resistencia a Flexión	PSI	297	359	362	479	471								
	Promedio	297	361		475									
	Kg./Cm ²	21	25	25	34	33								
	Promedio	21	25		34									

- Reproducción 3.

Reproducción 3						Desarrollo de Resistencia								
No. Cilindro	MO R 3-1	MO R 3-2	MO R 3-3	MO R 3-4	MO R 3-5									
Fecha de Elaboración	20/7/2017					<p>Resistencia Flexión vs Edad</p> <table border="1"> <caption>Data for Resistencia Flexión vs Edad</caption> <thead> <tr> <th>Edad, días</th> <th>Resistencia a Flexión, psi</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7</td> <td>313</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>369</td> </tr> <tr> <td>28</td> <td>469</td> </tr> </tbody> </table>	Edad, días	Resistencia a Flexión, psi	7	313	14	369	28	469
Edad, días	Resistencia a Flexión, psi													
7	313													
14	369													
28	469													
Fecha de ruptura	27/7/2017	3/8/2017		17/8/2017										
Edad, días	7	14		28										
Longitud de Claro (L), Pulg.	17.72	17.72	17.72	17.72	17.72									
Profundidad (d), Pulg.	6	6	6	6	6									
Ancho (b), Pulg.	6	6	6	6	6									
Sección, Pulg ²	36	36	36	36	36									
Volumen, M ³	0.01045	0.01045	0.01045	0.01045	0.01045									
Carga Aplicada, Lbs.	3815	4413	4583	5790	5644									
Carga Aplicada, Kgs.	1730	2001	2078	2626	2560									
Resistencia a Flexión	PSI	313	362	376	475	463								
	Promedio	313	369		469									
	Kg./Cm ²	22	25	26	33	33								
	Promedio	22	26		33									

- Reproducción 4.

Reproducción 4						Desarrollo de Resistencia								
No. Cilindro	MO R 4-1	MO R 4-2	MO R 4-3	MO R 4-4	MO R 4-5	<p style="text-align: center;">Resistencia Flexión vs Edad</p> <table border="1"> <caption>Data for Resistencia Flexión vs Edad</caption> <thead> <tr> <th>Edad, días</th> <th>Resistencia a Flexión, psi</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7</td> <td>317</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>364</td> </tr> <tr> <td>28</td> <td>475</td> </tr> </tbody> </table>	Edad, días	Resistencia a Flexión, psi	7	317	14	364	28	475
Edad, días	Resistencia a Flexión, psi													
7	317													
14	364													
28	475													
Fecha de Elaboración	21/7/2017													
Fecha de ruptura	28/7/2017	4/8/2017		18/8/2017										
Edad, días	7.00	14.00		28.00										
Longitud de Claro (L), Pulg.	17.72	17.72	17.72	17.72	17.72									
Profundidad (d), Pulg.	6	6	6	6	6									
Ancho (b), Pulg.	6	6	6	6	6									
Sección, Pulg ²	36	36	36	36	36									
Volumen, M ³	0.01045	0.01045	0.01045	0.01045	0.01045									
Carga Aplicada, Lbs.	3864	4400	4474	5753	5812									
Carga Aplicada, Kgs.	1752	1995	2029	2609	2636									
Resistencia a Flexión	PSI	317	361	367	472	477								
	Promedio	317	364		475									
	Kg./Cm ²	22	25	26	33	34								
	Promedio	22	26		34									

- Reproducción 5.

Reproducción 5						Desarrollo de Resistencia								
No. Cilindro	MO R 5-1	MO R 5-2	MO R 5-3	MO R 5-4	MO R 5-5									
Fecha de Elaboración	24/7/2017					<p>Resistencia Flexión vs Edad</p> <table border="1"> <caption>Data for Resistencia Flexión vs Edad</caption> <thead> <tr> <th>Edad, días</th> <th>Resistencia a Flexión, psi</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7</td> <td>335</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>371</td> </tr> <tr> <td>28</td> <td>459</td> </tr> </tbody> </table>	Edad, días	Resistencia a Flexión, psi	7	335	14	371	28	459
Edad, días	Resistencia a Flexión, psi													
7	335													
14	371													
28	459													
Fecha de ruptura	31/7/2017	7/8/2017		21/8/2017										
Edad, días	7.00	14.00		28.00										
Longitud de Claro (L), Pulg.	17.72	17.72	17.72	17.72	17.72									
Profundidad (d), Pulg.	6	6	6	6	6									
Ancho (b), Pulg.	6	6	6	6	6									
Sección, Pulg ²	36	36	36	36	36									
Volumen, M ³	0.01045	0.01045	0.01045	0.01045	0.01045									
Carga Aplicada, Lbs.	4083	4426	4612	5571	5610									
Carga Aplicada, Kgs.	1852	2007	2092	2527	2544									
Resistencia a Flexión	PSI	335	363	378	457	460								
	Promedio	335	371		459									
	Kg./Cm ²	24	26	27	32	32								
	Promedio	24	27		32									

Anexo 6.4. Ensayo de Permeabilidad en mezcla seleccionada (**Mezcla 11'A**).

El cálculo del coeficiente de permeabilidad (k) se realizó con la ecuación propuesta por Henry Darcy, aplicable a suelos gruesos (Gravas y arenas gruesas) medidos mediante el Permeámetro de Carga Constante. Puesto que, el procedimiento propuesto por Neithalath, para medir el coeficiente de permeabilidad aún está siendo investigado para normalizar este procedimiento de ensayo al concreto permeable.

Ecuación [†]	Donde
$V = kAt$ Expresión: $K = \frac{VL}{hAt}$	K: Coeficiente de permeabilidad, Cm/seg. V: Volumen de agua, M ³ h: Carga hidráulica, A: Área de la muestra, M ² L: Longitud de la muestra, Mt. t: Tiempo que pasa la cantidad de agua, seg.

[†]Esta ecuación es aplicable a suelos gruesos (Grava, arena gruesa), puesto que en suelos poco permeables (limos, arena fina o mezclas de estos materiales) el tiempo de prueba se hace tan largo que deja de ser práctico.

Permeabilidad de cilindros de Concreto Permeable

Rango de permeabilidad permitido por ACI 522 R10: 81 a 730 L/min/m² o 192 a 1724 in/h (0.14 a 1.22 cm/s).



Figura A-9. Ensayo de permeabilidad en laboratorio del Concreto Permeable.

Fuente: Fotografía tomada en Bo. Costa Rica, Managua, Agosto, 2017.

Anexo 6.4.1. Mezcla Seleccionada³ (Mezcla 11'A_ Reproducida 5 veces).

Permeabilidad de Cilindros 4" x 6"								
Mezcla Óptima	% Vacios	Tiempo Promedio (seg.)	Sección de Cilindro, M ²	Vol. Agua Recolectado, M ³	Permeabilidad, mm/seg.	Permeabilidad, Lt./min./M ²	Permeabilidad Promedio	
							mm /seg.	Lt./min./M ²
R-1	25%	180.00	0.0092	0.00775	2.10	281	2.08	278
		180.00	0.0092	0.00762	2.07	276		
R-2		180.00	0.0092	0.00713	1.93	258	2.13	285
		180.00	0.0092	0.00859	2.33	311		
R-3		180.00	0.0092	0.00792	2.15	287	1.95	261
		180.00	0.0092	0.00647	1.75	234		
R-4		180.00	0.0092	0.00719	1.95	260	2.03	272
		180.00	0.0092	0.00781	2.12	283		
R-5		180.00	0.0092	0.00751	2.04	272	1.95	261
		180.00	0.0092	0.00691	1.87	250		

³ La mezcla óptima se diseñó con un contenido de finos del 15%.

Anexo 6.5. Determinación de la tasa de infiltración del concreto permeable colocado en mezcla seleccionada (Mezcla 11'A).

Calculo	
Ecuación para el cálculo de tasa de infiltración (I)	
$I = \frac{KM}{(D^2Xt)}$	

En donde

I = Tasa de infiltración, mm/h (pulg/h)

M = Masa de infiltración de agua, kg (lb)

D = Diámetro interior del anillo de infiltración, mm (pulg)

t = Tiempo requerido para que una cantidad medida de agua se infiltre en el concreto, (s)

K = 4, 583, 666,000 en el Sistema Internacional o 126,870 en el Sistema Pulgada-Libra.

Variables de entrada		
Unidad utilizada	Sistema Internacional	Sistema Ingles
K	4583666000	126870
Masa de infiltración (M), Kg.	18	8.16
Diámetro del anillo (D), mm	188	7.4

Calculo de Tasa de Infiltración, I			
Tiempo, seg.		Tasa de infiltración	
		mm/h	pulg/h
Tiempo 1	59.8	39, 036	316
Tiempo 2	58.71	39, 761	322
Tasa de infiltración promedio		39, 399	319



Figura A-10. Prueba de infiltración en losa con dimensión de 0.50 mt. x 0.50 mt. según ASTM C 1701-09.

Fuente: Fotografía tomada en Bo. Costa Rica, Managua, Agosto, 2017.

Anexo 6.6. Resistencia potencial a la degradación por impacto y abrasión en mezcla seleccionada (Mezcla 11'A _Reproducida 5 veces).

Mezcla Óptima	Código Pastilla	Peso de Pastilla, kg.	W. Inicial, Kg.	W. material Ret. En tamiz de 1", Kg.	Pérdida de Peso, Kg.	Porcentaje Desgaste
Rep.- 1	MO 1-1	1.783	5.366	4.218	1.148	21.00%
	MO 1-2	1.818				
	MO 1-3	1.765				
Rep.- 2	MO 2-1	1.867	5.467	4.145	1.322	24.00%
	MO 2-2	1.842				
	MO 2-3	1.758				
Rep.- 3	MO 3-1	1.838	5.356	4.015	1.341	25.00%
	MO 3-2	1.727				
	MO 3-3	1.791				
Rep.- 4	MO 4-1	1.849	5.384	4.073	1.336	25.00%
	MO 4-2	1.731				
	MO 4-3	1.804				
Rep.- 5	MO 5-1	1.878	5.513	4.203	1.310	24.00%
	MO 5-2	1.82				
	MO 5-3	1.815				



Figura A-11. Ensayo de Resistencia a la degradación según ASTM C 1747.

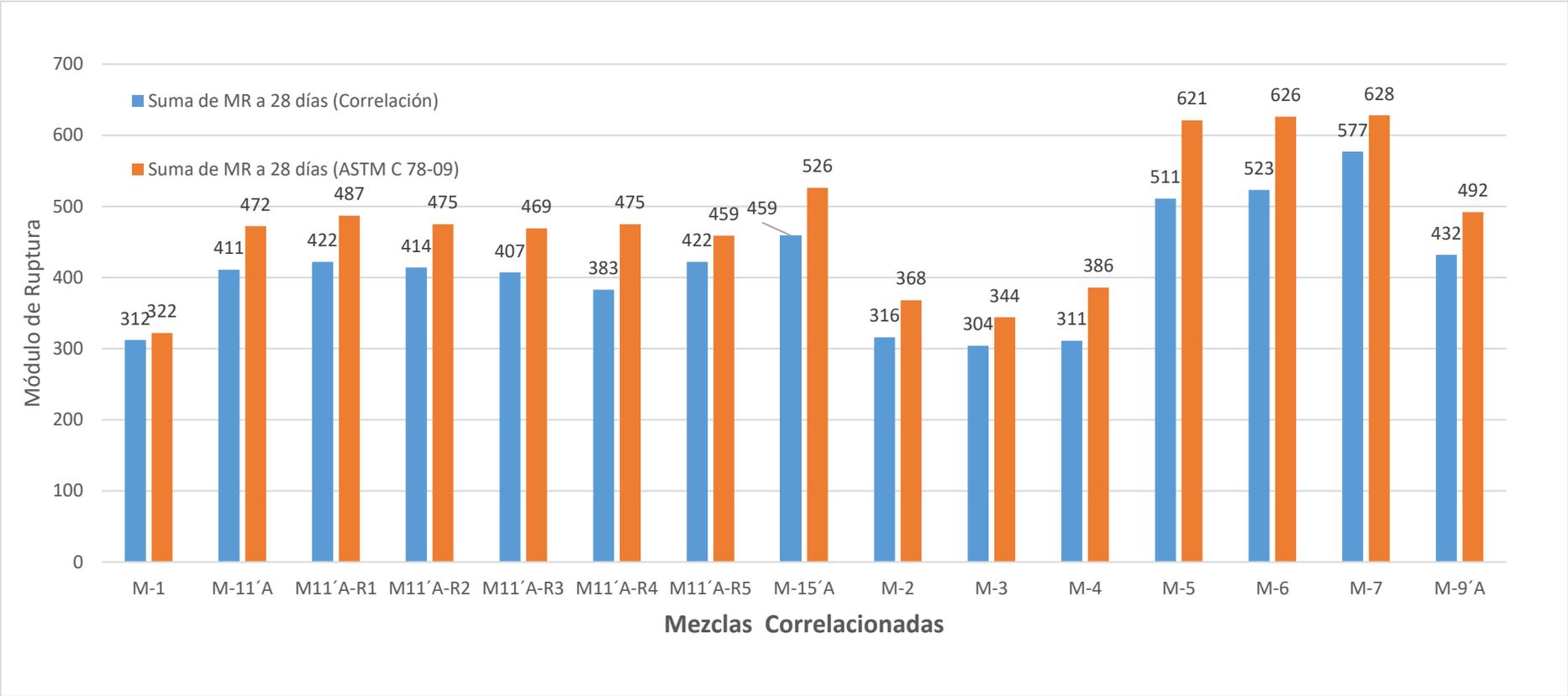
Fuente: Fotografía tomada en Laboratorio Lamsa Ing. Consultores, Managua, Agosto, 2017.

Anexo 7:
**Verificación de Ecuación de
correlación propuesta por Ahmad
y Shah (1985).**

Para verificar si la ecuación propuesta por Ahmad y Shah (1985) proporciona resultados aceptables de Módulo de ruptura (MR), se compararon los resultados de resistencia a flexión en las 7 mezclas de prueba, obtenidos directamente mediante el ensayo de vigas según ASTM C 78-09 y los valores derivados de la **Ecuación 14 (pág. 41)**, que se obtienen mediante la correlación de la resistencia a compresión de cilindros de concreto permeable.

Edad	7 días			14 días			28 días		
Mezclas	"F'c", psi	Módulo Ruptura, psi		"F'c", psi	Módulo Ruptura, psi		Módulo Ruptura, psi		
		ASTM C 78	Ecuación Correlación		ASTM C 78	Ecuación Correlación	ASTM C 78	Ecuación Correlación	
M-1	932	253	219	1106	284	246	1332	322	312
M-2	1114	283	247	1517	345	304	1614	368	316
M-3	1063	278	240	1246	323	266	1519	344	304
M-4	1037	287	236	1461	364	296	1571	386	311
M-5	2416	349	414	2880	542	466	3310	621	511
M-6	2333	383	405	2882	503	466	3431	626	523
M-7	2960	509	474	3565	538	537	3977	628	577
M-9'A	1857	302	347	2284	397	399	2577	492	432
M-11'A	1402	294	288	1779	356	338	2388	472	411
M-15'A	2149	412	383	2633	457	439	2816	526	459
M11'A-R1	1708	302	329	2163	373	385	2482	487	422
M11'A-R2	1691	297	326	2135	361	381	2414	475	414
M11'A-R3	1765	313	336	2128	369	381	2352	469	407
M11'A-R4	1729	317	331	2163	364	385	2148	475	383
M11'A-R5	1772	335	337	2139	371	382	2481	459	422

Como puede observarse en la siguiente figura, los valores de resistencia a flexión obtenidos mediante la aplicación de la ecuación de correlación, son cercanos a los medidos por ASTM C 78-09. De igual manera, para las mezclas ajustadas y la mezcla seleccionada. Aunque en las mezclas fabricadas con un 30% de agregado fino (M-5 y M-6), presentan valores superiores en 100 psi, cuando se obtiene directamente mediante el ensayo a flexión.



Valores de Módulos de ruptura (MR) de las 18 mezclas fabricadas, obtenidas mediante la correlación con la resistencia a compresión a distintas edades: 7, 14 y 28 días.

Edad	7 días		14 días		28 días	
Mezclas	"F'c", psi	Módulo Ruptura, psi	"F'c", psi	Módulo Ruptura, psi	"F'c", psi	Módulo Ruptura, psi
		Ecuación Correlación		Ecuación Correlación		Ecuación Correlación
M-1'	1143	251	1459	296	1971	362
M-2'	1509	303	1753	334	2219	391
M-3'	1821	343	1845	346	2396	412
M-4'	1094	244	1376	285	1764	336
M-5'	1137	251	1441	293	2030	369
M-6'	1274	270	1670	324	2197	389
M-7'	1400	288	1866	349	2121	380
M-8'	2153	383	2480	421	2725	449
M-9'	2460	419	2734	450	3012	480
M-10'	1493	300	1824	343	2073	374
M-11'	1606	315	1917	355	2591	434
M-12'	2233	393	2363	408	2737	450
M-13'	1764	336	2136	381	2484	422
M-14'	1928	356	2331	404	2878	465
M-15'	2316	403	2692	445	3130	492
M-16'	1681	325	2046	371	2396	412
M-17'	1693	327	2301	401	2645	440
M-18'	2060	372	2478	421	2985	477