



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERA CIVIL**

TEMA:

**“DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, COMPRESIÓN
Y FLEXIÓN, PARA DISTINTAS RELACIONES DE A/C EN LA
ELABORACIÓN DE HORMIGÓN PERMEABLE.”**

Autor: Alejandra Micaela Shambi Minda

Tutor: Ing. Carlos Patricio Navarro Peñaherrera, Mg.

AMBATO - ECUADOR

Agosto - 2023

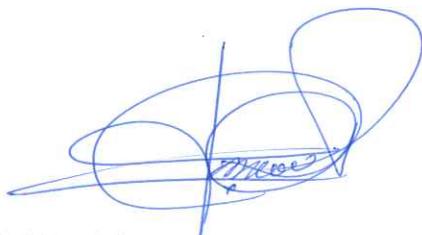
APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo Experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniera Civil, con el tema: **“DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, COMPRESIÓN Y FLEXIÓN, PARA DISTINTAS RELACIONES DE A/C EN LA ELABORACIÓN DE HORMIGÓN PERMEABLE”**, elaborado por la Srta. Alejandra Micaela Shambi Minda, portadora de la cédula de ciudadanía C.I. 1850179480, estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ambato, agosto 2023



.....
Ing. Carlos Patricio Navarro Peñaherrera, Mg.

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Alejandra Micaela Shambi Minda, con C.I. 1850179480 declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente Trabajo Experimental con el tema: **“DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, COMPRESIÓN Y FLEXIÓN, PARA DISTINTAS RELACIONES DE A/C EN LA ELABORACIÓN DE HORMIGÓN PERMEABLE”**, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autora del trabajo, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, agosto 2023



.....

Alejandra Micaela Shambi Minda

C.I. 1850179480

AUTORA

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y proceso de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo Experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, agosto 2023



.....
Alejandra Micaela Shambi Minda

C.I. 1850179480

AUTORA

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueba el informe del Trabajo Experimental realizado por la estudiante Alejandra Micaela Shambi Minda de la Carrera de Ingeniería Civil bajo el tema: **“DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, COMPRESIÓN Y FLEXIÓN, PARA DISTINTAS RELACIONES DE A/C EN LA ELABORACIÓN DE HORMIGÓN PERMEABLE”**.

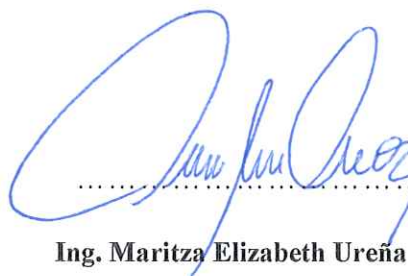
Ambato, agosto 2023

Para constancia firma:



Ing. Wladimir José Ramírez Cabrera, Mg.

MIEMBRO CALIFICADOR



Ing. Maritza Elizabeth Ureña Aguirre, Mg.

MIEMBRO CALIFICADOR

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mis padres por el esfuerzo que han realizado no solo conmigo sino también con mis hermanos. A mis hermanos, Verónica, Gabriel y José por ser parte importante de mi vida y por su cariño.

AGRADECIMIENTO

A mis padres por ser un apoyo incondicional, por su cariño y enseñanzas a lo largo de mi vida.

A mis hermanos por estar para mí en cada momento que los necesité.

A mis tíos maternos por ayudarme y explicarme cuando no entendía algún tema, sin importar la hora en que les preguntara.

A mi abuela por ser mi motivación diaria.

A los docentes por los conocimientos que me han impartido a lo largo de mi vida estudiantil.

A mi amiga Anahí Zapata por haberme ayudado durante toda la realización de esta investigación.

A mi tutor de tesis por su ayuda para realizar el presente trabajo.

A mis compañeros y amigos por hacer de esta etapa tan amena.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xii
RESUMEN EJECUTIVO	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	1
1.1. Antecedentes Investigativos.....	1
1.1.1. Antecedentes	1
1.1.2. Hipótesis	6
1.2. Justificación.....	7
1.3. Objetivos	8
1.3.1. Objetivo General.....	8
1.3.2. Objetivos Específicos.....	8
CAPÍTULO II: METOLOGÍA	9
2.1. Materiales	9
2.2. Métodos	18
2.2.1. Etapa 1: Preliminares	18
2.2.2. Etapa 2: Determinación de permeabilidad.....	23

2.2.3.	Etapa 3: Resistencia a compresión.....	26
2.2.4.	Etapa 4: Resistencia a flexión	27
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN		31
3.1.	Análisis y discusión de resultados.....	31
3.1.1.	Determinación del tamaño de la grava.....	31
3.1.2.	Determinación de permeabilidad	36
3.1.3.	Comparación de resistencia a compresión.....	41
3.1.4.	Determinación de resistencia a flexión	46
3.2.	Verificación de la hipótesis	53
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		54
4.1.	Conclusiones	54
4.2.	Recomendaciones.....	55
MATERIAL DE REFERENCIA		56
Referencias Bibliográficas		56
ANEXOS		61
Anexo 1. Densidad real del cemento		61
Anexo 2. Análisis Granulométrico del agregado fino.....		62
Anexo 3. Análisis Granulométrico del agregado grueso		63
Anexo 4. Densidad real y capacidad de absorción del agregado fino.....		64
Anexo 5. Densidad real y capacidad de absorción del agregado grueso 3/4" ...		65
Anexo 6. Densidad real y capacidad de absorción del agregado grueso 1/2" ...		66
Anexo 7. Densidad real y capacidad de absorción del agregado grueso 3/8" ...		67
Anexo 8. Densidad aparente y compactada del agregado fino y grueso		68
Anexo 9. Densidad aparente y compactada del agregado grueso tamizado		69
Anexo 10. Dosificación para agregado grueso 3/4".....		70
Anexo 11. Dosificación para agregado grueso 1/2".....		71
Anexo 12. Dosificación para agregado grueso 3/8".....		72

Anexo 13. Dosificación 1C.....	73
Anexo 14. Dosificación 2C.....	74
Anexo 15. Dosificación 1V.....	75
Anexo 16. Dosificación 2V.....	76
Anexo 17. Cálculo de permeabilidad y contenido de vacíos	77
Anexo 18. Reporte ensayo a flexión	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mina "Puerta del Sol"	18
Figura 2 Asentamiento.....	22
Figura 3 Permeámetro de carga variable de Neithenatath	23
Figura 4 Preparación de cilindros para ensayo de permeabilidad.....	24
Figura 5 Permeámetro de carga variable	25
Figura 6 Ensayo a compresión.....	27
Figura 7 Ensayo a flexión	28
Figura 8 Coeficiente de permeabilidad.....	32
Figura 9 Proyección de resistencia a compresión 1	34
Figura 10 Proyección resistencia a compresión 2.....	34
Figura 11 Comparación permeabilidad vs Proyección de resistencia	35
Figura 12 Coeficiente de permeabilidad promedio.....	37
Figura 13 Contenido de vacíos promedio	39
Figura 14 Contenido de vacíos vs Permeabilidad.....	40
Figura 15 Comparación Resistencia 7 días.....	43
Figura 16 Comparación resistencia 28 días	43
Figura 17 Resistencia vs Contenido de vacíos.....	45
Figura 18 Resistencia vs Permeabilidad	46
Figura 19 Diagrama carga vs deflexión 1V	47
Figura 20 Diagrama carga vs deflexión	48
Figura 21 Comparación de energía de fractura.....	50
Figura 22 Módulos de rotura.....	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Materiales e Instrumentos para propiedades de los agregados	9
Tabla 2 Materiales e Instrumentos para elaboración de probetas	13
Tabla 3 Materiales e instrumentos para cumplimiento de objetivo1	16
Tabla 4 Materiales e instrumentos para cumplimiento del objetivo 2	16
Tabla 5 Materiales e instrumentos para el cumplimiento del objetivo 3	17
Tabla 6 Probetas para determinación del tamaño de partícula.....	23
Tabla 7 Probetas para ensayos de permeabilidad y contenido de vacíos.....	24
Tabla 8 Probetas para ensayos de compresión y permeabilidad.....	26
Tabla 9 Probetas para ensayos de flexión	27
Tabla 10 Resumen de experimentos	29
Tabla 11 Resumen de dosificaciones grava tamizada.....	31
Tabla 12 Permeabilidad probetas de prueba	31
Tabla 13 Resistencia a compresión	33
Tabla 14 Dosificaciones cilindros y vigas	36
Tabla 15 Permeabilidad 28 días	36
Tabla 16 Contenido de vacíos a los 28 días	38
Tabla 17 Porosidad y permeabilidad según Normas.....	41
Tabla 18 Resistencia a la compresión 7 días.....	41
Tabla 19 Resistencia a la compresión 28 días.....	42
Tabla 20 Compresión según la norma.....	44
Tabla 21 Resumen de esfuerzos residuales y deflexión 1V	46
Tabla 22 Resumen de esfuerzos residuales y deflexión 2V	48
Tabla 23 Trabajo y energía de fractura para a/c 0.35.....	50
Tabla 24 Trabajo y energía de fractura para a/c 0.30.....	50
Tabla 25 Comparación flexión con normas	52

RESUMEN EJECUTIVO

El hormigón permeable es empleado usualmente en pavimentos para permitir la filtración del agua con el objetivo de reducir la escorrentía superficial y evitar la interrupción del ciclo del agua. Sin embargo, este material tiene un alto contenido de vacíos, por lo que, sus propiedades mecánicas tienden a ser menores a las del hormigón tradicional.

En la presente investigación se estudió la resistencia a compresión, flexión y la permeabilidad del hormigón permeable, para determinar la influencia de la relación a/c. Para lo cual se determinaron las propiedades de los agregados extraídos de la mina Puertas del Sol, posteriormente se calculó la dosificación para las relaciones a/c de 0.35 y 0.30 empleando el método de ACI 522R-10, además de la utilización de fibras de polipropileno de 50mm y aditivo plastificante. Se elaboraron 12 cilindros (100x200) para cada una, se realizaron ensayos de permeabilidad acorde con ACI 522R-10, además se procedió al ensayo de compresión a los 7 y 28 días acorde con la norma ASTM C39. Posteriormente, se realizaron vigas (100x100x350), siendo 3 probetas por cada dosificación para el ensayo de flexión, siguiendo la norma ASTM C78.

Una vez tabulados los datos, se realizaron gráficas comparativas de las propiedades estudiadas. Esto permitió observar que la resistencia a compresión más alta fue 9.70 MPa con permeabilidad de 0.37 cm/s, correspondientes a a/c de 0.35. En cuanto a flexión, los ensayos determinaron que el módulo de rotura de a/c 0.35 fue de 1.69 MPa, siendo el doble de lo obtenido con a/c 0.30.

Palabras claves: Hormigón permeable, compresión, flexión, permeabilidad, polipropileno.

ABSTRACT

Pervious concrete is usually used in pavements to allow water infiltration in order to reduce surface runoff and avoid interruption of the water cycle. However, this material has a high void content, so its mechanical properties tend to be lower than those of traditional concrete.

In the present investigation, the resistance to compression, flexion and permeability of pervious concrete was studied, to determine the influence of the w/c ratio. For which the properties of the aggregates extracted from the “Puertas del Sol” mine were determined, later the dosage was calculated for the w/c ratios of 0.35 and 0.30 using the ACI 522R-10 method, in addition to the use of 50mm polypropylene fibers and plasticizer additive. 12 cylinders (100x200) were made for each one, permeability tests were carried out according to ACI 522R-10, in addition, the compression test was carried out at 7 and 28 days according to the ASTM C39 standard. Subsequently, beams (100x100x350) were made, with 3 test pieces for each dosage for the bending test, following the ASTM C78 standard.

Once the data was tabulated, comparative graphs of the properties studied were made. This allowed us to observe that the highest compressive strength was 9.70 MPa with a permeability of 0.37 cm/s, corresponding to a w/c of 0.35. Regarding bending, the tests determined that the modulus of rupture of w/c 0.35 was 1.69 MPa, double that obtained with w/c 0.30.

Keywords: Pervious concrete, compression, bending, permeability, polypropylene.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes Investigativos

1.1.1. Antecedentes

Según el reporte ACI 522R-10 [1] el hormigón permeable o poroso es aquel que posee una alta capacidad de filtración. Su particularidad es la baja cantidad de agregado fino en su mezcla, con lo cual se consigue un elevado contenido de poros por los cuales el fluido puede pasar. Para su fabricación se ocupan prácticamente los mismos materiales que en la elaboración de un hormigón tradicional, es decir, cemento portland, agregado pétreo y agua, aunque también puede incluir aditivos. Para conseguir esta alta porosidad en el hormigón se lo realiza con poco agregado fino y mayor porcentaje del agregado grueso, de este modo se obtiene un porcentaje de vacíos superior al convencional, pasando de 1-3% al 15-35%.

Este material ha sido empleado por un aproximado de 150 años. En un inicio se utilizaba para la construcción de casas en Inglaterra y Escocia, en el cual los materiales empleados eran cemento, grava y agua. Sin embargo, no fue hasta mediados del siglo XX que se popularizó en Europa debido a las Guerras Mundiales que destruyeron al continente, generando la necesidad de reconstruir diversos lugares, lo cual llevó a que experimente con el material, llegando a construir edificios de hasta 10 pisos. [1]

Su popularidad de debió principalmente a que, en Alemania existía una demanda fuerte de ladrillos, no obstante, la industria no era capaz de satisfacer esta necesidad, por lo que se realizaron estudios sobre las propiedades del hormigón permeable, que posteriormente produjeron la adopción del mismo como material de construcción. A pesar de ser un material muy usado en Europa, no fue hasta la época de 1960 que fue empleado en Norteamérica, específicamente en Toronto y Ottawa para la construcción de casas.[1]

Durante la década de 1980 se introdujo en Japón como un material sustentable. Mientras que en Estados Unidos y Europa también lo ha empleado por sus grandes ventajas de controlar la escorrentía superficial y restauración de agua subterránea. En Australia, este material es utilizado para controlar el agua lluvia de modo que es recolectada para

posteriormente ser filtrada y aprovechada como agua de riego, lo cual ha beneficiado al riego de espacios verdes en sectores urbanos.[1]

En el año 2002, el *American Concrete Institute (ACI)* publicó el reporte ACI 522R-02, que ha sido actualizado en 2010, en cual consta una explicación sobre la historia, ventajas, desventajas, aplicaciones, diseño y ensayos del hormigón permeable. Adicionalmente, el subcomité ASTM C09.49, en 2009, publicó la metodología a seguir para los ensayos de compresión, flexión, contenido de vacíos e infiltración.

Si bien el hormigón permeable no es una tecnología nueva, actualmente se han realizado diversas investigaciones alrededor del mundo para la determinación de sus propiedades e incluso su viabilidad como un material amigable con el ambiente para la construcción de camineras, aceras, canchas deportivas, estacionamientos, pavimento en calles de tráfico bajo o incluso como reemplazo de base granular.

En el artículo científico “*Investigation on the properties of porous concrete as road base material*” [2] se estudió las propiedades del hormigón poroso con presencia de agregado fino y cenizas, además se realizó una comparación con las propiedades de materiales para base granular. Los resultados obtenidos muestran que el agregado fino puede aumentar la resistencia a compresión, así como su durabilidad, además también se observó que las cenizas pueden mejorar la resistencia a la compresión y resistir de mejor manera la contracción en seco, por lo que en ambos casos podría ser utilizado como base granular de calles, específicamente en esta investigación se realizó para la implementación de ciudades esponja en China. [2]

Por otra parte, el estudio “*Correlation between permeability and porosity for pervious concrete (PC)*” tuvo el objetivo de estudiar la relación entre sus propiedades mecánicas, para lo cual se emplearon 3 agregados de escombros con una relación a/c de 0.34 en todas las muestras. Los ensayos realizados fueron compresión, flexión, porosidad y permeabilidad. Dando como resultado, que es posible la realización de hormigón permeable con materiales reciclados ya que las resistencias obtenidas oscilan entre 3.3 a 11 MPa, valores comunes en este tipo de hormigón; y en cuanto a la porosidad variaba entre 19.1 y 28.6% con una permeabilidad de 4 a 15.3 mm/s, siendo que estas dos

propiedades poseen una relación directa. Debido a ello sus autores concluyen que es posible realizar hormigón permeable con agregado sustentable que cumpla con las propiedades mínimas requeridas para pavimentos que posean bajo tráfico, como estacionamientos [3].

Adicionalmente, en el artículo *“Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete”* se investigó la relación entre el tamaño de los agregados con las propiedades mecánicas, evidenciando que estas poseen una relación inversamente proporcional, ya que el agregado con mayor resistencia a la flexión fue en el que empleo mezcla de agregados de 4 y 8 mm. Sin embargo, también se observó que el tipo de agregado no influye en la permeabilidad sino más bien esta depende del contenido de vacíos presente en la mezcla.[4]

Como se ha observado, el hormigón permeable suele tener una relación inversamente proporcional entre su permeabilidad y su resistencia mecánica, debido a que para conseguir más permeabilidad se debe aumentar la cantidad de poros, pero al hacer eso se disminuye el área efectiva que resiste los esfuerzos. De este modo, uno de los inconvenientes del hormigón permeable es encontrar un equilibrio entre la permeabilidad y su resistencia para satisfacer las necesidades de cada proyecto, por lo cual varios autores han realizado investigaciones sobre la adición de fibras de polipropileno para el aumento de su resistencia.

Por ejemplo, en Bangladesh se realizó una investigación sobre la adición de fibras plásticas en el hormigón permeable, con el propósito de no solo mejorar su resistencia sino, encontrar un nuevo uso a este material contaminante, para ello se realizaron diez mezclas con diferentes porcentajes de fibras las cuales fueron ensayadas a flexión, demostrando que esta propiedad aumentaba al incorporar 1% de fibras, además, que la porosidad y la infiltración también aumentaban. Debido a ello los autores concluyen que las mezclas elaboradas pueden ser empleadas en el área de la construcción.[5]

Del mismo modo, Kharbikar y Pathak, en 2017 realizaron una investigación acerca de la influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del hormigón permeable y su comparación a las de hormigón permeable simple, para lo cual emplearon los volúmenes

recomendados por los fabricantes, que van de 0.15% a 0.2%, siendo valores bajos. Después del ensayo de compresión realizado en tres etapas, a los 7, 14 y 28 días se concluyó que la presencia de las fibras aumentaba la resistencia, no obstante, los valores más altos fueron alcanzados por las probetas que tenían el 0.2% de fibras en su dosificación. [6]

En cuanto a estudios realizados en el continente americano, Blake, Allandadi y Adam en [7] compararon probetas de hormigón permeable con baja resistencia y bajo peso unitario con probetas de alta resistencia y alto peso unitario, con el objetivo de determinar el tamaño de la factura en vigas de 100 y 200 mm de altura. Lo que se obtuvo fue que la resistencia a flexión depende del tamaño de la muestra, sin embargo, no se encontró que la resistencia a tracción dependa de ello.

Según el artículo "*Pervious concrete mixture optimization, physical, and mechanical properties and pavement design: A review*" realizado en Estados Unidos, las propiedades de compresión, flexión y contenido de vacíos no solo se encuentra influenciado por el tamaño del agregado, sino también por los diferentes métodos de compactación, ya que los resultados que se obtuvieron fueron muy amplios, desde los 3 a los 28 MPa en la resistencia a compresión, con un contenido de vacíos entre 15-35%, obteniendo resultados englobados en lo especificado en el reporte. [8]

No obstante, en América del Sur también se han realizado investigaciones sobre el tema, como la realizada por Chaparro, G. realizado en la ciudad de Itapúa en Paraguay, [9] en el que se elaboraron dosificaciones con materiales locales, siendo en total 16 dosificaciones con 96 probetas para compresión y permeabilidad obteniendo resistencias bajas que van desde los 3.5 hasta los 9.5 MPa. Sin embargo, los índices de permeabilidad fueron altos ya que pueden ir desde 200 a los 2000 L/min/m². Además, con estos resultados se observó que la resistencia aumentaba con el aumento de la relación agua/cemento y recomienda que para superar los 9 MPa de resistencia a compresión se deben emplear relaciones a/c superiores a 0.32.

Del mismo modo, en la ciudad de Chiclayo en Perú, se realizó una investigación sobre la incorporación de diferentes porcentajes de arena y aditivos, donde se evaluaron 90

probetas en compresión y 30 para permeabilidad, 60 vigas para flexión, además de realizar en ensayos de abrasión. Los resultados evidenciaron que con el 20% de arena, con grava $\frac{3}{4}$ " y con una relación a/c de 0.30 se obtiene un hormigón apto para aceras, veredas o incluso ciclo vías, aunque el añadir 500 ml del aditivo plastificante mejora considerablemente todas las propiedades. [10]

Por otra parte, según la investigación realizada por Bautista, [11] en Lima, en la cual se modelaron 30 cilindros y 24 vigas con diferentes porcentajes de agregado fino, aquellos especímenes que tenían menor agregado fino poseían menor resistencia a la compresión y flexión, aquellos con 20% de arena tenían mejores resistencias, sin embargo, la misma taponaba los vacíos, por lo que la infiltración baja, obteniendo que el diseño más óptimo fue el que poseía 10% de contenido de vacíos con el 10% de agregado fino y una relación a/c de 0.27.

En la investigación realizada en Lima por Aguilar y Rupay, [12] se realizaron 27 probetas de hormigón permeable con fibras de polipropileno, las longitudes de dichas fibras fueron de 13, 19 y 48 mm. Además, se utilizaron tres tipos de grava, de $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ " y una mezcla entre estas dos. Una vez realizados los ensayos de compresión se evidenció que la adición del 10% del peso del material de fibra de polipropileno permite mejorar esta resistencia hasta un 16%, dado que se obtuvo a la edad de siete días una resistencia de 180 kg/cm². Asimismo, en el ensayo de porosidad se determinó que las fibras de 13 y 19mm no son adecuadas para este tipo de hormigones, puesto que tienden a taponar los vacíos, por lo que los autores recomiendan el empleo de fibras con longitud superiores.

En Ecuador el hormigón permeable es una tecnología nueva y que podría ayudar a gestionar de mejor manera la escorrentía superficial y evitar que el sistema de alcantarillado de algunas ciudades colapse, por lo que algunos autores han realizado investigaciones acerca de su factibilidad de uso, y de su comportamiento con materiales extraídos de las canteras de país.

Para Núñez, el hormigón permeable podría ser utilizado en Quito, debido a que esta ciudad cuenta con un clima variable y cuando hay precipitaciones las calles se tienden a inundar provocando accidentes que pueden llegar a ser mortales. En su investigación realizó

mezclas con poco agregado fino para alcanzar la resistencia necesaria para ser empleado en canchas deportivas en parques, para lo cual elaboró 10 cilindro y 5 vigas para los ensayos de compresión, flexión y permeabilidad, obteniendo que la resistencia más alta proporcionaba menor permeabilidad, adicionalmente la resistencia a flexión obtenida estaba rondando el 15% de la resistencia a compresión y la permeabilidad podría llegar hasta 0.3 cm/s, obteniendo resultados acordes con lo establecido en el reporte ACI 522R-10. [13]

Por otra parte, en la investigación “*Propiedades Mecánicas y de filtración en hormigones permeables con cemento portland e hidráulicos*” se comparó la resistencia de probetas elaboradas con diferentes clases de cementos, el que posee mejor comportamiento es el cemento Portland, pero obteniendo bajos valores de permeabilidad y contenido de vacíos, del mismo modo se determinó que el cemento Portland Puzolánico tipo IP genera los resultados más bajos en compresión, sin embargo, en las otras dos propiedades tiene valores altos. En cuanto a los ensayos a flexión se reflejaba que el porcentaje de vacíos no influenciaba en la resistencia de las vigas.[14]

De la misma manera, en la investigación realizada por Vallejo y Amaguaya, [15] se utilizaron agregados de las minas de “San Andrés” y “Cerro Negro” en la provincia de Chimborazo para la elaboración de hormigón poroso, con los cuales se determinó que los agregados extraídos de la segunda mina poseían mejores características que los provenientes de la primera. También determinaron los materiales óptimos para la mezcla, siendo estos la grava 3/8” ya que posee una resistencia de 217 kg/cm², muy superior a lo establecido en el reporte, y una permeabilidad media. Sin embargo, en esta investigación se emplearon relaciones a/c superiores a lo recomendado.

1.1.2. Hipótesis

La relación a/c influye en las propiedades mecánicas del hormigón permeable.

1.2.Justificación

Una de las propiedades más reconocibles del hormigón tradicional es su baja permeabilidad por lo que es usado en distintas estructuras, como terrazas o incluso al momento de realizar vías, aceras, estacionamientos o áreas deportivas, sin embargo, el abuso de estas, genera aumento en la escorrentía superficial, afectando al ciclo normal del agua, y si esto no es controlado podría generar inundaciones en las zonas bajas de las urbes. Para minimizar las consecuencias generadas por ello, se ha desarrollado una alternativa denominada hormigón permeable. [16]

El hormigón permeable es empleado usualmente en pavimentos para permitir la filtración del agua con el objetivo de reducir la escorrentía superficial, permitir la recarga de aguas subterráneas, control en las inundaciones, evitar la interrupción del ciclo del agua. Para conseguir esta alta porosidad en el hormigón se lo realiza con poco agregado fino y mayor porcentaje del agregado grueso, de este modo se obtiene un porcentaje de vacíos superior al convencional, pasando de 1-3% al 15-35%. [1]

A causa de su alto contenido de vacíos las propiedades mecánicas del hormigón permeable, como la resistencia a compresión y flexión tienden a ser menores a las del hormigón tradicional. Normalmente suele tener una relación inversamente proporcional entre su permeabilidad y su resistencia mecánica, esto se debe a que para conseguir más permeabilidad se debe aumentar la cantidad de poros, pero al hacer eso se disminuye el área efectiva que resiste los esfuerzos. De este modo, uno de los inconvenientes del hormigón permeable es encontrar un equilibrio entre la permeabilidad y su resistencia para satisfacer las necesidades de cada proyecto. [17]

Esta tecnología es poco usada en el país, por lo que en la presente investigación se realizaron probetas y vigas utilizando material pétreo obtenido de la mina “Puerta del Sol” con las cuales se evaluaron las propiedades de compresión, flexión, permeabilidad y contenido de vacíos, además se emplearon fibras de polipropileno para mejorar las propiedades mecánicas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Evaluar las propiedades mecánicas para distintas relaciones a/c en la elaboración de hormigón permeable.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar el índice de permeabilidad del hormigón.
- Comparar el comportamiento a compresión para distintas relaciones a/c del hormigón.
- Analizar la resistencia a flexión para distintas relaciones a/c del hormigón.

CAPÍTULO II: METOLOGÍA

2.1. Materiales

En la realización de la presente investigación se emplearon materiales y equipos acorde con la normativa ASTM e INEN.

Previo al cumplimiento de los objetivos se realizó una fase preliminar en la cual se emplearon los siguientes materiales y equipos para cada ensayo realizado.

Tabla 1 Materiales e Instrumentos para propiedades de los agregados

Ensayo	Normativa	Material/Equipo
Análisis granulométrico del agregado fino	ASTM C 136 NTE INEN 696	Arena Es el material pétreo de dimensiones inferiores a los 4.75 mm, pero superior a los 0.075mm. [18] Origen: Mina “Puerta del Sol” Tipo: Natural Cumple con la normativa: NTE INEN 872
		Serie de tamices con abertura: 3/8”, #4, #8, #16, #30, #50, #100, #200. Usados para separar los áridos por el tamaño de partícula. Origen: Laboratorio de Ingeniería Civil Material: Metal Geometría: Redondo Diámetro: 25 cm
		Tamizadora eléctrica Máquina que permite agitar los tamices para clasificar las partículas según el tamaño de manera mecánica. Marca: Controls

		Balanza electrónica Precisión: 0.01 gramo Capacidad máx: 30kg
Análisis granulométrico del agregado grueso.	ASTM C 136 NTE INEN 696	Grava Es el material pétreo de dimensiones superiores a los 4.75 mm, obtenido por la degradación de rocas.[18] Origen: Mina “Puerta del Sol” Tipo: Natural Cumple con la normativa: NTE INEN 872
		Serie de tamices con abertura: #4, 3/8”, 1/2”, 3/4”, 1”, 1 ½”, 2”.
		Tamizadora eléctrica Origen: Laboratorio de Ingeniería Civil Marca: Controls
		Balanza electrónica Precisión: 0.01 gramo Capacidad máx: 30kg
- Densidad aparente suelta y compactada de los agregados. - Densidad aparente compactada de la mezcla	ASTM C 29 NTE INEN 858	Agregado pétreo Origen: Mina “Puerta del Sol” Tipo: Natural Grava: Tamaño 3/8”, 1/2”, 3/4”. Cumple con la normativa: NTE INEN 872
		Molde metálico Utilizado para medir la cantidad de agregado suelto y compactado. [19] Origen: Laboratorio de Ingeniería Civil Material: Acero Geometría: Redondo

		<p>Diámetro: 30 cm</p> <p>Altura: 30 cm</p> <p>Peso: 9.83 kg</p>
		<p>Balanza electrónica</p> <p>Precisión: 0.01 gramo</p> <p>Capacidad máx: 30kg</p>
Densidad real y capacidad de absorción del agregado grueso.	ASTM C 127 NTE INEN 857	<p>Grava</p> <p>Origen: Mina “Puerta del Sol”</p> <p>Cumple con la normativa: NTE INEN 872</p>
		<p>Canastilla metálica</p> <p>Utilizada para pesar el agregado sumergido y al aire. [20]</p> <p>Origen: Laboratorio de Ingeniería Civil</p> <p>Material: Acero con abertura de 3.35 mm</p> <p>Geometría: Cilíndrica</p> <p>Dimensiones: 203mm x 203mm</p>
		<p>Balanza electrónica</p> <p>Precisión: 0.01 gramo</p> <p>Capacidad máx: 30kg</p>
		<p>Horno eléctrico</p> <p>Equipo para secar muestras de grava.</p> <p>Origen: Laboratorio de Ingeniería Civil</p> <p>Geometría: Prismática</p> <p>Dimensiones: 648x610x508 mm</p> <p>Temperatura: 110 ± 5 °C.</p>
Densidad real y capacidad de	ASTM C 128 NTE INEN 856	<p>Arena</p> <p>Origen: Mina “Puerta del Sol”</p> <p>Cumple con la normativa: NTE INEN 872</p>

absorción del agregado fino.		<p>Picnómetro y pipeta.</p> <p>El picnómetro permite conocer el peso específico de líquidos con temperatura controlada. [21]</p> <p>Origen: Laboratorio de Ingeniería Civil</p> <p>Material: Vidrio</p> <p>Capacidad: 500 ml</p> <p>Precisión: 0.25 ml</p>
		<p>Cono de absorción de arena y Pisón</p> <p>Usado para conocer la humedad superficial de la arena.[21]</p> <p>Origen: Laboratorio de Ingeniería Civil</p> <p>Material: bronce y acero</p> <p>Geometría: Cono truncado</p> <p>Dimensiones: 40x90x75 mm</p> <p>Masa de pisón: 340 g</p>
		<p>Balanza electrónica</p> <p>Precisión: 0.01 gramo</p> <p>Capacidad máx: 30kg</p>
		<p>Horno eléctrico</p> <p>Origen: Laboratorio de Ingeniería Civil</p> <p>Temperatura: 110 ± 5 °C.</p>
Contenido de humedad	ASTM C 566 NTE INEN 862	<p>Agregado pétreo</p> <p>Origen: Mina “Puerta del Sol”</p> <p>Cumple con la normativa: NTE INEN 872</p>
		<p>Horno eléctrico</p> <p>Origen: Laboratorio de Ingeniería Civil</p> <p>Temperatura: 110 ± 5 °C.</p>
		<p>Balanza electrónica</p>

		Precisión: 0.01 gramo Capacidad máx: 30kg
--	--	--

Por otra parte, en la fase preliminar se elaboraron probetas con los datos obtenidos previamente, para lo cual se ocuparon los materiales descritos en la tabla 2.

Tabla 2 Materiales e Instrumentos para elaboración de probetas

Material: Cemento Hidráulico Tipo GU	
Descripción: De uso general, empleado en diversos tipos de construcciones en las que no sean necesarias características especiales. Generalmente usada en estructuras y albañilería. [22]	Detalle: Marca: Holcim Peso: 50 kg Cumple con la normativa: NTE INEN 2380. Adquisición: Fácil
Material: Agregado fino y grueso	
Descripción: Es el material pétreo obtenido de la degradación de rocas. Para hormigones permeables el porcentaje de arena es bajo (10-30%) y la grava debe tener tamaños entre 3/4" y 3/8" (19 y 9.5 mm).[1]	Detalle: Origen: Mina "Puerta del Sol" Tipo: Natural Grava: Tamaño 3/8", 1/2", 3/4". Cumple con la normativa: NTE INEN 872
Material: Agua Potable	
Descripción: Debe ser limpia y sin color, de preferencia potable.[22]	Detalle: Tipo: Potable Cumple con la normativa: NTE INEN 1108
Material: Aditivo plastificante	

<p>Descripción:</p> <p>Aditivo que mejora la trabajabilidad en estado fresco, y en estado seco, proporciona mayor resistencia a edades más tempranas. [23]</p>	<p>Detalle:</p> <p>Material: Lignosulfonatos</p> <p>Marca: Sika</p> <p>Nombre: Sika Plastocrete DM</p> <p>Dosificación recomendada: 0.5% del peso del cemento.</p> <p>Cumple con la normativa: NTE INEN 2135</p>
<p>Material: Fibras de Polipropileno</p>	
<p>Descripción:</p> <p>Macrofibra sintética de polipropileno. Su dosificación recomendada es alrededor del 0.03% a 0.15% del volumen del hormigón.</p>	<p>Detalle:</p> <p>Marca: TenaBrix</p> <p>Densidad: 0.91 ($\pm 0.01\%$) g/cm³</p> <p>Módulo de elasticidad: 5000 MPa</p> <p>Longitud: 50mm</p> <p>Área transversal: 1.5 mm²</p> <p>Cumple con la normativa: ASTM C1116</p>
<p>Material: Aceite quemado</p>	
<p>Descripción:</p> <p>Material que se coloca en las paredes de los moldes para evitar que el hormigón se adhiera a los mismos.</p>	<p>Detalle:</p> <p>Origen: Laboratorio de Ingeniería Civil</p> <p>Material: Derivado del petróleo</p> <p>Cumple con la normativa: NTE INEN 3124</p>
<p>Equipo: Cono de Abrams</p>	
<p>Descripción:</p> <p>Molde metálico que permite medir la consistencia del hormigón, se llena en tres capas a las cuales se les da 25 golpes con</p>	<p>Detalle:</p> <p>Origen: Laboratorio de Ingeniería Civil</p> <p>Material: Metálico</p> <p>Geometría: Cono truncado</p>

<p>una varilla compactadora. La consistencia depende de los centímetros que se asienta el hormigón al alzar el cono. [24]</p>	<p>Dimensiones: 30cm de altura, diámetro menor de 10cm y diámetro mayor de 20cm</p> <p>Cumple con la normativa: ASTM C143</p>
<p>Equipo: Moldes cilíndricos</p>	
<p>Descripción:</p> <p>Empleados para hacer cilindros de hormigón de medidas estandarizadas.[25]</p>	<p>Detalle:</p> <p>Origen: Laboratorio de Ingeniería Civil</p> <p>Material: Metálico</p> <p>Dimensiones: 200mm de altura y 100mm de diámetro</p> <p>Cumple con la muestra: ASTM C31</p>
<p>Equipo: Moldes prismáticos</p>	
<p>Descripción:</p> <p>Moldes de madera para elaborar vigas de hormigón.</p>	<p>Detalle:</p> <p>Origen: Elaboración propia</p> <p>Material: Madera</p> <p>Dimensiones: 100x100x350 mm</p> <p>Cumple con la muestra: ASTM C31</p>
<p>Equipo: Varilla y martillo de goma</p>	
<p>Descripción:</p> <p>Utilizado para compactar el hormigón en los moldes y para sacar el aire encapsulado. Se deben dar 25 golpes con la varilla en el hormigón y 15 con el maso de goma en los laterales del molde.[25]</p>	<p>Detalle:</p> <p>Origen: Laboratorio de Ingeniería Civil</p> <p>Material: Varilla de acero y mazo de goma</p> <p>Dimensiones: 300mm de longitud y 10mm de diámetro</p> <p>Peso martillo: 0.6 kg</p> <p>Cumple con la muestra: ASTM C31</p>
<p>Equipo: Cámara de curado</p>	

<p>Descripción:</p> <p>Espacio dentro del laboratorio para el reposo y curado de las probetas.</p>	<p>Detalle:</p> <p>Origen: Laboratorio de Ingeniería Civil</p> <p>Temperatura: 23±2 °C</p> <p>Cumple con la muestra: ASTM C330</p>
---	--

Materiales para el cumplimiento del objetivo 1

Objetivo 1: *Determinar el índice de permeabilidad del hormigón.*

Este objetivo buscó encontrar el índice de permeabilidad y contenido de vacíos de las probetas elaboradas con anterioridad, para ello se emplearon los siguientes materiales.

Tabla 3 Materiales e instrumentos para cumplimiento de objetivo1

Equipo: Permeámetro de carga variable	
<p>Descripción:</p> <p>No existe una norma estandarizada para la determinación de la permeabilidad. Por lo que el equipo más empleado es el permeámetro de carga variable. [1]</p>	<p>Detalle:</p> <p>Origen: Elaboración propia</p> <p>Material: Plástico</p> <p>Dimensiones: 60 cm de altura y 10 cm de diámetro</p> <p>Basado en: ACI 552R-10</p>

Materiales para el cumplimiento del objetivo 2

Objetivo 2: *Comparar el comportamiento a compresión para distintas relaciones a/c del hormigón.*

Este objetivo se trata del ensayo a compresión de las probetas cilíndricas elaboradas en la fase preliminar, por lo que el material usado se encuentra detallado en la tabla 4.

Tabla 4 Materiales e instrumentos para cumplimiento del objetivo 2

Equipo: Máquina de ensayo

<p>Descripción: Maquina utilizada para realizar ensayos de resistencia a probetas de diferentes formas, al aplicar fuerza sobre ellas.</p>	<p>Detalle: Origen: Laboratorio de Ingeniería Civil Marca: Shimadzu Modelo: 2000X Cumple con la normativa: NTE INEN 2554</p>
<p>Equipo: Neopreno</p>	
<p>Descripción: Los cilindros de hormigón permeable son irregulares por lo que se utilizaron neoprenos para que la repartición de esfuerzos sea uniforme. [26]</p>	<p>Detalle: Material: Neopreno Dimensiones: 4” de diámetro y 13mm de espesor Dureza: 50 Cumple con la normativa: ASTM C1231</p>

Materiales para el cumplimiento del objetivo 3

Objetivo 3: *Analizar la resistencia a flexión para distintas relaciones a/c del hormigón.*

En este objetivo se sometieron a las vigas elaboradas con anterioridad a cargas en sus tercios, para lo cual se utilizó lo siguiente:

Tabla 5 Materiales e instrumentos para el cumplimiento del objetivo 3

<p>Equipo: Máquina de ensayo</p>	
<p>Descripción: Maquina utilizada para realizar ensayos de resistencia a probetas de diferentes formas, al aplicar fuerza sobre ellas.</p>	<p>Detalle: Origen: Laboratorio de Ingeniería Civil Marca: Shimadzu Modelo: 2000X Cumple con la normativa: NTE INEN 2554</p>
<p>Equipo: Aparatos de carga</p>	
<p>Descripción:</p>	<p>Detalle:</p>

Los aparatos de carga sirvan para asegurar que la fuerza aplicada sea perpendicular y sin excentricidad. [27]	<p>Origen: Laboratorio de Ingeniería Civil, pertenecen a la máquina Shimadzu</p> <p>Cumple con la normativa: NTE INEN 2554</p>
---	--

2.2.Métodos

Durante la presente investigación se realizaron cuatro etapas, la primera fue una etapa preliminar, la segunda abarco al análisis de la permeabilidad, la resistencia de compresión fue analizada durante la tercera etapa y finalmente en la cuarta etapa se estudió la resistencia a flexión.

2.2.1. Etapa 1: Preliminares

En la primera etapa se utilizó un método descriptivo debido a que se investigó acerca de estudios previos y normativa existente sobre hormigones porosos, sin embargo, también se utilizaron métodos experimentales, ya que se realizaron ensayos de materiales. Para comenzar con los ensayos, se adquirió el material pétreo, el cual fue extraído de la mina “Puerta del Sol” con código 290557, ubicada en el desvío a Guapante en la Panamericana Norte, en la ciudad de Ambato. Con coordenadas Norte: 9876072.40 y Este: 770533.60

Figura 1 Mina "Puerta del Sol"



Fuente: Autor

El material fue llevado al laboratorio de la facultad para proceder a determinar sus propiedades en conformidad con las normativas ASTM e INEN, con los siguientes ensayos:

- Granulometría del agregado fino y grueso (ASTM 136/NTE INEN 696) [28]
- Densidad suelta y compactada de agregado fino y grueso (INEN 858) [19]
- Capacidad de absorción y densidad real del agregado grueso (INEN 857) [20]
- Capacidad de absorción y densidad real del agregado fino (INEN 856) [21]

En el caso de la densidad real del cemento se utilizaron los resultados obtenidos por Reinoso, C en [29] debido a que, al momento de realizar el ensayo los valores obtenidos no se encontraban en rango usual (2.9 a 3.1).

Para dosificar y elaborar las probetas se tomó muestras de grava y arena el día anterior para obtener el contenido de humedad que posee el agregado al momento de hormigonar y de este modo poder realizar la corrección de la relación a/c.

Con los resultados obtenidos se realizó el cálculo de la dosificación, para lo cual se siguió lo recomendado en el reporte ACI 522R-10: [1]

- Se encontró la masa en estado seco total necesaria de agregado, utilizando la densidad aparente compactada de la grava y el volumen de la probeta, con la siguiente fórmula:

$$W_{ts} = Pu_g * V_T$$

W_{ts} es la masa de agregado seco necesaria (kg).

Pu_g es la densidad aparente compactada (kg/m³).

V_T es el volumen de la probeta (m³).

- Se calculó la masa de los agregados en estado saturado superficie seca (SSS)

$$W_{TSSS} = W_{ts} * \left(1 + \frac{Abs_G}{100} \right)$$

W_{TSSS} es la masa de agregados en estado saturado superficie seca (kg).

Abs_G es la capacidad de absorción del agregado grueso (%).

- Posteriormente se determinó el porcentaje de agregado fino húmedo.

$$W_{FSSS} = W_{TSSS} * \frac{\%F}{100}$$

W_{FSSS} es el peso de arena en estado saturado superficie seca (kg).

%F es el porcentaje de fino el cual se recomienda que vaya desde el 5 a 30% en [1]. Tomando como referencia estos valores y los resultados obtenidos en la investigación de Bautista [11], en el cual los mejores resultados se obtuvieron con 10% de arena, se tomó ese mismo valor para las dosificaciones de la presente investigación.

- Para obtener la masa seca del agregado fino necesaria, se empleó la siguiente fórmula:

$$W_{FS} = \frac{W_{FSSS}}{\left(1 + \frac{Abs_F}{100}\right)}$$

W_{FS} es la masa seca de arena (kg).

Abs_F es la capacidad de absorción de la arena (%).

- Se determinó la masa del agregado fino en estado natural con la siguiente fórmula:

$$W_{FEN} = W_{FS} * \left(1 + \frac{HN_F}{100}\right)$$

W_{FEN} es el peso del agregado fino en estado natural (kg).

HN_F es el contenido de humedad de la arena sacado con anterioridad (%).

- Se procedió con el cálculo la cantidad de agregado grueso en estado SSS

$$W_{GSSS} = W_{TSSS} - W_{FSSS}$$

W_{GSSS} es el peso de la grava en estado saturado superficie seca (kg).

- Para obtener la masa seca del agregado grueso necesaria, se empleó la siguiente fórmula:

$$W_{Gs} = \frac{W_{GSSS}}{\left(1 + \frac{Abs_G}{100}\right)}$$

W_{Gs} es la masa de grava en estado seco (kg).

- La siguiente fórmula fue empleada para encontrar la masa del agregado grueso en estado natural.

$$W_{GEN} = W_{Gs} * \left(1 + \frac{HN_G}{100}\right)$$

W_{GEN} es el peso de grava en estado natural (kg).

HN_G es el contenido de humedad de la grava que fue obtenida con anterioridad (%).

- En el cálculo de la pasta cementante se tomó en cuenta que el porcentaje de la pasta cementante implementada (%Vp) debe estar entre 15% y 30%, además el porcentaje de disminución corresponde a un valor de 2% por cada 10% de agregado fino empleado. [1]

$$V_P = V_T * \frac{\%Vp - \%}{100}$$

V_P es el volumen de pasta cementante (m³).

V_T es el volumen de la probeta (m³).

% es el porcentaje de disminución.

- Para obtener el peso del cemento se necesitó determinar una relación a/c que el reporte ACI 522R-20 [1] permite valores desde 0.26 hasta 0.45. De este modo y con base en [10], [9], investigaciones en las cuales se recomienda emplear relaciones a/c superiores a 0.30 y rondando el 0.32 se tomaron valores de 0.30 y 0.35.

$$C = \left(\frac{V_P}{\frac{1}{G_{EC}} + \frac{a}{c}} \right) * Pu_a$$

C es el peso de cemento necesario (kg).

a/c es la relación de agua y cemento.

P_{ua} es el peso específico del agua (kg/m^3)

- Finalmente, para el cálculo de la cantidad de agua de amasado requerida, se empleó:

$$a_m = c * \frac{a}{c} + W_{Gs} * \left(\frac{Abs_G - HN_G}{100} \right) + W_{FS} * \left(\frac{Abs_F - HN_F}{100} \right)$$

Con dicha dosificación se realizó el ensayo de revenimiento o asentamiento (ASTM C143), al ser una pasta con poca relación de a/c el asentamiento del hormigón fue prácticamente nulo.

Figura 2 Asentamiento



Fuente: Autor

Posterior a la obtención de la dosificación se elaboraron probetas cilíndricas con medidas de 100x200 mm y las probetas prismáticas tuvieron medidas de 100x100x350 mm, para la compactación se empleó una varilla de 10mm con una longitud de 300 mm, según lo estipulado en la norma ASTM C31 [25], esta fue realizada en dos capas con 25 golpes de varilla cada una. Después de $24 \pm 8\text{h}$, las probetas se desmoldaron y se sumergieron en la piscina de la cámara de curado del laboratorio a una temperatura $23 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 7 y 28 días hasta ser ensayadas.

Previo al cumplimiento de los objetivos se determinó el tamaño de grava que proporcionaba más resistencia, para lo cual se elaboraron 6 probetas con cada tamaño de

partícula como se puede ver en la tabla 6. Con este resultado se elaboraron 12 probetas cilíndricas para determinación de permeabilidad, 24 para ensayo de compresión y 6 probetas prismáticas para ensayo a flexión.

Tabla 6 Probetas para determinación del tamaño de partícula

Tamaño de partícula	Relación a/c	Número
3/4"	0.35	6
1/2"	0.35	6
3/8"	0.35	6
	Total	18

Fuente: Autor

2.2.2. Etapa 2: Determinación de permeabilidad

Durante la segunda etapa se empleó métodos experimentales. Para la determinación de la permeabilidad se elaboró un permeámetro de carga variable, para lo cual se tomó como ejemplo el realizado por Neithenath, en ACI 522R-10. Este instrumento cuenta con un cilindro donde va la probeta y en su parte superior un cilindro graduado, también posee una válvula que permite la circulación del agua, dicha válvula está conectada a un tubo de desagüe, es necesario que el punto final del desagüe coincida con el punto más alto de la probeta. [1]

Figura 3 Permeámetro de carga variable de Neithenath



Fuente: ACI 522R-10 [1]

Previo al ensayo las probetas fueron envueltas de papel film para evitar las filtraciones laterales.

Figura 4 Preparación de cilindros para ensayo de permeabilidad



Fuente: Autor

Durante esta etapa se ocuparon 12 de las probetas elaboradas en la fase preliminar, las cuales fueron curadas durante 28 días.

Tabla 7 Probetas para ensayos de permeabilidad y contenido de vacíos

Tamaño de partícula	Porcentaje de arena	Relación a/c	Edad	Número
1/2"	10%	0.3	28	6
		0.35	28	6
TOTAL				12

Fuente: Autor

Se calculó la permeabilidad de las probetas, sin embargo, no se cuenta con una norma estandarizada para la determinación de esta propiedad por lo que se tomó como base las pautas otorgadas por ACI 522R-10 [1], debido a que investigaciones previas informan que brinda resultados confiables.

Figura 5 Permeámetro de carga variable



Fuente: Autor

El ensayo se trató de abrir la válvula y dejar pasar agua a través de las probetas cilíndricas, con condiciones controladas para tomar el tiempo que el agua tarda en infiltrarse hasta cierta distancia. Para el cálculo del coeficiente de permeabilidad se empleó la ley de Darcy:

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

K es el coeficiente de permeabilidad (cm/s)

A_{cilindro} es el área de la probeta (78.54 cm²).

A_{tubo} es el área del cilindro por donde se coloca el agua (84.95 cm²).

L es la altura de la probeta (20 cm).

T es el tiempo que demoró en pasar de h_0 a h_1 (s).

H₀ es la altura inicial (49 cm).

H₁ es la altura final (29 cm).

Posteriormente, se determinó el contenido de vacíos del hormigón endurecido mediante el principio de Arquímedes, para lo cual dentro de un recipiente con agua y de medidas conocidas, se colocó la probeta, la cual desplazó el agua hasta cierta altura. Al determinar volumen del agua desplazada se obtuvo el volumen de la probeta de hormigón poroso. De este modo el porcentaje de vacíos fue la diferencia entre el volumen geométrico de la probeta y el volumen encontrado.

$$\%V = (V_T - V_M) * \frac{100}{V_T}$$

%V es el porcentaje de vacíos.

V_T es el volumen geométrico de la probeta (cm³).

V_M es el volumen de hormigón poroso (cm³).

Para concluir con esta etapa, se realizaron gráficos comparativos de permeabilidad vs contenido de vacíos, además de permeabilidad vs relación a/c.

2.2.3. Etapa 3: Resistencia a compresión

Durante la tercera etapa continuó usando métodos experimentales para la determinación de la resistencia a compresión.

En la ejecución de esta etapa se ensayaron 24 probetas, con las características descritas en la Tabla 8.

Tabla 8 Probetas para ensayos de compresión y permeabilidad

Tamaño de partícula	Porcentaje de arena	Relación a/c	Edad	Número
1/2"	10%	0.3	7	6
			28	6
		0.35	7	6
			28	6
TOTAL				24

Fuente: Autor

El inconveniente del hormigón permeable es su superficie irregular debido a la baja cantidad de fino en su dosificación, por lo que se emplearon neoprenos durante el ensayo siguiendo con la norma ASTM C1231 [26]. Para la realización del ensayo se colocaron las probetas en la máquina de compresión y se dio carga hasta llegar a la rotura siguiendo la norma ASTM C39 [30]. Se realizaron gráficos comparativos de esta propiedad en base a su relación a/c.

Figura 6 Ensayo a compresión



Fuente: Autor

2.2.4. Etapa 4: Resistencia a flexión

Finalmente se realizó la cuarta etapa, durante la cual se siguió ocupando métodos experimentales para determinar la resistencia a flexión de las vigas elaboradas, al ser ensayadas a los 28 días como indica la norma ASTM C78 [31]. Para esta fase se ocuparon 12 probetas prismáticas con las características descritas en la Tabla 9.

Tabla 9 Probetas para ensayos de flexión

Tamaño de partícula	Porcentaje de arena	Relación a/c	Edad	Número
1/2"	10%	0.3	28	3
		0.35	28	3
TOTAL				6

Fuente: Autor

Las probetas fueron colocadas en la máquina con bloques de acero colocados en los tercios, por lo que previamente las probetas fueron marcadas para tener una guía. Después de colocar la probeta, se procedió a dar carga hasta la rotura, después de producirse la falla se tomó el valor y se señaló el lugar donde se produjo la falla superficial.

Figura 7 Ensayo a flexión



Fuente: Autor

Cuando el fallo ocurrió en el tercio medio se utilizó la siguiente fórmula: [31]

$$R = \frac{C_F * L}{b * d^2}$$

R es el módulo de rotura (Pa).

C_F es la carga de flexión (N).

L es la longitud entre los bloques de acero (m)

B es el ancho promedio en el punto de falla (m)

D es la profundidad promedio en el punto de falla (m)

Por otra parte, si el fallo ocurrió fuera del tercio medio a una distancia menor al 5% de la longitud entre los bloques de acero se ocupó lo siguiente:[31]

$$R = \frac{3 * C_F * e}{b * d^2}$$

E es la distancia promedio entre el sitio de fallo y el soporte más cercano. (m)

Al ser hormigón con fibras se calcularon los esfuerzos residuales a la longitud de L/600 y L/150, para lo cual se dividió el valor de esfuerzo obtenido en estos puntos para el máximo esfuerzo obtenido mediante la curva carga (kN) vs deflexión (mm). Finalmente se calcularon la tenacidad y la ductilidad, la primera fue hallada a partir de los datos de la curva carga vs deflexión, utilizando el método de los trapecios, este método facilita encontrar el área debajo de la curva, la cual en este caso corresponde a la tenacidad. Por

otra parte, para la ductilidad se la encontró como energía de rotura mediante la siguiente fórmula:

$$R = \frac{W}{b * d}$$

W es el trabajo o tenacidad en N/m.

2.2.5. Resumen de experimentos

Tabla 10 Resumen de experimentos

Ensayo	Relación a/c	Tamaño de partícula	Porcentaje de fino	Porcentaje de pasta	Cantidad de fibra	Edad de ensayo	# Probetas
		in	%	%	kg/m3	días	
Determinar el tamaño de partícula (Permeabilidad y Compresión)	0.35	3/4	10	20	-	7	6
		1/2					6
		3/8					6
Permeabilidad y contenido de vacíos	0.35	1/2	10	20	0.6	28	6
	0.3						6
Compresión	0.35	1/2	10	20	0.6	7	6
						28	6
	0.3		10	20	0.6	7	6
						28	6
Flexión	0.35	1/2	10	20	0.6	28	3
	0.3					28	3
Total probetas a ensayar							60

Fuente: Autor

Los tamaños de partículas empleadas en los primeros ensayos fueron: 3/4", 1/2" y 3/8", debido a que en la norma ACI 522R-10 [1] se dice que los valores usuales de grava para hormigón permeable comprenden valores entre 3/4" y 3/8", por lo que se ha seleccionado estos valores de grava además de un valor medio para determinar el tamaño que proporcione equilibrio entre compresión y permeabilidad.

Por otra parte, en cuanto a la relación a/c el reporte ACI 522R-10 [1] permite valores desde 0.26 hasta 0.45. De este modo y con base en [10] y [9], investigaciones en las cuales se

recomienda emplear relaciones a/c superiores a 0.30 y rondando el 0.32 se tomaron valores de 0.30 y 0.35.

En todos los ensayos se empleó un porcentaje de fino del 10 % debido a que la ACI 522R-10 [1] establece que debe ir entre 5 a 30%. Tomando como referencia estos valores y los resultados obtenidos en la investigación de Bautista [11], en el cual los mejores resultados se obtuvieron con 10% de arena, se tomó ese mismo valor para las dosificaciones de la presente investigación.

En cuanto al porcentaje de pasta la ACI 522R-10 establece que va entre el 15% y 30% para evitar el taponamiento de poros, por lo que se tomó un valor medio, siendo este 20%.

En los ensayos en los que se ocupó fibra de polipropileno de 50mm, la dosificación fue de 0.6 kg/m^3 debido a que en investigaciones previas como [5] se determinó que el valor de la fibra debe estar entre 0.3 kg/m^3 y 1.2 kg/m^3 por lo que se tomó un 0.6 kg/m^3 para evitar taponamiento de poros. La fibra se incluyó a la mezcla de manera aleatoria.

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis y discusión de resultados

3.1.1. Determinación del tamaño de la grava

Después de determinar las propiedades de los agregados pétreos, se realizaron dosificaciones de prueba para determinar el tamaño de grava más equilibrado en cuanto a resistencia y permeabilidad. En la tabla 11 se puede observar que la dosificación P-1 corresponde a grava 3/4", la dosificación P-2 a grava 1/2" y la P-3 corresponde a grava 3/8". Los cálculos de dosificación se encuentran desglosados en los anexos 11, 12, 13.

Tabla 11 Resumen de dosificaciones grava tamizada

Dosificación	P-1	P-2	P-3
Granulometría	3/4"	1/2"	3/8"
Nº de Cilindros	6	6	6
a/c teórico	0.35	0.35	0.35
a/c corregido	0.419	0.414	0.430
A. grueso (kg)	12346.74	12857.84	12975.7
A fino (kg)	1354.22	1414.26	1431.44
Agua (kg)	1039.86	1034.02	1074.2
Cemento (kg)	2498.66	2498.66	2498.66

Fuente: Autor

Con las probetas se procedió al ensayo de permeabilidad con el permeámetro de carga variable, donde obtuvieron coeficiente de permeabilidad descritos en la tabla 12

Tabla 12 Permeabilidad probetas de prueba

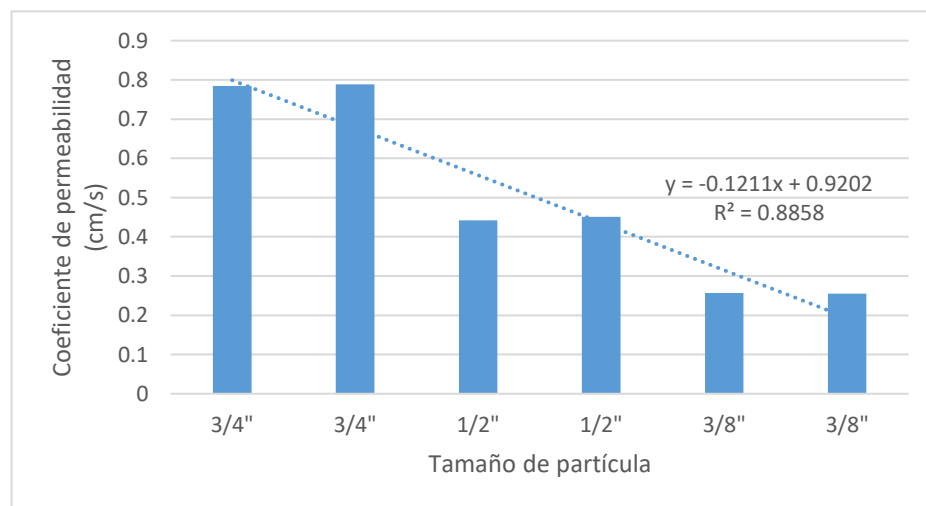
Grava	Identificación	Tiempo	K	K promedio	Desviación estandar
		s	cm/s	cm/s	
3/4"	CP-1	15.07	0.753	0.785	0.03
	CP-2	14.06	0.807		
	CP-3	14.26	0.796		
	CP-4	15.1	0.751	0.789	0.03
	CP-5	13.95	0.813		
	CP-6	14.14	0.802		

Grava	Identificación	Tiempo	K	K promedio	Desviación estandar
		s	cm/s	cm/s	
1/2"	CP-7	25.32	0.448	0.442	0.02
	CP-8	24.85	0.457		
	CP-9	26.84	0.423		
	CP-10	23.56	0.482	0.451	0.04
	CP-11	24.48	0.464		
	CP-12	27.9	0.407		
3/8"	CP-13	44.65	0.254	0.257	0.003
	CP-14	44.22	0.257		
	CP-15	43.68	0.260		
	CP-16	45.21	0.251	0.255	0.01
	CP-17	45.17	0.251		
	CP-18	42.94	0.264		

Fuente: Autor

En base a los coeficientes de permeabilidad recomendados por la ACI 522R-10 [1] los cuales tienen un rango desde 0.20 cm/s hasta 0.54 cm/s, se determinó que la grava ¾" no cumple con ellos debido a que los valores obtenidos son superiores en un 45.74%. Por otra parte, la menor permeabilidad fue proporcionada por la grava 3/8" con un promedio entre los dos ensayos de 0.256 cm/s, estando dentro del rango recomendado, no obstante, este valor se encuentra cercano al límite inferior. Siendo la grava ½" aquella que proporcionó un índice medio de permeabilidad medio con un valor promedio entre los dos ensayos de 0.447 cm/s.

Figura 8 Coeficiente de permeabilidad



Fuente: Autor

En la figura 8 se puede evidencia que existe una tendencia en cuanto al coeficiente de permeabilidad, debido a que la permeabilidad tiende a ser menor cuando el tamaño del agregado grueso también disminuye, obteniendo los valores más altos con la grava ¾” siendo este el tamaño más grande de los tres analizados.

Posterior al ensayo de permeabilidad se procedió con el ensayo de compresión. En la tabla 12 se muestran los ensayos de compresión realizados a los 7 días en las 12 primeras probetas elaboradas.

Tabla 13 Resistencia a compresión

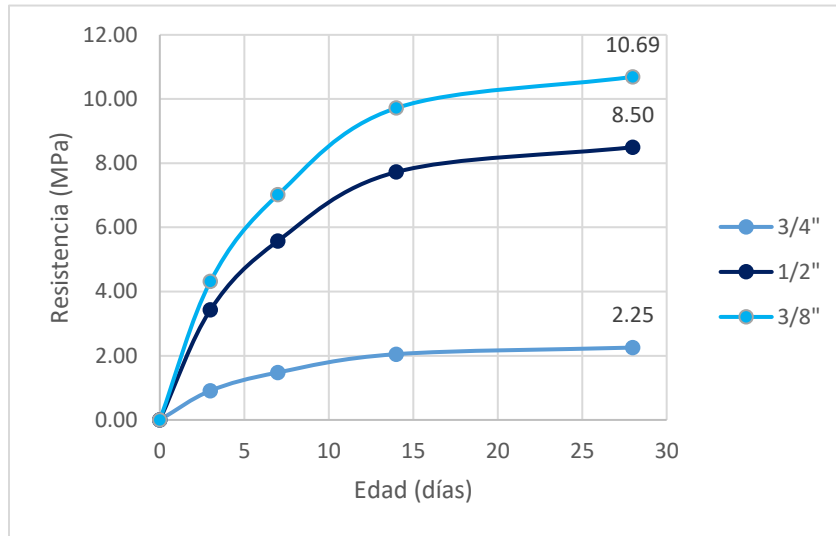
Grava	Identificación	Dimensiones		Carga kN	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo Promedio Mpa	Desviación estandar
		Área	Altura				
		cm ²	cm				
¾"	CP-1	78.54	20	12.33	1.57	1.48	0.144
	CP-2	78.54	20	12.17	1.55		
	CP-3	78.54	20	10.29	1.31		
	CP-4	78.54	20	12.17	1.55	1.40	
	CP-5	78.54	20	11.62	1.48		
	CP-6	78.54	20	9.19	1.17		
½"	CP-7	78.54	20	40.21	5.12	5.58	0.481
	CP-8	78.54	20	47.75	6.08		
	CP-9	78.54	20	43.56	5.55		
	CP-10	78.54	20	42.36	5.39	5.53	
	CP-11	78.54	20	41.35	5.26		
	CP-12	78.54	20	46.69	5.94		
⅜"	CP-13	78.54	20	59.22	7.54	7.02	0.818
	CP-14	78.54	20	47.75	6.08		
	CP-15	78.54	20	58.51	7.45		
	CP-16	78.54	20	55.97	7.13	6.95	
	CP-17	78.54	20	57.64	7.34		
	CP-18	78.54	20	50.21	6.39		

Fuente: Autor

Dicho ensayo determinó que la grava que mayor resistencia otorga a los 7 días es la ⅜” con valores alrededor de los 7 MPa, del mismo modo que la grava menos resistente fue ¾” con valores que oscilan el 1.50 MPa, mientras que la grava ½” alcanzó valores alrededor a 5.50 MPa. Sin embargo, ACI 522R-10 [1] estable la resistencia a compresión

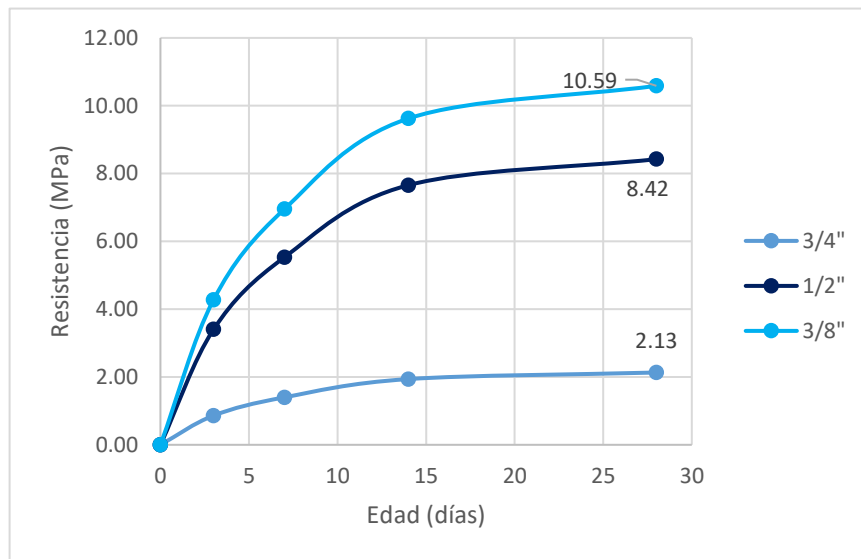
a los 28 días, debido a ello se realizaron proyecciones de resistencias para esta edad de hormigón, establecidos en las figuras 9 y 10.

Figura 9 Proyección de resistencia a compresión 1



Fuente: Autor

Figura 10 Proyección resistencia a compresión 2

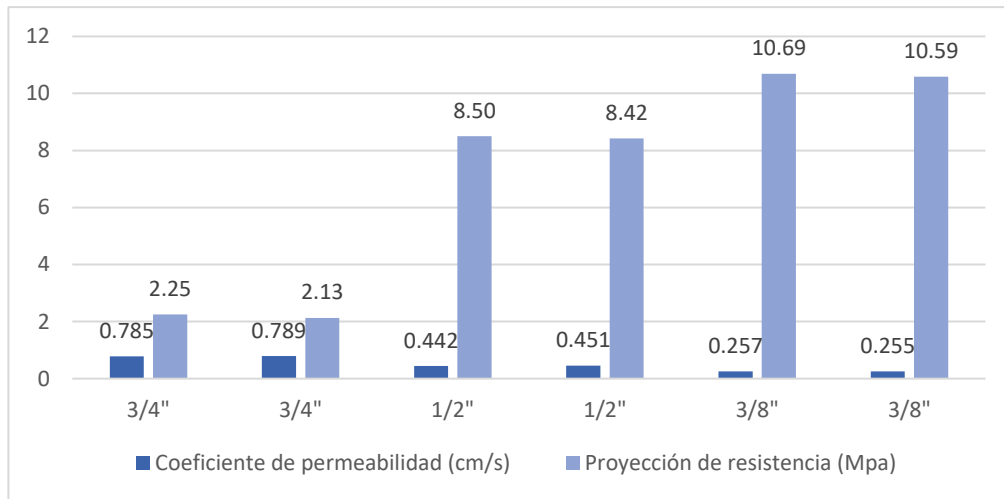


Fuente: Autor

Tomando como referencia el reporte ACI 522R-10 [1] las resistencias típicas del hormigón permeable van desde los 6.8 MPa hasta los 37.9. MPa a los 28 días, al comparar estos valores con las proyecciones realizadas se puede observar que el hormigón realizado

con grava 3/8" proporciona la resistencia mayor siendo esta de un aproximado de 10.69 MPa, la cual se encuentra dentro de los valores establecidos. Del mismo modo, el hormigón con la grava 1/2" tendría una resistencia de 8.50 MPa también cumple con este parámetro, sin embargo, el hormigón con grava 3/4" tendría una resistencia de 2.25 MPa a los 28 días, siendo este valor inferior a lo establecido, por lo cual este tamaño de grava se descarta en la selección del tamaño de agregado.

Figura 11 Comparación permeabilidad vs Proyección de resistencia



Fuente: Autor

Tomando como base la base la figura 11 se observa que a medida que la resistencia sube la permeabilidad tiende a bajar, siendo que la grava 3/4" proporciona una permeabilidad alta, pero con baja resistencia, además, como se mencionó anteriormente, este tamaño de partícula no cumple con lo establecido en ACI 522R-10, por lo que fue descartado. Por otra parte, el tamaño de grava 3/8" obtuvo la resistencia mayor, pero como su coeficiente de permeabilidad se encuentra muy cercano al límite inferior también fue descartada. El tamaño de partícula elegido fue 1/2", debido a que proporciona un equilibrio entre permeabilidad y resistencia.

Posterior a la determinación del tamaño de partícula, se realizaron las dosificaciones empleadas en las siguientes etapas, las cuales se encuentran descritas en la tabla 13. Adicionalmente, se establecieron las relaciones a/c a utilizarse, tomando como referencia la ACI 522R-10 y ACI 211.3R-02, donde se recomienda que esta relación se encuentre

entre 0.26 y 0.40, de modo que se escogieron los valores de 0.35 y 0.30 al ser valores medios en este rango.

En tabla 14 se observa un resumen de las dosificaciones en donde el código “1” se refiere a aquellas probetas elaboradas con a/c de 0.35, mientras que “2” a aquellas elaboradas con a/c de 0.30. Además, el sufijo “C” hace referencia a los cilindros y “V” se refiere a las vigas.

Tabla 14 Dosificaciones cilindros y vigas

Dosificación	1C	1V	2C	2V
Granulometría	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"
Nº de Probetas	12	3	12	3
a/c teórico	0.35		0.3	
a/c corregido	0.37	0.37	0.33	0.33
A. grueso (kg)	25771.53	14355.83	25715.68	14324.72
A fino (kg)	2980.90	1660.49	2978.37	1659.08
Agua (kg)	1847.70	1029.25	1775.41	988.98
Cemento (kg)	4997.32	2783.72	5394.60	3005.02
Fibra (kg)	11.31	6.3	11.31	6.3
Plastificante (ml)	24.99	13.92	26.97	15.03

Fuente: Autor

3.1.2. Determinación de permeabilidad

Con los cilindros elaborados se ensayaron a permeabilidad con el permeámetro de carga variable 12 cilindros a los 28 días de edad, siendo 6 probetas para cada relación. Los resultados del coeficiente de permeabilidad se encuentran en la tabla 15.

Tabla 15 Permeabilidad 28 días

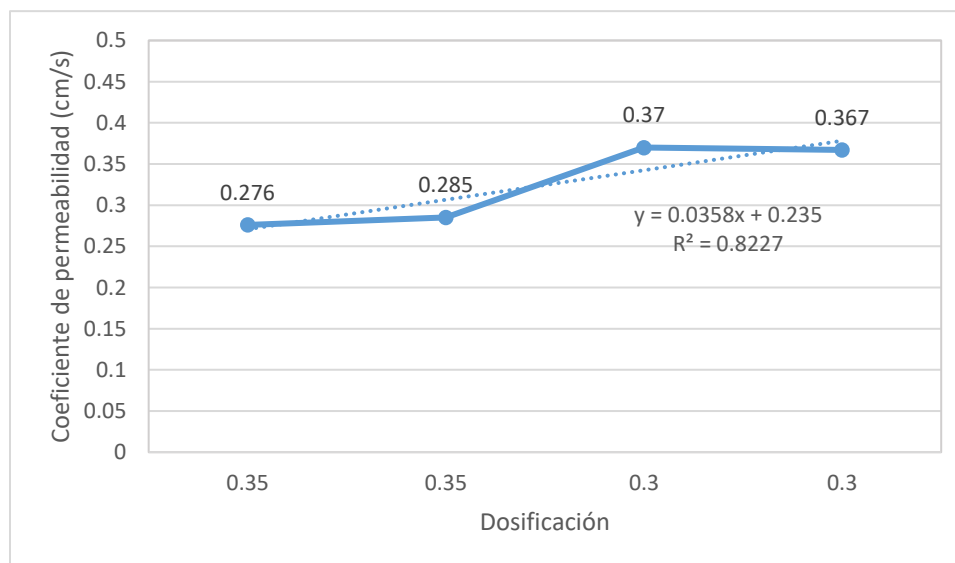
Dosif.	Identificación	K	K promedio	Desviación estandar
		cm/s	cm/s	
1C	1C-7	0.241	0.276	0.04
	1C-8	0.274		
	1C-9	0.314		
	1C-10	0.301	0.285	0.04
	1C-11	0.310		
	1C-12	0.245		

Dosif.	Identificación	K	K promedio	Desviación estandar
		cm/s	cm/s	
2C	2C-7	0.349	0.370	0.02
	2C-8	0.377		
	2C-9	0.385		
	2C-10	0.332	0.367	0.04
	2C-11	0.362		
	2C-12	0.407		

Fuente: Autor

Con los resultados obtenidos se realizó la siguiente gráfica, donde se encuentra resumido los coeficientes de permeabilidad para cada dosificación. En ella se observa que la relación a/c que otorgar el coeficiente más alto corresponde a 2C rondando este los 0.37 cm/s. En cuanto a la permeabilidad más bajo, este fue obtenido con 1C, oscilando en 0.28 cm/s. Si se comparan los dos valores se tiene una diferencia de aproximadamente 0.09 cm/s. lo que significa que la dosificación 2C es 32.14% más permeable que la dosificación 1C. Además, al comprar estos valores con el rango recomendado en [1] en ambos casos se encuentran dentro de este.

Figura 12 Coeficiente de permeabilidad promedio



Fuente: Autor

Tomando como referencia la investigación realizada por Castillo, N. y Velasco J. (2023) [32] donde se realizaron muestras patrón con diferentes relaciones a/c, en la dosificación

que se trabajó con una relación a/c de 0.35 se obtuvo una permeabilidad de 0.37 cm/s a los 28 días, siendo este superior al coeficiente obtenido en la presente investigación en la dosificación 1C, la cual se realizó con la misma relación a/c. Aunque, conviene resaltar que el valor de 0.37 cm/s es cercano a la permeabilidad de la dosificación 2C, la cual se realizó con relación a/c de 0.30.

Posteriormente se realizó el ensayo de contenido de vacíos ocupando los mismos cilindros con los que se realizó la prueba de permeabilidad.

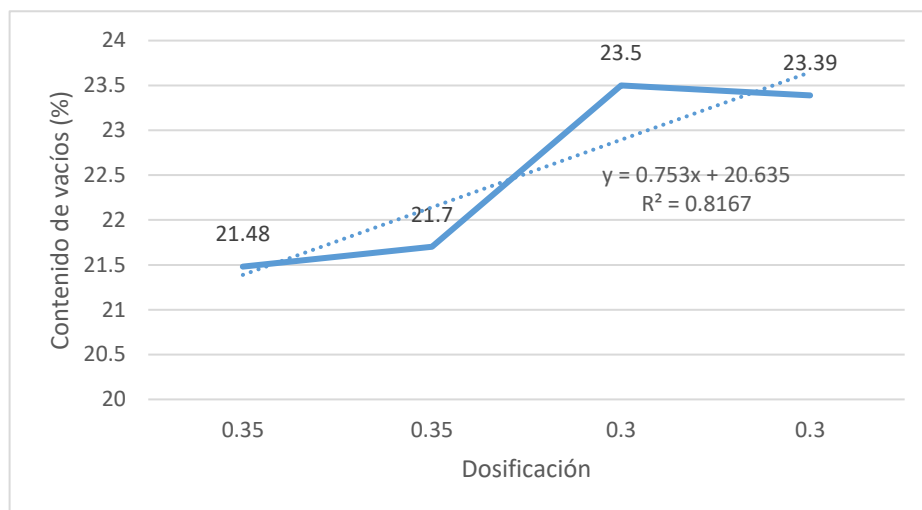
Tabla 16 Contenido de vacíos a los 28 días

Dosif.	Identificación	Porcentaje de vacíos	Porcentaje de vacíos promedio	Desviación estandar
		%	%	
1C	1C-7	20.42	21.48	0.97
	1C-8	21.70		
	1C-9	22.33		
	1C-10	21.06	21.70	0.64
	1C-11	21.70		
	1C-12	22.33		
2C	2C-7	22.33	23.50	1.12
	2C-8	23.61		
	2C-9	24.56		
	2C-10	21.70	23.39	1.60
	2C-11	23.61		
	2C-12	24.88		

Fuente: Autor

En la tabla 16 se puede observar que la dosificación 2C posee la porosidad más alta, teniendo valores alrededor de 23.40%, por otra parte, la dosificación 1C posee una porosidad de valores que rondan el 21.50%.

Figura 13 Contenido de vacíos promedio



Fuente: Autor

Del mismo modo que con permeabilidad, se realizó un diagrama resumen. En la figura 13 se puede evidenciar que la porosidad sigue la misma tendencia que la permeabilidad, esto se debe a que estas propiedades son directamente proporcionales, en otras palabras, más porosidad proporciona mayor permeabilidad y viceversa, lo cual se puede evidenciar con los ensayos realizados, debido a que en ambas propiedades la dosificación 2C obtuvo los valores más altos.

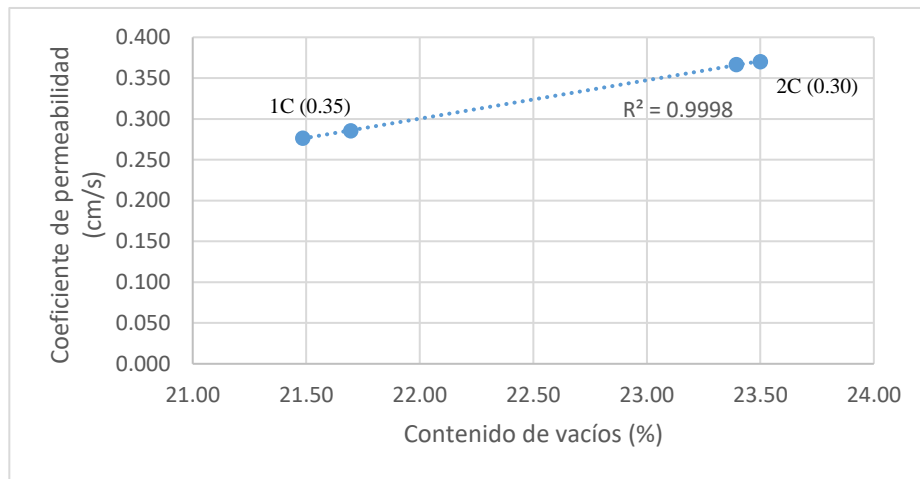
Adicionalmente, los resultados obtenidos fueron comparados con la figura A6.1 de ACI 211.3R-02 [33], donde se muestra la relación entre contenido de vacíos y permeabilidad. En este apartado se establece que para un contenido de vacíos de 20% el valor usual de permeabilidad es 120 mm/min o 0.25 cm/s y para el 25% este valor es de aproximadamente 350 mm/min o 0.58 cm/s. Por lo que se realizaron proyecciones en la gráfica para obtener los valores de permeabilidad para 21%, 22%, 23% y 24% de contenido de vacíos o porosidad, ya que los resultados de porosidad se encuentran entre dichos porcentajes.

De este modo se obtuvo que para 21% y 22% de contenido de vacíos la permeabilidad oscila en 0.26 y 0.30 cm/s, que, al ser comparados con lo obtenido en la presente investigación, la porosidad de la dosificación 2C al tener 0.276 y 0.285 cm/s de permeabilidad se puede evidenciar que cumple con lo establecido en la figura A6.1. Por

otra parte, en esta gráfica se obtuvo que para 23% y 24% los valores de permeabilidad son aproximadamente 0.36 y 0.45 cm/s, que, de la misma manera, al ser comparados con lo obtenido por la dosificación 1C, cuyos valores de porosidad se encuentran entre estos dos porcentajes, teniendo una permeabilidad de 0.37 y 0.367 cm/s, los cuales también se encuentran de lo propuesto por la ACI, además, estos valores son cercanos a 0.36 cm/s.

Al tener estas dos propiedades una relación directamente proporcional, en la figura 14 se observa de mejor manera que los ensayos con mayor porosidad también son aquellos que proporcionan mayor permeabilidad, como ya se mencionó.

Figura 14 Contenido de vacíos vs Permeabilidad



Fuente: Autor

Igualmente, los resultados de contenido de vacíos fueron comparados con la figura A6.2 de ACI 211.3R-02 [33], la cual relaciona el porcentaje de pasta cementante con el contenido de vacíos. En ella se establece que para un 20% de pasta cementante el valor esperado de contenido de vacíos es de aproximadamente 22%, de modo que la dosificación 1C al tener valores alrededor de 21.50% se encuentra ligeramente por debajo de lo esperado. Sin embargo, la dosificación 2C se encuentra por arriba de dicho valor, puesto que posee contenido de vacíos alrededor de 23.40%.

Adicionalmente al comparar los valores en la tabla 16 con las normas ACI 522R-10, NBR 161416/2015 y VTT-T-08022-13 se observa que cumplen con las tres normas, siendo las

dos últimas normas brasileñas que se ha tomado como referencia debido a que Brasil es el único país sudamericano con normativa para el hormigón permeable.

Tabla 17 Porosidad y permeabilidad según Normas

Hormigón permeable	Porosidad	k
	%	cm/s
1C	21.48	0.276
	21.70	0.285
2C	23.50	0.370
	23.39	0.367
ACI 522R-10	10-35	>0.1
NBR 16416/2015	15-30	>0.1
VTT-R-080225-13	20-35	>0.15

Fuente: Autor, [1], [34]

3.1.3. Comparación de resistencia a compresión

Tabla 18 Resistencia a la compresión 7 días

Dosif.	Identificación	Dimensiones		Carga	Esfuerzo	Esfuerzo Promedio	Desviación estandar
		Área	Altura				
		cm ²	cm				
				kN	Mpa	Mpa	
1C	1C-1	78.54	20	49.32	6.28	6.42	0.350
	1C-2	78.54	20	53.55	6.82		
	1C-3	78.54	20	48.40	6.16		
	1C-4	78.54	20	48.97	6.24	6.39	0.144
	1C-5	78.54	20	50.48	6.43		
	1C-6	78.54	20	51.18	6.52		
2C	2C-1	78.54	20	45.51	5.79	5.81	0.157
	2C-2	78.54	20	44.43	5.66		
	2C-3	78.54	20	46.89	5.97		
	2C-4	78.54	20	47.47	6.04	5.96	0.129
	2C-5	78.54	20	47.3	6.02		
	2C-6	78.54	20	45.64	5.81		

Fuente: Autor

Se puede observar que los valores obtenidos inferiores a los valores usuales del hormigón tradicional, esto se debe a que para conseguir su condición de permeables su contenido de

vacíos aumenta, lo cual genera que disminuya el área efectiva que resiste los esfuerzos. Además, al comparar la resistencia para ambas relaciones a/c su variación no es significativa, siendo que la dosificación 1C proporciona un 7.73% más de resistencia. Al igual que con las dosificaciones de prueba se realizó una proyección de la resistencia a los 28 días, de modo que los valores esperados para este tiempo rondan los 9 MPa, el cual es una resistencia que se encuentra entre los valores usuales de hormigón permeable según la ACI 522R-10 [1].

Los resultados se compararon con la investigación de Castillo, N. y Velasco J. (2023) [32] en la cual, la resistencia a los 7 días para una relación a/c de 0.35 fue de 4.47 MPa, este valor se encuentra por debajo de los obtenido, dado que se tiene una diferencia del 43%, si es comparada con la resistencia de la dosificación 1C. También se la comparó con la resistencia de la dosificación 2C, la cual tiene la misma relación a/c inferior, no obstante, la resistencia de esta dosificación fue un 31.5% mayor.

Posteriormente, fueron ensayados 12 cilindros a los 28 días. La tabla 19 muestra la resistencia obtenida. Como se había mencionado, la resistencia esperada para esta edad rondaba los 9 MPa, dicha proyección fue cercana a la realidad.

Tabla 19 Resistencia a la compresión 28 días

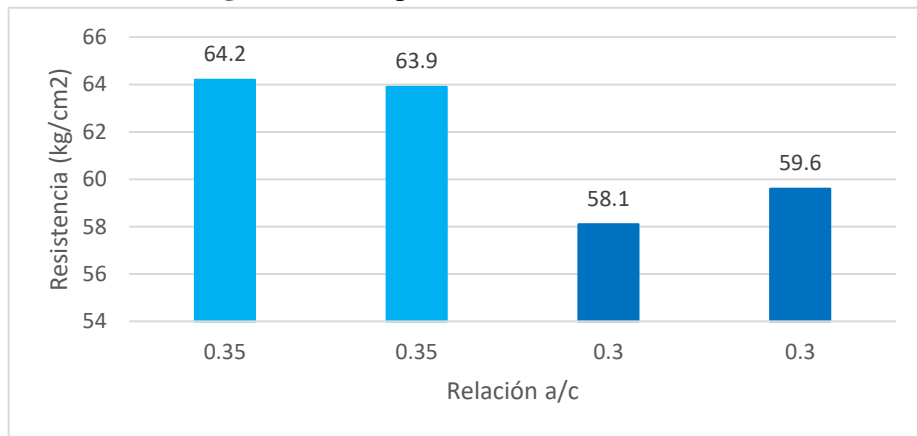
Dosif.	Identificación	Dimensiones		Carga kN	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo Promedio Mpa	Desviación estandar
		Área	Altura				
		cm ²	cm				
1C	1C-7	78.54	20	77.94	9.92	9.70	0.632
	1C-8	78.54	20	70.54	8.98		
	1C-9	78.54	20	79.97	10.18		
	1C-10	78.54	20	71.07	9.05	9.59	
	1C-11	78.54	20	75.18	9.57		
	1C-12	78.54	20	79.75	10.15		
2C	2C-7	78.54	20	70.98	9.04	9.03	0.126
	2C-8	78.54	20	69.89	8.90		
	2C-9	78.54	20	71.86	9.15		
	2C-10	78.54	20	72.98	9.29	9.16	
	2C-11	78.54	20	70.89	9.03		
	2C-12	78.54	20	71.86	9.15		

Fuente: Autor

Anteriormente se mencionó que los valores de hormigón permeable según la ACI 522R-10 van desde los 6.8 MPa hasta los 37.9 MPa, por lo que los valores de la tabla 19, al estar rondando los 9 MPa cumplen con esta normativa.

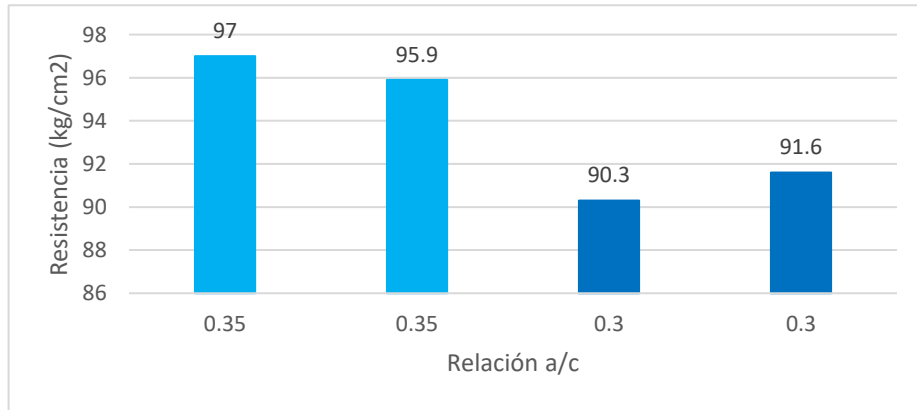
Tomando como base los resultados obtenidos se realizaron cuadros comparativos para las dos relaciones a/c estudiadas, tanto para los 7 días como para los 28. En las figuras 15 y 16 se observa que la relación a/c de 0.35 correspondiente a la dosificación 1C desarrolla una resistencia mayor en comparación con la relación a/c de 0.30, la cual es la dosificación 2C. A los 7 días la dosificación 1C desarrolló 7.73% más resistencia que la segunda dosificación, mientras que, a los 28 días, este porcentaje bajó hasta 5.90%. Sin embargo, la diferencia es mínima puesto que no existe ni 1 MPa entre ambas dosificaciones.

Figura 15 Comparación Resistencia 7 días



Fuente: Autor

Figura 16 Comparación resistencia 28 días



Fuente: Autor

Si se compara con hormigones tradicionales, la resistencia y la relación a/c tienen una relación inversa, en otras palabras, una relación a/c menor desarrolla mayor resistencia. En hormigones permeables sucede lo contrario, debido que la mayor resistencia fue obtenida con la dosificación con relación a/c más alta, teniendo en este caso una relación directa. Además, según este método una diferencia de 0.05 en a/c representa un incremento de 5 MPa, siendo este el 12.5% de incremento. De modo que la variación de resistencia obtenida no es significativa.

Por otra parte, también se comparó con las normas ACI 522R-10, NBR 16416/2015 [34] y VTT-R-080225-13 en este caso se observa que, las resistencias obtenidas solo cumplen con la norma ACI al estar entre 6.8 MPa y 37.9 MPa, como se observa en la tabla 19. A pesar de ello, no cumple con las normas brasileñas, debido a que los valores son inferiores a los 10 MPa. Debido a ello, los valores obtenidos son aproximadamente dos veces menor que lo mínimo establecido por la segunda norma.

Tabla 20 Compresión según la norma

Hormigón permeable	Compresión
	MPa
1C	9.70
	9.59
2C	9.03
	9.16
ACI 522R-10	6.8-37.9
NBR 16416/2015	20-35
VTT-R-080225-13	10-20

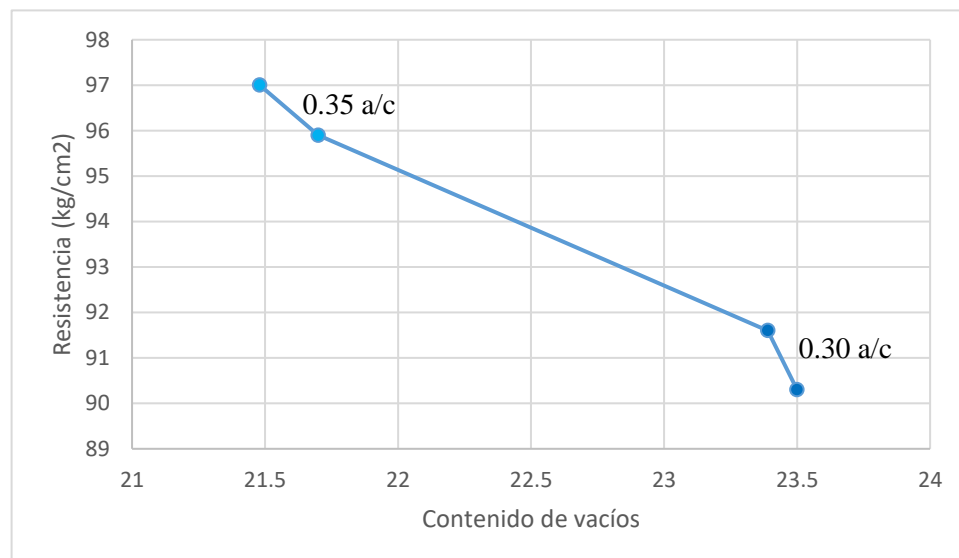
Fuente: Autor, [1], [34]

Adicionalmente, las resistencias fueron relacionadas con lo planteado en la investigación de Castillo, N. y Velasco J. (2023) [32], cuyas muestras patrón con una relación a/c de 0.35 obtuvieron 8.86 MPa a los 28 días. De la misma manera que sucedió a los 7 días, la resistencia desarrollada por la dosificación 1C, en la cual se ocupa la misma relación a/c, es mayor por un 8.85%. También se la comparó con la dosificación 2C y a pesar de tener una relación a/c menor obtuvo una resistencia mayor en 2.62%.

Del mismo modo, los resultados obtenidos fueron comparados con la investigación de Patidar, R. y Yadav, S. [35] en la cual se emplearon las mismas relaciones a/c y una cantidad de fibra similar, con tamaño de grava entre 10 mm y 20 mm, cuyos resultados a los 28 días fueron de 10.94 MPa para a/c de 0.35 y 9.78 MPa para a/c de 0.30. De modo que los valores obtenidos en la presente investigación son inferiores por 1.24 MPa y 0.62 MPa, para las dosificaciones 1C y 2C, respectivamente.

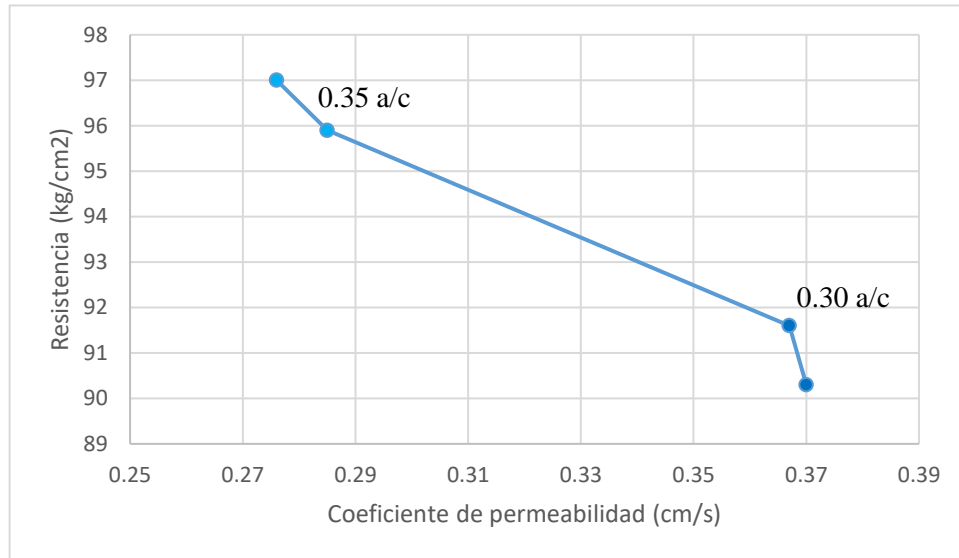
Como se observa en las figuras 17 y 18, las cuales corresponden a la relación entre porosidad, permeabilidad y resistencia, ambos siguen la misma tendencia, debido a que, los ensayos con mayor permeabilidad obtuvieron las resistencias más bajas, y al tener la porosidad una relación directamente proporcional con la permeabilidad, sucede lo mismo, lo que quiere decir que la resistencia a compresión posee una relación inversamente proporcional con permeabilidad y por ende con porosidad.

Figura 17 Resistencia vs Contenido de vacíos



Fuente: Autor

Figura 18 Resistencia vs Permeabilidad



Fuente: Autor

3.1.4. Determinación de resistencia a flexión

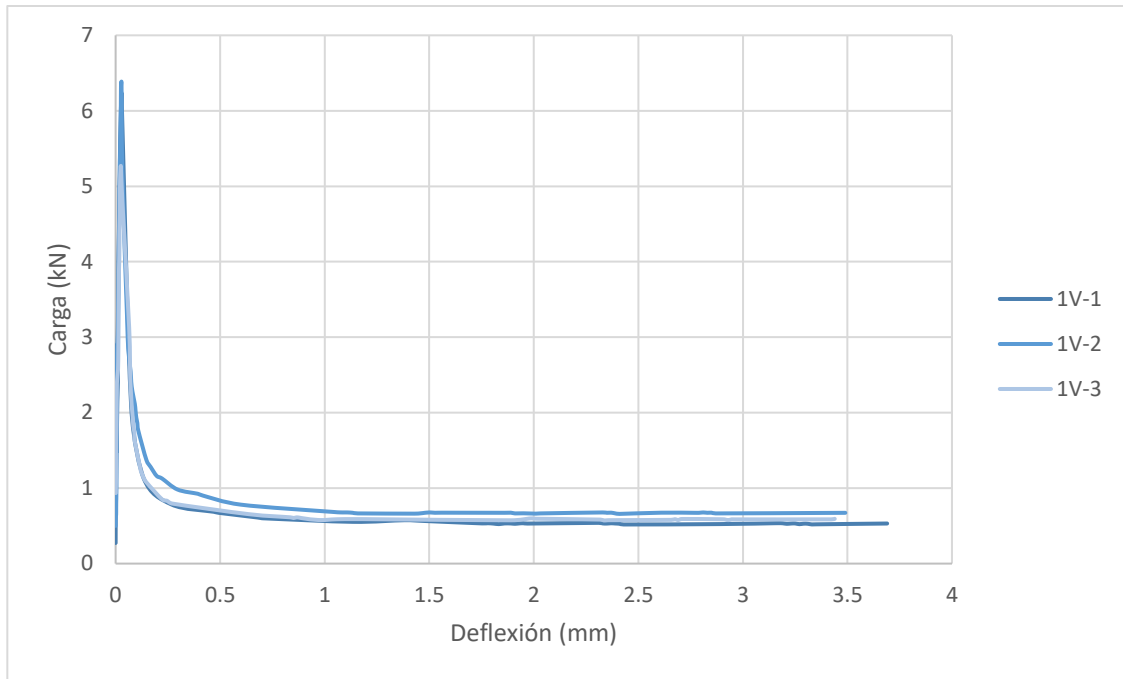
Se prosiguió con los ensayos a flexión para lo cual la dosificación empleada en la elaboración de vigas se encuentra descrita en los anexos 16 y 15. La tabla 21 describe las carga y esfuerzos máximos, así como a la distancia de L/600 y L/150 para la dosificación 1V correspondiente a la relación a/c de 0.35, puntos determinados en la norma ASTM C1906 para hormigón con fibras. La figura 19 corresponde al diagrama carga (kN) vs deflexión (mm) para la misma dosificación.

Tabla 21 Resumen de esfuerzos residuales y deflexión 1V

a/c	ID	Deflexión	Carga Máxima	Carga (L/600)	Carga (L/150)	Esfuerzo máximo	Esfuerzo (L/600)	Esfuerzo (L/150)
		mm	kN	kN	kN	MPa	MPa	MPa
0.35	1V-1	0.03	6.24	0.62	0.53	1.87	0.19	0.16
	1V-2	0.03	6.39	0.76	0.68	1.92	0.23	0.20
	1V-3	0.03	5.27	0.68	0.57	1.58	0.20	0.17
Desviación estándar						0.18	0.02	0.02
Promedio		0.03	5.97	0.68	0.59	1.79	0.21	0.18

Fuente: Autor

Figura 19 Diagrama carga vs deflexión 1V



Fuente: Autor

Según lo establecido en la norma ASTM C1906 [36], la deflexión de rotura para vigas de 100x100x350 debe estar en 0.04 ± 1 mm, y el promedio dado para la deflexión de esta dosificación se encuentra acorde con este parámetro. En cuanto a los valores máximos obtenidos, el valor pico promedio alcanzado fue de 5.97 kN, carga que correspondiente a 1.79 MPa de esfuerzo, que al compararlo con la resistencia a compresión es el 18% de esta. Usualmente, la resistencia a flexión es del 10% al 20% de la resistencia a compresión, de modo que el valor encontrado cumple con ello.

Las vigas ensayadas poseen un 0.6% de fibras de polipropileno, lo cual genera esfuerzos residuales después de la rotura, que se pueden evidenciar en la figura 20 puesto que la gráfica continúa hasta más allá de los 3.5 mm. Esto no indica que esta deflexión sea la máxima que se puede alcanzar. Conviene subrayar que las fibras en hormigones pueden cumplir o no una función estructural, para que esto último suceda los esfuerzos residuales en los puntos $L/600$ y $L/150$ deben ser el 40% y 20% del esfuerzo máximo según la EHE-8 [37]. Debido a ello se calculó los esfuerzos residuales en estos puntos, teniendo que en

el punto de L/600 alcanzan el 11.5% y en L/150 el 10.5%, estos porcentajes están por debajo en lo establecido en la norma, por lo que la fibra en la dosificación 1V no cumple una función estructural.

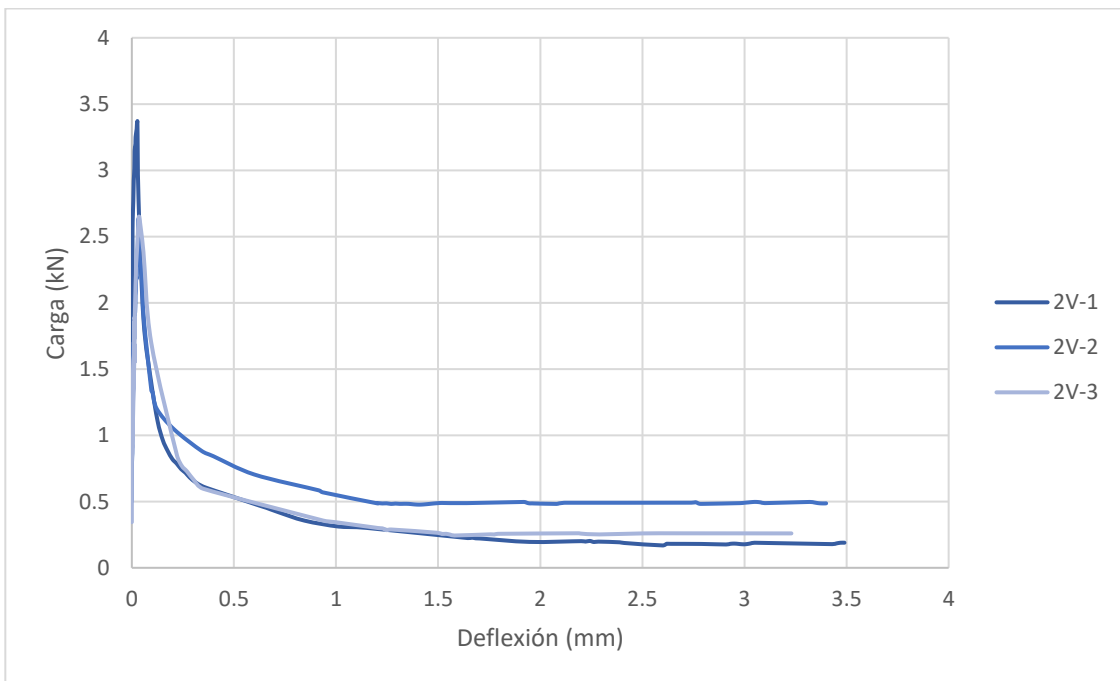
Siguiendo el mismo procedimiento, se realizó la tabla 22, la cual abarca la carga y esfuerzos máximos, a L/600 y L/150 para la dosificación 2V correspondiente a 0.30 de relación a/c.

Tabla 22 Resumen de esfuerzos residuales y deflexión 2V

a/c	ID	Deflexión	Carga Máxima	Carga (L/600)	Carga (L/150)	Esfuerzo máximo	Esfuerzo (L/600)	Esfuerzo (L/150)
		mm	kN	kN	kN	MPa	MPa	MPa
0.30	2V-1	0.03	3.37	0.41	0.20	1.01	0.12	0.06
	2V-2	0.03	2.64	0.72	0.49	0.79	0.22	0.15
	2V-3	0.04	2.65	0.50	0.25	0.80	0.15	0.08
Desviación estándar						0.13	0.05	0.05
Promedio		0.03	2.89	0.54	0.31	0.87	0.16	0.09

Fuente: Autor

Figura 20 Diagrama carga vs deflexión



Fuente: Autor

En base a lo calculado en la tabla 22 y figura 20, se determina que la deflexión de rotura sucedió a 0.03 mm, al igual que la primera dosificación cumple con lo estipulado en la norma ASTM C1609 [36]. En cuanto a los valores máximos, la carga pico promedio para esta dosificación es de 2.89 kN, el cual desarrolló un esfuerzo máximo de 0.87 MPa, que al ser comparado con la resistencia a compresión para una relación a/c de 0.30, este corresponde su 10%.

Al comparar estos valores con los obtenidos en la primera dosificación se evidencia una diferencia entre ambas. Si se observa el parámetro de carga máxima existen una diferencia del 40.41%, sin embargo, al analizar el esfuerzo máximo esta diferencia aumenta al 48.60%. El aumento de resistencia a compresión entre las dos dosificaciones fue de 5.90% mientras que en flexión casi ronda el 50%. Por consiguiente, se demuestra que la relación a/c tiene mayor relevancia e influencia en la resistencia flexión que la que tiene en la resistencia a compresión.

De igual manera que en la primera dosificación se calcularon los esfuerzos residuales para comprobar si la fibra en el hormigón cumple una función estructural o no, obteniendo los valores de 18.8% y 10.5% para los puntos L/600 y L/150, respectivamente, y al igual que la dosificación anterior, la fibra no cumple una función estructural al no alcanzar el 40% y 20% de esfuerzos residuales en dichos puntos.

Energía de fractura

En este apartado se calcularon la energía de fractura y la energía de fractura para ambas dosificaciones, con fin de analizar su tenacidad y ductilidad, siendo determinadas hasta los 2 mm. En la tabla 23 y 24 se observan los promedios de trabajo y energía en cada dosificación, en tres puntos: rotura, 1mm y 2mm según lo establecido en ASTM C1609 [36].

Tabla 23 Trabajo y energía de fractura para a/c 0.35

Relación a/c	Identificación	Trabajo (rotura)	Trabajo (1mm)	Trabajo (2mm)	Energía (Rotura)	Energía (1mm)	Energía (2mm)
		kN-mm	kN-mm	kN-mm	N/m	N/m	N/m
0.35	1V-1	0.106	1.013	1.546	10.470	100.302	153.094
	1V-2	0.105	1.142	1.814	10.643	115.326	183.228
	1V-3	0.079	0.976	1.559	7.855	96.602	154.333
Desviación estandar		0.02	0.09	0.15	1.56	9.92	17.05
Promedio		0.10	1.04	1.64	9.66	104.08	163.55

Fuente: Autor

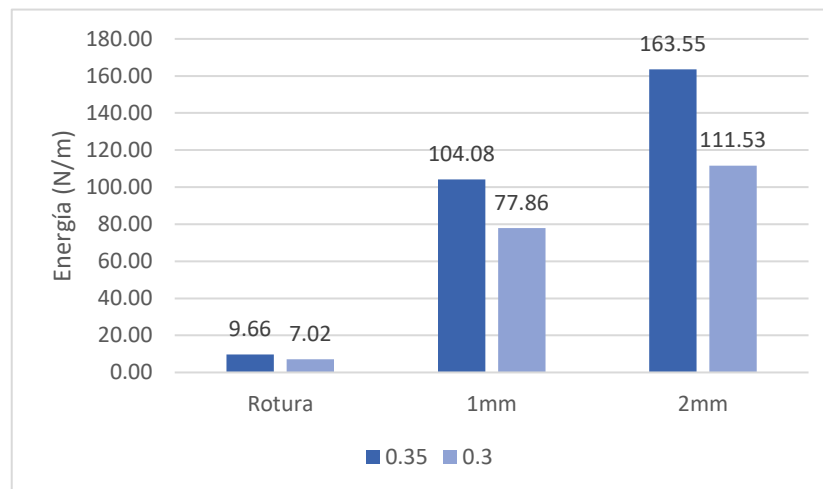
Tabla 24 Trabajo y energía de fractura para a/c 0.30

Relación a/c	Identificación	Trabajo (rotura)	Trabajo (1mm)	Trabajo (2mm)	Energía (Rotura)	Energía (1mm)	Energía (2mm)
		kN-mm	kN-mm	kN-mm	N/m	N/m	N/m
0.30	2V-1	0.079	0.719	0.970	7.639	69.816	94.165
	2V-2	0.062	0.891	1.387	6.139	88.208	137.312
	2V-3	0.073	0.756	1.031	7.285	75.569	103.127
Desviación estandar		0.01	0.09	0.23	0.78	9.41	22.77
Promedio		0.07	0.79	1.13	7.02	77.86	111.53

Fuente: Autor

En base a las tablas 23 y 24 se elaboró un diagrama comparativo de los promedios de ambas dosificaciones para observar de mejor manera la diferencia existente entre ellas, este diagrama corresponde a la figura 21.

Figura 21 Comparación de energía de fractura



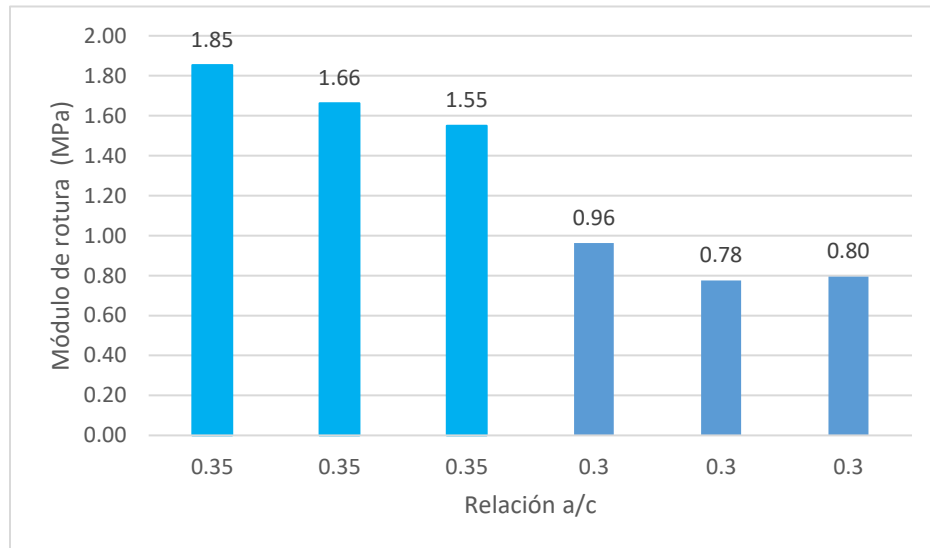
Fuente: Autor

Como se observa, la dosificación que más energía de rotura desarrolla es la 1V que a su vez también fue la dosificación que mayor esfuerzo máximo alcanzó. Al contrastar los valores de energía de fractura en cada punto se tiene que la dosificación 1V en el punto de rotura desarrolla un 37.61 más que la dosificación 2V, en el siguiente punto correspondiente a 1mm de deflexión, la primera dosificación posee 33.68% más energía de fractura y finalmente en punto de 2 mm esta diferencia entre dosificaciones es de 46.6%. Por consiguiente, la dosificación 1V es más dúctil y por ende es necesaria una mayor carga para generar grietas superficiales.

Módulo de rotura

En pavimentos rígidos un parámetro importante es el módulo de rotura ya que se considera una forma de representar la resistencia a flexión del hormigón, debido a ello se ha calculado esta propiedad cuyo desglose se encuentra en el anexo 18.

Figura 22 Módulos de rotura



Fuente: Autor

En la figura 22 se plasmó un gráfico comparativo entre ambas dosificaciones, de modo que se observa que el módulo de rotura de la dosificación 1V posee un valor superior en comparación a la dosificación 2V. Al determinar los promedios del módulo de rotura se obtuvo que en la dosificación 1V es de 1.687 MPa, sin embargo, la dosificación 2V tuvo

un módulo de 0.846 MPa, teniendo entre si una diferencia del 50.01%, de esta manera se vuelve a comprobar que la relación a/c tiene una influencia importante en flexión.

Según la investigación de Ibarra, M. (2018) [38], en la cual se realizaron vigas de hormigón permeable reforzado con fibras y relación a/c de 0.35, los módulos de rotura obtenidos de encontraban alrededor de 1.70 MPa para probetas realizadas con agregado mono granular, como en la presente investigación. Realizando la respectiva comparación con los valores obtenidos, se tiene que la dosificación 1V posee un valor cercano al de la investigación de Ibarra.

Al igual que en compresión y permeabilidad los datos obtenidos se compararon con las normas ACI 522R-10, NBR 16416/2015 y VTT-R-080225-13. En la tabla 24 evidencia que los valores obtenidos en ambas dosificaciones se encuentran en el rango establecido según la ACI. Por el contrario, con las normas brasileñas, la dosificación 1V es la única que cumple puesto que posee un módulo de rotura superior a 1.5 MPA. Adicionalmente, según la norma NBR esta dosificación podría ser empleada en camineras y aceras, es decir netamente para flujo peatonal, puesto que para poder ser empleada en flujo vehicular su módulo de rotura debería ser mayor a 2 MPa, lo cual no corresponde a lo estudiado.

Tabla 25 Comparación flexión con normas

Hormigón permeable	Flexión MPa
1V	1.79
2V	0.87
ACI 522R-10	0.68-2.15
NBR 16416/2015	>1
VTT-R-080225-13	1.5-3.0

Fuente: Autor

3.2.Verificación de la hipótesis

Tras la elaboración de las 24 probetas cilíndricas, distribuidas en dos dosificaciones con 0.6 kg/m^3 de fibras, ensayadas a permeabilidad, porosidad y compresión, además de 6 probetas prismáticas con las mismas dosificaciones, las cuales fueron ensayadas a flexión. Se puede evaluar la hipótesis:

La relación a/c influye en las propiedades mecánicas del hormigón permeable.

Se comprueba la hipótesis, puesto que en el análisis por compresión se determinó que la diferencia entre las dos dosificaciones es del 5.90%, lo cual representa una diferencia mínima si es comparada con la diferencia usual para hormigones tradicionales, debido a que en este la diferencia es de 1 MPa por cada 0.01 de relación a/c. No obstante, a pesar de no ser significativa en compresión, en cuanto a flexión la diferencia la diferencia fue más amplia, esto es debido a que la dosificación 1V desarrollo aproximadamente el doble que la dosificación 2V, en carga máxima, esfuerzo máximo, módulo de rotura y ductilidad.

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Al realizar los ensayos de porosidad se obtuvo que la dosificación más porosa corresponde a dosificación 2C (a/c de 0.30) con 23.50%, en contraste con la dosificación 1C que obtuvo los valores más bajos en ambas propiedades. Y al ser comparados con la resistencia a compresión se puede afirmar que la porosidad se encuentra relacionada de manera inversamente proporcional con la resistencia que se puede desarrollar.
- Tras los ensayos de permeabilidad y porosidad se observó que el ensayo con valor más alto de permeabilidad (0.37 cm/s), a su vez obtuvo la mayor porosidad. De igual manera, el ensayo con el valor más bajo de permeabilidad (0.276 cm/s) tuvo la menor porosidad. Por ello, determinó que el coeficiente de permeabilidad se relaciona de manera directa con la porosidad.
- Los ensayos de compresión reflejaron que la resistencia máxima alcanzada por el hormigón permeable con 0.6 kg/m³ de fibra de polipropileno fue de 9.70 MPa para la dosificación 1C correspondiente a una relación a/c de 0.35, mientras que para la dosificación 2C este valor fue de 9.16 MPa. Por ende, la diferencia entre ambas dosificaciones corresponde al 5.90%.
- Tras el cálculo de módulos de rotura, la dosificación con mayor módulo de rotura fue la 1V alcanzando 1.69 MPa, el cual representa un 50.01% del módulo para la dosificación 2V. Por consiguiente, la primera dosificación podría ser empleada para camineras, no obstante, al ser un valor bajo, no se puede emplear como pavimento para flujo vehicular.
- Durante el ensayo a flexión se calcularon los esfuerzos residuales, en los puntos de L/600 y L/150 para determinar si la fibra añadida cumple una función estructural. Debido a que los valores de dichos esfuerzos en ambas dosificaciones no llegan al 40% y 20% establecidos por la EHE-8, se determinó que en ninguna dosificación las fibras cumplen función estructural.

4.2.Recomendaciones

- Realizar coronación con yeso cemento antes de realizar ensayos de compresión en probetas cilíndricas, debido a que su superficie irregular no permite que los esfuerzos se distribuyan adecuadamente, se pueden obtener resultados dispersos.
- En futuras investigaciones, emplear mayor porcentaje de pasta cementante y agregado fino para observar su influencia en la resistencia a compresión y el coeficiente de permeabilidad.
- Emplear diferentes porcentajes de fibras de polipropileno para observar su influencia en la resistencia a flexión, tenacidad y ductilidad del hormigón permeable.

MATERIAL DE REFERENCIA

Referencias Bibliográficas

- [1] ACI, “Report on Pervious Concrete, ACI 522R-10,” *American Concrete Institute*, vol. 10, no. Reapproved, p. 42, 2010.
- [2] G. Xu *et al.*, “Investigation on the properties of porous concrete as road base material,” *Constr Build Mater*, vol. 158, pp. 141–148, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.09.151.
- [3] G. F. B. Sandoval *et al.*, “Correlation between permeability and porosity for pervious concrete (PC),” *Dyna (Medellin)*, vol. 86, no. 209, pp. 151–159, Apr. 2019, doi: 10.15446/DYNA.V86N209.77613.
- [4] K. Čosić, L. Korat, V. Ducman, and I. Netinger, “Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 78, pp. 69–76, Mar. 2015, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.12.073.
- [5] T. K. M. Ali, N. Hilal, R. H. Faraj, and A. I. Al-Hadithi, “Properties of eco-friendly pervious concrete containing polystyrene aggregates reinforced with waste PET fibers,” *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 5, no. 3, pp. 1–16, Dec. 2020, doi: 10.1007/S41062-020-00323-W/METRICS.
- [6] F. V. Kharbikar and S. Pathak, “ENHANCING THE STRENGTH OF PERVIOUS CONCRETE USING POLYPROPYLENE FIBRE.” [Online]. Available: www.ijariie.com
- [7] N. A. Brake, H. Allahdadi, and F. Adam, “Flexural strength and fracture size effects of pervious concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 113, pp. 536–543, Jun. 2016, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.03.045.
- [8] O. AlShareedah and S. Nassiri, “Pervious concrete mixture optimization, physical, and mechanical properties and pavement design: A review,” *J Clean Prod*, vol. 288, p. 125095, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.125095.

- [9] G. Chaparro, “Estudio y análisis de dosificaciones para la elaboración de hormigón poroso con materiales locales,” *Revista sobre Estudios e Investigaciones del Saber Académico*, vol. 7, no. 7, pp. 18–22, 2013.
- [10] J. Jacinto, “Diseño de mezcla de concreto permeable utilizando diferentes porcentajes de agregado fino y aditivos en la ciudad de Chiclayo,” Tesis de grado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Mogrovejo, 2021.
- [11] A. Bautista, “Diseño de Pavimento rígido permeable para la evacuación de agua pluviales según la norma ACI 522R-10,” Tesis de grado, Universidad de San Martín de Porres, Lima, 2018.
- [12] J. Aguilar and F. Rupay, “Influencia de la fibra de polipropileno en el diseño de concreto permeable $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2 - 2019$,” Tesis de grado, Universidad César Vallejo, Lima, 2019.
- [13] F. Núñez, “Fabricación de hormigón permeable para canchas de uso múltiple con la utilización de agregados de la provincia de Pichincha,” Tesis de grado, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR, Quito, 2015.
- [14] H. A. Cardona Maldonado, “Propiedades Mecánicas y de filtración en hormigones permeables con cemento portland e hidráulicos,” 2017, Accessed: May 04, 2023. [Online]. Available: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/6500>
- [15] M. Vallejo and V. Amaguaya, “Selección del material óptimo para el diseño de concreto permable utilizando agregados de dos minas de la provincia de chimborazo y el cemento portland tipo 1, en relación a la obtención de mayor permeabilidad y resistencia.,” Tesis de grado, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2016.
- [16] P. Guerra and C. Guerra, “Diseño de un pavimento rígido permeable como sistema urbano de drenaje sostenible,” *Revista de difusión cultural y científica de la Universidad La Salle*, vol. 20, pp. 121–140, 2020.

- [17] J. Ayala, E. Gil, R. Cornejo, and S. Muñoz, “Metodologías empleadas para la producción de concreto permeable usando parcialmente materiales reciclados como agregados: una revisión literaria,” *TecnoLógicas*, vol. 25, no. 53, 2022.
- [18] L. González, *Conceptos Generales sobre los Agregados*. Palmira: Universidad Nacional de Colombia, 2008.
- [19] NTE INEN 858, “Áridos. Determinación de la Masa Unitaria (Peso Volumétrico) y Porcentaje de Vacíos,” Quito, 2010.
- [20] NTE INEN 857, “Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa y absorción del árido grueso,” Quito, 2010.
- [21] NTE INEN 856, “Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa y absorción del árido fino,” Quito, 2010.
- [22] M. Sanjuán and S. Chinchón, *Introducción a la fabricación y normalización del Cemento Portland*, Primera. Alicante: Universidad de Alicante.
- [23] Sika, “HOJA TÉCNICA DE PRODUCTO PLASTOCRETE DM,” 2018. Accessed: May 20, 2023. [Online]. Available: <http://ecu.sika.com>
- [24] ASTM C143/C143M, “Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete,” West Conshohocken, 2015. Accessed: May 20, 2023. [Online]. Available: https://www.astm.org/c0143_c0143m-12.html
- [25] ASTM C31/C31M, “Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field,” West Conshohocken, 2022. Accessed: May 20, 2023. [Online]. Available: https://www.astm.org/c0031_c0031m-22.html
- [26] ASTM C1231/C1231M, “Standard Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Cylindrical Concrete Specimens,” West Conshohocken, 2016. Accessed: May 20, 2023. [Online]. Available: https://www.astm.org/c1231_c1231m-15.html
- [27] NTE INEN 2554, “Hormigón Cemento Hidráulico Determinación De La Resistencia A La Flexión Del Hormigón,” Quito, 2011.

- [28] NTE INEN 696, “Áridos. Análisis granulométrico en los áridos. Fino y grueso,” Quito, 2011.
- [29] C. Reinoso, “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN ADOQUINES DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL Y HORMIGÓN PERMEABLE REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO,” Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2023. Accessed: May 21, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/37356/1/Tesis%20I.C.%201693%20-%20Reinoso%20Bonilla%20Carla%20Alexandra.pdf>
- [30] ASTM C39/C39M, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,” West Conshohocken, 2021. Accessed: May 20, 2023. [Online]. Available: https://www.astm.org/c0039_c0039m-21.html
- [31] ASTM C78/C78M, “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading),” West Conshohocken, 2022. Accessed: May 20, 2023. [Online]. Available: https://www.astm.org/c0078_c0078m-22.html
- [32] N. Castillo and J. Velasco, “ANÁLISIS DE UN HORMIGÓN PERMEABLE MEDIANTE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL AGREGADO GRUESO CON MATERIAL RECICLADO DE OBRA CIVIL,” Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2023.
- [33] ACI 211.3R-02, “Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete,” Michigan, 2009.
- [34] NBR 16416:2015, “Pavimentos permeáveis de concreto. Requisitos e procedimentos,” Brasil, 2015.
- [35] R. Patidar and M. Sonam Yadav, “EXPERIMENTAL STUDY OF PERVIOUS CONCRETE WITH POLYPROPYLENE FIBER,” *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2017, Accessed: Aug. 17, 2023. [Online]. Available: www.irjet.net

- [36] ASTM C1609/C1609M-12, “Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading),” 2019.
- [37] EHE-08, “Instrucción de Hormigón Estructural,” Madrid, 2010.
- [38] M. Ibarra, “VARIACIÓN DEL MÓDULO DE ROTURA DE LOS PAVIMENTOS DRENANTES USANDO FIBRAS SINTÉTICAS,” Tesis de Grado, Universidad Piloto de Colombia, Cundinamarca, 2018.

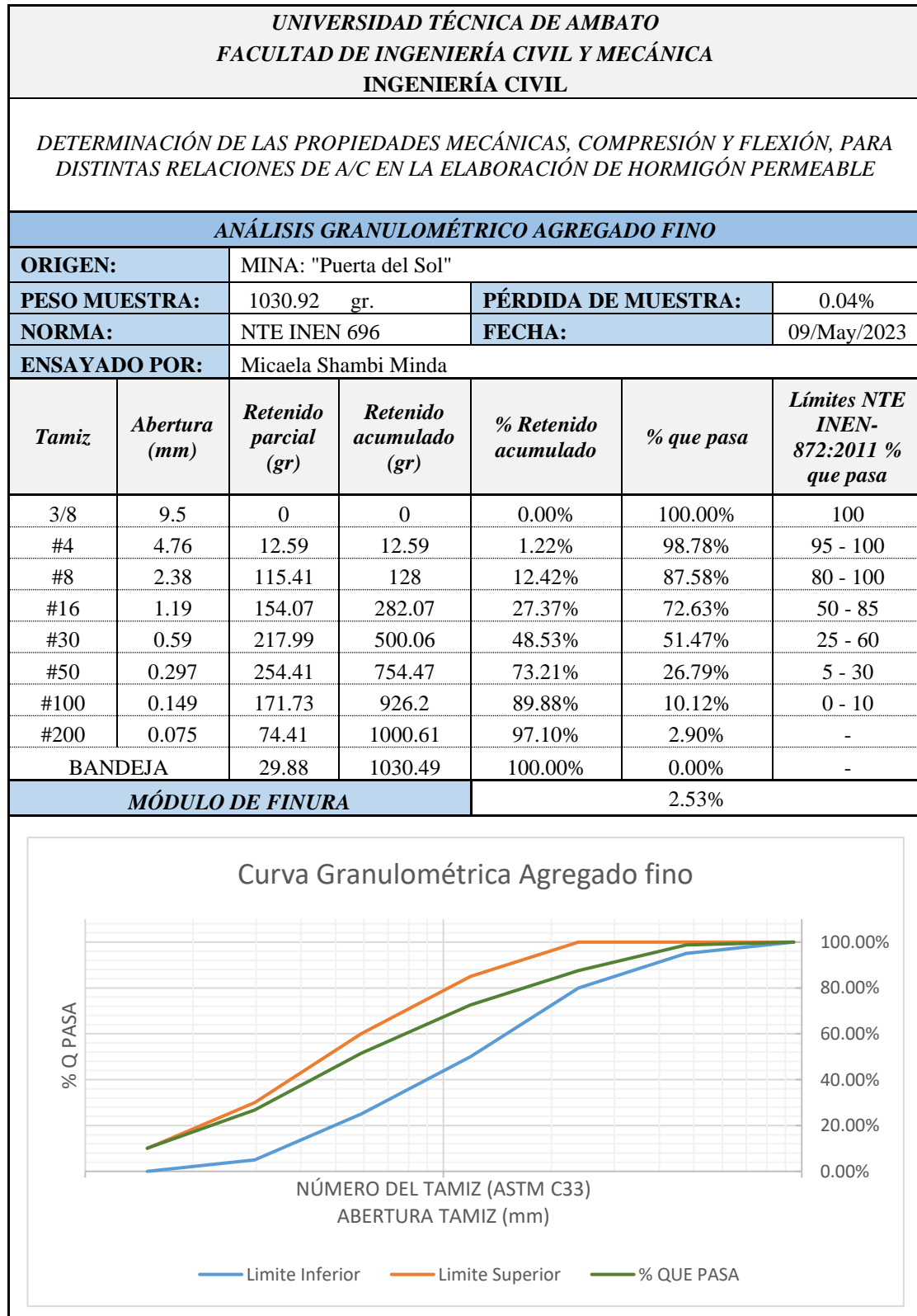
ANEXOS

Anexo 1. Densidad real del cemento

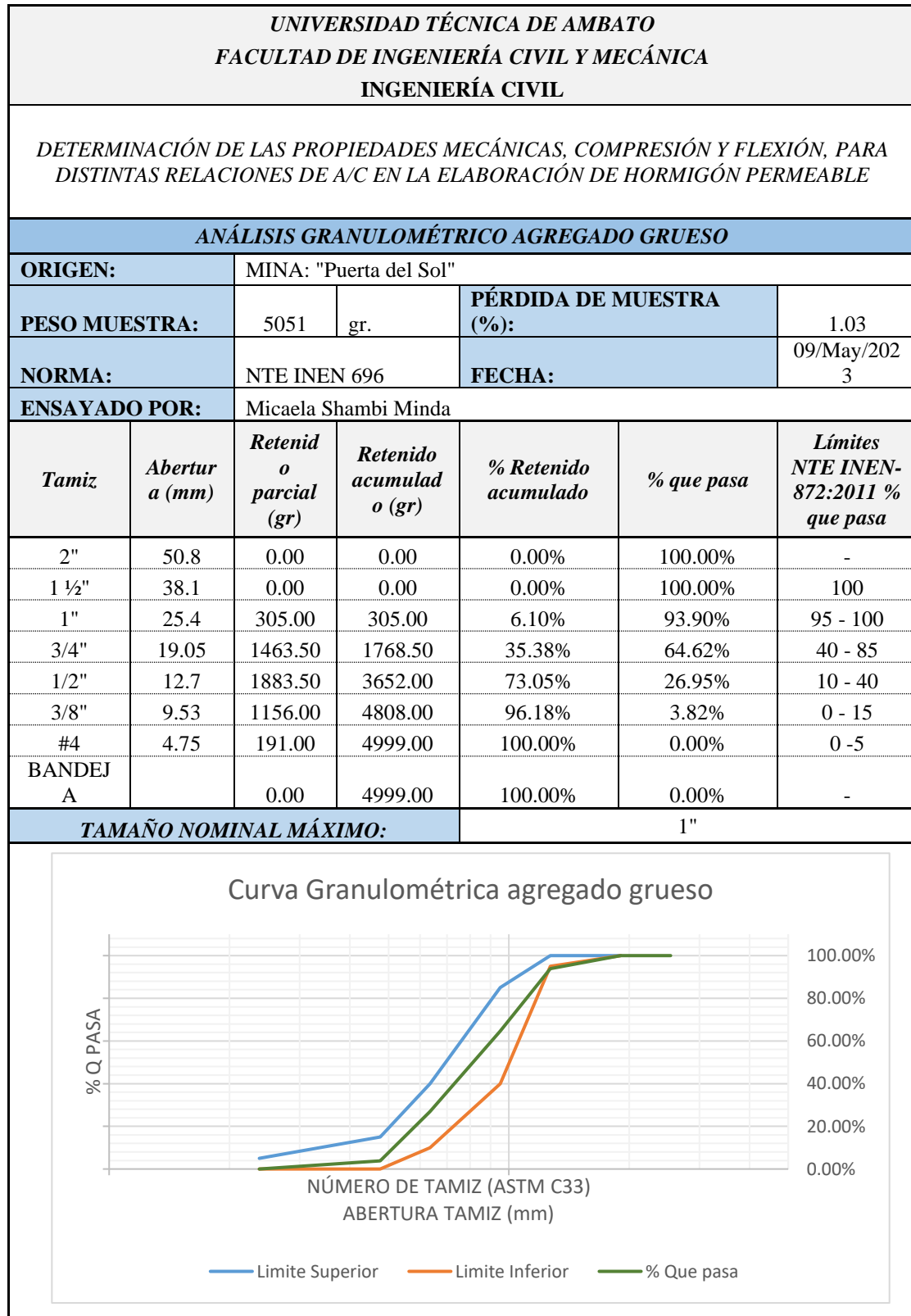
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO  FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
ORIGEN:	Cemento HOLCIM			
ENSAYADO POR:	Carla Alexandra Reinoso Bonilla			
NORMA IMPLEMENTADA:	NTE INEN 156			
FECHA DEL ENSAYO:	24/11/2022			
DENSIDAD REAL DEL CEMENTO				
DESCRIPCIÓN	NOMENCLATURA	ENSAYO 1	ENSAYO 2	UNIDAD
Volumen inicial	Vo	0.60	0.50	cc
Volumen final	Vf	21.20	22.00	cc
Masa del cemento	Mc	64.00	64.00	gr
Temperatura	T	22.00	24.00	°C
Densidad real del cemento	DR	3.11	2.98	gr/cm ³
Densidad real del cemento promedio	DR. Prom	3.04		gr/cm ³

Fuente: Reinoso, C. [29]

Anexo 2. Análisis Granulométrico del agregado fino



Anexo 3. Análisis Granulométrico del agregado grueso



Anexo 4. Densidad real y capacidad de absorción del agregado fino

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA INGENIERÍA CIVIL				
DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, COMPRESIÓN Y FLEXIÓN, PARA DISTINTAS RELACIONES DE A/C EN LA ELABORACIÓN DE HORMIGÓN PERMEABLE				
DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO				
ORIGEN:	MINA: "Puerta del Sol"			
ENSAYADO POR:	Micaela Shambi Minda	FECHA :	10/May/2023	
NORMA:	NTE INEN 857			
CÁLCULO DE LA DENSIDAD REAL				
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	VALOR	
M1	Masa del picnómetro	gr	145.70	
M2	Masa del picnómetro + Muestra SSS	gr	505.41	
M3	Masa del picnómetro + Muestra SSS + Agua	gr	836.90	
M4= M3-M2	Masa agua añadida	gr	331.49	
M5	Masa picnómetro + 500 cm ³ de agua	gr	643.25	
M6 = M5-M1	Masa de 500 cm ³ de agua	gr	497.55	
DA	Densidad del agua	gr/cm ³	0.996	
M7 = M6-M4	Masa del agua desalojada por la muestra	gr	166.06	
Msss = M2 - M1	Masa del agregado	gr	359.71	
Vsss = M7/DA	Volumen del agua desalojada	cm ³	166.73	
DRA = Msss/Vsss	Densidad real de la arena	gr/cm ³	2.157	
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN				
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	VALOR	
M7	Masa del recipiente	gr	30.80	29.40
M8	Masa del recipiente + muestra SSS	gr	139.90	139.20
M9=M8-M7	Masa de la muestra SSS	gr	109.10	109.80
M10	Masa del recipiente + muestra seca	gr	136.41	137.50
M11=M10-M7	Masa de la muestra seca	gr	105.61	108.10
CA=((M9-M11)/M11)*100	Capacidad de absorción	%	3.30	1.57
P2=(CA1+CA2)/2	Capacidad de absorción promedio	%	2.44	

Anexo 5. Densidad real y capacidad de absorción del agregado grueso 3/4”

<i>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</i>			
<i>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</i>			
INGENIERÍA CIVIL			
<i>DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, COMPRESIÓN Y FLEXIÓN, PARA DISTINTAS RELACIONES DE A/C EN LA ELABORACIÓN DE HORMIGÓN PERMEABLE</i>			
DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO			
ORIGEN:	MINA: "Puerta del Sol"		
ENSAYADO POR:	Micaela Shambi Minda	FECHA :	10/May/2023
NORMA:	NTE INEN 857		
CÁLCULO DE LA DENSIDAD REAL			
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	VALOR
M1	Masa del picnómetro	gr	145.70
M2	Masa del picnómetro + Muestra SSS	gr	505.41
M3	Masa del picnómetro + Muestra SSS + Agua	gr	836.90
M4= M3-M2	Masa agua añadida	gr	331.49
M5	Masa picnómetro + 500 cm ³ de agua	gr	643.25
M6 = M5-M1	Masa de 500 cm ³ de agua	gr	497.55
DA	Densidad del agua	gr/cm ³	0.996
M7 = M6-M4	Masa del agua desalojada por la muestra	gr	166.06
Msss = M2 - M1	Masa del agregado	gr	359.71
Vsss = M7/DA	Volumen del agua desalojada	cm ³	166.73
DRA = Msss/Vsss	Densidad real de la arena	gr/cm ³	2.157
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN			
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	VALOR
M7	Masa del recipiente	gr	30.80 29.40
M8	Masa del recipiente + muestra SSS	gr	139.90 139.20
M9=M8-M7	Masa de la muestra SSS	gr	109.10 109.80
M10	Masa del recipiente + muestra seca	gr	136.41 137.50
M11=M10-M7	Masa de la muestra seca	gr	105.61 108.10
CA=((M9-M11)/M11)*100	Capacidad de absorción	%	3.30 1.57
P2=(CA1+CA2)/2	Capacidad de absorción promedio	%	2.44

Anexo 6. Densidad real y capacidad de absorción del agregado grueso 1/2”

<p style="text-align: center;">UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA INGENIERÍA CIVIL</p>				
<p><i>DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, COMPRESIÓN Y FLEXIÓN, PARA DISTINTAS RELACIONES DE A/C EN LA ELABORACIÓN DE HORMIGÓN PERMEABLE</i></p>				
DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO				
ORIGEN:	MINA: "Puerta del Sol"			
ENSAYADO POR:	Micaela Shambi Minda	FECHA	10/May/2023	
NORMA:	NTE INEN 857			
CÁLCULO DE LA DENSIDAD REAL				
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	VALOR	
M1	Masa de la canastilla en el aire	gr	1235.00	
M2	Masa de la canastilla en el agua	gr	1074.00	
M3	Masa de la canastilla + muestra SSS en el aire	gr	3272.00	
M4	Masa de la canastilla + muestra SSS en el agua	gr	2300.00	
DA	Densidad real del agua	gr/cm ³	1.00	
M5 = M3-M1	Masa de la muestra SSS en el aire	gr	2037.00	
M6 = M4-M2	Masa de la muestra SSS en el agua	gr	1226.00	
VR=(M5-M6)/DA	Volumen real de la muestra	cm ³	812.07	
DR=M5/VR	Densidad real	gr/cm ³	2.508	
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN				
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	VALOR	
M7	Masa del recipiente	gr	31.08	30.78
M8	Masa del recipiente + muestra SSS	gr	234.61	226.49
M9=M8-M7	Masa de la muestra SSS	gr	203.53	195.71
M10	Masa del recipiente + muestra seca	gr	230.18	222.04
M11=M10-M7	Masa de la muestra seca	gr	199.10	191.26
CA=((M9-M11)/M11)*100	Capacidad de absorción	%	2.23	2.33
P2=(CA1+CA2)/2	Capacidad de absorción promedio	%	2.28	

Anexo 7. Densidad real y capacidad de absorción del agregado grueso 3/8”

<i>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</i>			
<i>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</i>			
<i>INGENIERÍA CIVIL</i>			
<i>DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, COMPRESIÓN Y FLEXIÓN, PARA DISTINTAS RELACIONES DE A/C EN LA ELABORACIÓN DE HORMIGÓN PERMEABLE</i>			
DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO			
ORIGEN:	MINA: "Puerta del Sol"		
ENSAYADO POR:	Micaela Shambi Minda	FECHA:	10/May/2023
NORMA:	NTE INEN 857		
CÁLCULO DE LA DENSIDAD REAL			
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	VALOR
M1	Masa de la canastilla en el aire	gr	1235.00
M2	Masa de la canastilla en el agua	gr	1074.00
M3	Masa de la canastilla + muestra SSS en el aire	gr	3219.00
M4	Masa de la canastilla + muestra SSS en el agua	gr	2275.00
DA	Densidad real del agua	gr/cm ³	1.00
M5 = M3-M1	Masa de la muestra SSS en el aire	gr	1984.00
M6 = M4-M2	Masa de la muestra SSS en el agua	gr	1201.00
VR=(M5-M6)/DA	Volumen real de la muestra	cm ³	784.03
DR=M5/VR	Densidad real	gr/cm ³	2.530
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN			
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	VALOR
M7	Masa del recipiente	gr	32.57 31.60
M8	Masa del recipiente + muestra SSS	gr	219.02 210.16
M9=M8-M7	Masa de la muestra SSS	gr	186.45 178.56
M10	Masa del recipiente + muestra seca	gr	214.41 205.86
M11=M10-M7	Masa de la muestra seca	gr	181.84 174.26
CA=((M9-M11)/M11)*100	Capacidad de absorción	%	2.54 2.47
P2=(CA1+CA2)/2	Capacidad de absorción promedio	%	2.50

Anexo 8. Densidad aparente y compactada del agregado fino y grueso

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA				
INGENIERÍA CIVIL				
<i>DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, COMPRESIÓN Y FLEXIÓN, PARA DISTINTAS RELACIONES DE A/C EN LA ELABORACIÓN DE HORMIGÓN PERMEABLE</i>				
ORIGEN:	MINA: "Puerta del Sol"			
MASA RECIPIENTE:	9.985 Kg.			
ENSAYADO POR:	Micaela Shambi Minda			
VOLUMEN RECIPIENTE:	20.22 dm ³	FECHA:	11/May/2023	
NORMA:	NTE INEN 858:2010			
DENSIDAD APARENTE SUELTA DEL AGREGADO FINO Y GRUESO				
<i>Agregado</i>	<i>Agregado + Recipiente (kg)</i>	<i>Agregado (kg)</i>	<i>Peso Unitario (kg/dm³)</i>	<i>Peso Unitario Promedio (kg/dm³)</i>
GRUESO	38.260	28.275	1.398	1.396
	38.160	28.175	1.393	
FINO	41.930	31.945	1.580	1.578
	41.865	31.880	1.577	
DENSIDAD APARENTE COMPACTADA DEL AGREGADO FINO Y GRUESO				
MASA RECIPIENTE:	9.985 Kg.			
VOLUMEN RECIPIENTE:	20.22 dm ³			
NORMA:	NTE INEN 858:2010			
<i>Agregado</i>	<i>Agregado + Recipiente (kg)</i>	<i>Agregado (kg)</i>	<i>Peso Unitario (kg/dm³)</i>	<i>Peso Unitario Promedio (kg/dm³)</i>
GRUESO	40.755	30.770	1.522	1.516
	40.540	30.555	1.511	
FINO	43.120	33.135	1.639	1.643
	43.285	33.300	1.647	

Anexo 9. Densidad aparente y compactada del agregado grueso tamizado

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA				
INGENIERÍA CIVIL				
<i>DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, COMPRESIÓN Y FLEXIÓN, PARA DISTINTAS RELACIONES DE A/C EN LA ELABORACIÓN DE HORMIGÓN PERMEABLE</i>				
ORIGEN:	MINA: "Puerta del Sol"			
MASA RECIPIENTE:	9.985 Kg.			
ENSAYADO POR:	Micaela Shambi Minda			
VOLUMEN RECIPIENTE:	20.22 dm ³	FECHA:	11/May/2023	
NORMA:	NTE INEN 858:2010			
DENSIDAD APARENTE SUELTA DEL AGREGADO GRUESO TAMIZADO				
<i>Agregado</i>	<i>Agregado + Recipiente (kg)</i>	<i>Agregado (kg)</i>	<i>Peso Unitario (kg/dm³)</i>	<i>Peso Unitario Promedio (kg/dm³)</i>
3/4"	36.175	26.190	1.295	1.296
	36.186	26.201	1.296	
1/2"	36.245	26.260	1.299	1.301
	36.355	26.370	1.304	
3/8"	36.495	26.510	1.311	1.314
	36.595	26.610	1.316	
DENSIDAD APARENTE COMPACTADA DEL AGREGADO GRUESO TAMIZADO				
MASA RECIPIENTE:	9.985 Kg.			
VOLUMEN RECIPIENTE:	20.22 dm ³			
NORMA:	NTE INEN 858:2010			
<i>Agregado</i>	<i>Agregado + Recipiente (kg)</i>	<i>Agregado (kg)</i>	<i>Peso Unitario (kg/dm³)</i>	<i>Peso Unitario Promedio (kg/dm³)</i>
3/4"	39.175	29.190	1.444	1.444
	39.186	29.201	1.444	
1/2"	40.245	30.260	1.497	1.497
	40.245	30.260	1.497	
3/8"	40.495	30.510	1.509	1.511
	40.595	30.610	1.514	

Anexo 10. Dosificación para agregado grueso 3/4"

DATOS		
HN _g	0.81	%
HN _f	-	%
P _{ug}	1,443.89	kg/m ³
% V _p	20.00	%
a/c	0.35	entre 0.26 y 0.45
G _{ec}	3.04	kg/m ³
P _{ua}	1,000.00	kg/m ³

Abs _f	2.44	%
Abs _g	1.94	%
%F	10.00	%
% de dismunición	2.00	%
Dimensiones del cilindro		
H	200	mm
D	100	mm
V _t	0.00157	cm ³

Volumen agregado seco		
$W_{ts} = P_{ug} * V_T$		
W _{ts}	2.268	m ³

Masa de agregado grueso estado seco		
$W_{Gs} = \frac{W_{GSSS}}{\left(1 + \frac{Abs_G}{100}\right)}$		
W _{Gs}	2.041	kg

Masa de agregados en estado SSS		
$W_{TSSS} = W_{ts} * \left(1 + \frac{Abs_G}{100}\right)$		
W _{ssts}	2.312	kg

Masa de agregado grueso estado natural		
$W_{GEN} = W_{Gs} * \left(1 + \frac{HN_G}{100}\right)$		
W _{GEN}	2.058	kg

Masa de agregado fino estado SSS		
$W_{FSSS} = W_{TSSS} * \frac{\%F}{100}$		
W _{FSSS}	0.231	kg

Volumen de la pasta cementante		
$V_P = V_T * \frac{\%Vp - \%}{100}$		
V _p	0.00028	m ³

Masa de agregado fino seco		
$W_{Fs} = \frac{W_{FSSS}}{\left(1 + \frac{Abs_F}{100}\right)}$		
W _{Fs}	0.226	kg

Masa del cemento		
$C = \left(\frac{V_P}{\frac{1}{G_{EC}} + \frac{a}{c}}\right) * P_{ua}$		
c	0.416	kg

Masa de agregado fino natural		
$W_{FEN} = W_{Fs} * \left(1 + \frac{HN_F}{100}\right)$		
W _{FEN}	0.226	kg

Masa del agua de amasado		
$a_m = c * \frac{a}{c} + W_{Gs} * \left(\frac{Abs_G - HN_G}{100}\right) + W_{Fs} * \left(\frac{Abs_F - HN_F}{100}\right)$		
am	0.174	kg

Masa de agregado grueso estado SSS		
$W_{GSSS} = W_{TSSS} - W_{FSSS}$		
W _{GSSS}	2.081	kg

Anexo 11. Dosificación para agregado grueso 1/2"

DATOS		
HN _g	1.29	%
HN _f	-	%
P _{ug}	1,496.54	kg/m ³
% V _p	20.00	%
a/c	0.35	entre 0.26 y 0.45
G _{ec}	3.04	kg/m ³
P _{ua}	1,000.00	kg/m ³

Abs _f	2.44	%
Abs _g	2.28	%
%F	10.00	%
% de dismunición	2.00	%
Dimensiones del cilindro		
H	200	mm
D	100	mm
V _t	0.00157	cm ³

Volumen agregado seco		
$W_{ts} = P_{ug} * V_T$		
W _{ts}	2.351	m ³

Masa de agregado grueso estado seco		
$W_{Gs} = \frac{W_{GSSS}}{\left(1 + \frac{Abs_G}{100}\right)}$		
W _{Gs}	2.116	kg

Masa de agregados en estado SSS		
$W_{TSSS} = W_{ts} * \left(1 + \frac{Abs_G}{100}\right)$		
W _{TSSS}	2.404	kg

Masa de agregado grueso estado natural		
$W_{GEN} = W_{Gs} * \left(1 + \frac{HN_G}{100}\right)$		
W _{GEN}	2.143	kg

Masa de agregado fino estado SSS		
$W_{FSSS} = W_{TSSS} * \frac{\%F}{100}$		
W _{FSSS}	0.240	kg

Volumen de la pasta cementante		
$V_P = V_T * \frac{\%Vp - \%}{100}$		
V _p	0.00028	m ³

Masa de agregado fino seco		
$W_{Fs} = \frac{W_{FSSS}}{\left(1 + \frac{Abs_F}{100}\right)}$		
W _{Fs}	0.235	kg

Masa del cemento		
$C = \left(\frac{V_P}{\frac{1}{G_{EC}} + \frac{a}{c}}\right) * P_{ua}$		
c	0.416	kg

Masa de agregado fino natural		
$W_{FEN} = W_{Fs} * \left(1 + \frac{HN_F}{100}\right)$		
W _{FEN}	0.235	kg

Masa del agua de amasado		
$a_m = c * \frac{a}{c} + W_{Gs} * \left(\frac{Abs_G - HN_G}{100}\right) + W_{Fs} * \left(\frac{Abs_F - HN_F}{100}\right)$		
am	0.172	kg

Masa de agregado grueso estado SSS		
$W_{GSSS} = W_{TSSS} - W_{FSSS}$		
W _{GSSS}	2.164	kg

Anexo 12. Dosificación para agregado grueso 3/8"

DATOS		
HN _g	1.22	%
HN _f	-	%
P _{ug}	1,511.37	kg/m ³
% V _p	20.00	%
a/c	0.35	entre 0.26 y 0.45
G _{ec}	3.04	kg/m ³
P _{ua}	1,000.00	kg/m ³

Abs _f	2.44	%
Abs _g	2.50	%
%F	10.00	%
% de dismunición	2.00	%
Dimensiones del cilindro		
H	200	mm
D	100	mm
V _t	0.00157	cm ³

Volumen agregado seco		
$W_{ts} = P_{ug} * V_T$		
W _{ts}	2.374	m ³

Masa de agregado grueso estado seco		
$W_{Gs} = \frac{W_{GSSS}}{\left(1 + \frac{Abs_G}{100}\right)}$		
W _{Gs}	2.137	kg

Masa de agregados en estado SSS		
$W_{TSSS} = W_{ts} * \left(1 + \frac{Abs_G}{100}\right)$		
W _{TSSS}	2.433	kg

Masa de agregado grueso estado natural		
$W_{GEN} = W_{Gs} * \left(1 + \frac{HN_G}{100}\right)$		
W _{GEN}	2.163	kg

Masa de agregado fino estado SSS		
$W_{FSSS} = W_{TSSS} * \frac{\%F}{100}$		
W _{FSSS}	0.243	kg

Volumen de la pasta cementante		
$V_P = V_T * \frac{\%V_p - \%}{100}$		
V _p	0.00028	m ³

Masa de agregado fino seco		
$W_{Fs} = \frac{W_{FSSS}}{\left(1 + \frac{Abs_F}{100}\right)}$		
W _{Fs}	0.238	kg

Masa del cemento		
$C = \left(\frac{V_p}{\frac{1}{G_{EC}} + \frac{a}{c}}\right) * P_{ua}$		
c	0.416	kg

Masa de agregado fino natural		
$W_{FEN} = W_{Fs} * \left(1 + \frac{HN_F}{100}\right)$		
W _{FEN}	0.238	kg

Masa del agua de amasado		
$a_m = c * \frac{a}{c} + W_{Gs} * \left(\frac{Abs_G - HN_G}{100}\right) + W_{Fs} * \left(\frac{Abs_F - HN_F}{100}\right)$		
am	0.179	m ³

Masa de agregado grueso estado SSS		
$W_{GSSS} = W_{TSSS} - W_{FSSS}$		
W _{GSSS}	2.190	kg

Anexo 13. Dosificación 1C

DATOS		
HN _g	1.51	%
HN _f	5.84	%
P _{ug}	1,496.54	kg/m ³
% V _p	20.00	%
a/c	0.35	entre 0.26 y 0.45
G _{ec}	3.04	kg/m ³
P _{ua}	1,000.00	kg/m ³

Abs _f	2.44	%
Abs _g	2.28	%
%F	10.00	%
% de dismunición	2.00	%
Dimensiones del cilindro		
H	200	mm
D	100	mm
V _t	0.00157	cm ³

Volumen agregado seco		
$W_{ts} = P_{ug} * V_T$		
W _{ts}	2.351	m ³

Masa de agregado grueso estado seco		
$W_{Gs} = \frac{W_{GSS}}{\left(1 + \frac{Abs_G}{100}\right)}$		
W _{Gs}	2.116	kg

Masa de agregados en estado SSS		
$W_{TSSS} = W_{ts} * \left(1 + \frac{Abs_G}{100}\right)$		
W _{TSSS}	2.404	kg

Masa de agregado grueso estado natural		
$W_{GEN} = W_{Gs} * \left(1 + \frac{HN_G}{100}\right)$		
W _{GEN}	2.148	kg

Masa de agregado fino estado SSS		
$W_{FSSS} = W_{TSSS} * \frac{\%F}{100}$		
W _{FSSS}	0.240	kg

Volumen de la pasta cementante		
$V_P = V_T * \frac{\%V_p - \%}{100}$		
V _p	0.00028	m ³

Masa de agregado fino seco		
$W_{Fs} = \frac{W_{FSSS}}{\left(1 + \frac{Abs_F}{100}\right)}$		
W _{Fs}	0.235	kg

Masa del cemento		
$c = \left(\frac{V_P}{\frac{1}{G_{EC}} + \frac{a}{c}}\right) * P_{ua}$		
c	0.416	kg

Masa de agregado fino natural		
$W_{FEN} = W_{Fs} * \left(1 + \frac{HN_F}{100}\right)$		
W _{FEN}	0.248	kg

Masa del agua de amasado		
$a_m = c * \frac{a}{c} + W_{Gs} * \left(\frac{Abs_G - HN_G}{100}\right) + W_{Fs} * \left(\frac{Abs_F - HN_F}{100}\right)$		
am	0.154	m ³

Masa de agregado grueso estado SSS		
$W_{GSSS} = W_{TSSS} - W_{FSSS}$		
W _{GSSS}	2.164	kg

Fibra:	0.6 kg/m ³	11.31	kg
Plastificante	0.5% cemento	24.99	ml

Anexo 14. Dosificación 2C

DATOS		
HN _g	1.19	%
HN _f	5.75	%
P _{ug}	1,496.54	kg/m ³
% V _p	20.00	%
a/c	0.30	entre 0.26 y 0.45
G _{ec}	3.04	kg/m ³
P _{ua}	1,000.00	kg/m ³

Abs _f	2.44	%
Abs _g	2.28	%
%F	10.00	%
% de dismunición	2.00	%
Dimensiones del cilindro		
H	200	mm
D	100	mm
V _t	0.00157	cm ³

Volumen agregado seco		
$W_{ts} = P_{ug} * V_T$		
W _{ts}	2.351	m ³

Masa de agregado grueso estado seco		
$W_{Gs} = \frac{W_{GSS}}{\left(1 + \frac{Abs_G}{100}\right)}$		
W _{Gs}	2.116	kg

Masa de agregados en estado SSS		
$W_{TSSS} = W_{ts} * \left(1 + \frac{Abs_G}{100}\right)$		
W _{TSSS}	2.404	kg

Masa de agregado grueso estado natural		
$W_{GEN} = W_{Gs} * \left(1 + \frac{HN_G}{100}\right)$		
W _{GEN}	2.141	kg

Masa de agregado fino estado SSS		
$W_{FSSS} = W_{TSSS} * \frac{\%F}{100}$		
W _{FSSS}	0.240	kg

Volumen de la pasta cementante		
$V_P = V_T * \frac{\%Vp - \%}{100}$		
V _p	0.00028	m ³

Masa de agregado fino seco		
$W_{Fs} = \frac{W_{FSSS}}{\left(1 + \frac{Abs_F}{100}\right)}$		
W _{Fs}	0.235	kg

Masa del cemento		
$c = \left(\frac{V_P}{\frac{1}{G_{EC}} + \frac{a}{c}}\right) * P_{ua}$		
c	0.450	kg

Masa de agregado fino natural		
$W_{FEN} = W_{Fs} * \left(1 + \frac{HN_F}{100}\right)$		
W _{FEN}	0.248	kg

Masa del agua de amasado		
$a_m = c * \frac{a}{c} + W_{Gs} * \left(\frac{Abs_G - HN_G}{100}\right) + W_{Fs} * \left(\frac{Abs_F - HN_F}{100}\right)$		
am	0.150	m ³

Masa de agregado grueso estado SSS		
$W_{GSSS} = W_{TSSS} - W_{FSSS}$		
W _{GSSS}	2.164	kg

Fibra:	0.6 kg/m ³	11.31	kg
Plastificante	0.5% cemento	26.97	ml

Anexo 15. Dosificación 1V

DATOS		
HN _g	1.51	%
HN _f	5.84	%
P _{ug}	1,496.54	kg/m ³
% V _p	20.00	%
a/c	0.35	entre 0.26 y 0.45
G _{ec}	3.04	kg/m ³
P _{ua}	1,000.00	kg/m ³

Abs _f	2.44	%
Abs _g	2.28	%
%F	10.00	%
% de dismunición	2.00	%
Dimensiones de la viga		
L	350	mm
B = D	100	mm
V _t	0.0035	cm ³

Volumen agregado seco		
$W_{ts} = P_{ug} * V_T$		
W _{ts}	5.238	m ³

Masa de agregado grueso estado seco		
$W_{Gs} = \frac{W_{GSS}}{\left(1 + \frac{Abs_G}{100}\right)}$		
W _{Gs}	4.714	kg

Masa de agregados en estado SSS		
$W_{TSSS} = W_{ts} * \left(1 + \frac{Abs_G}{100}\right)$		
W _{TSSS}	5.357	kg

Masa de agregado grueso estado natural		
$W_{GEN} = W_{Gs} * \left(1 + \frac{HN_G}{100}\right)$		
W _{GEN}	4.785	kg

Masa de agregado fino estado SSS		
$W_{FSSS} = W_{TSSS} * \frac{\%F}{100}$		
W _{FSSS}	5.536	kg

Volumen de la pasta cementante		
$V_P = V_T * \frac{\%Vp - \%}{100}$		
V _p	0.00063	m ³

Masa de agregado fino seco		
$W_{Fs} = \frac{W_{FSSS}}{\left(1 + \frac{Abs_F}{100}\right)}$		
W _{Fs}	0.523	kg

Masa del cemento		
$c = \left(\frac{V_P}{\frac{1}{G_{EC}} + \frac{a}{c}}\right) * P_{ua}$		
c	0.928	kg

Masa de agregado fino natural		
$W_{FEN} = W_{Fs} * \left(1 + \frac{HN_F}{100}\right)$		
W _{FEN}	0.553	kg

Masa del agua de amasado		
$a_m = c * \frac{a}{c} + W_{Gs} * \left(\frac{Abs_G - HN_G}{100}\right) + W_{Fs} * \left(\frac{Abs_F - HN_F}{100}\right)$		
am	0.343	m ³

Masa de agregado grueso estado SSS		
$W_{GSSS} = W_{TSSS} - W_{FSSS}$		
W _{GSSS}	4.821	kg

Fibra:	0.6 kg/m ³	6.30	kg
Plastificante	0.5% cemento	13.92	ml

Anexo 16. Dosificación 2V

DATOS		
HN _g	1.19	%
HN _f	5.75	%
P _{ug}	1,496.54	kg/m ³
% V _p	20.00	%
a/c	0.30	entre 0.26 y 0.45
G _{ec}	3.04	kg/m ³
P _{ua}	1,000.00	kg/m ³

Abs _f	2.44	%
Abs _g	2.28	%
%F	10.00	%
% de dismunición	2.00	%
Dimensiones de la viga		
L	350	mm
B = D	100	mm
V _t	0.0035	cm ³

Volumen agregado seco		
$W_{ts} = P_{ug} * V_T$		
W _{ts}	5.238	m ³

Masa de agregado grueso estado seco		
$W_{Gs} = \frac{W_{GSS}}{\left(1 + \frac{Abs_G}{100}\right)}$		
W _{Gs}	4.714	kg

Masa de agregados en estado SSS		
$W_{TSSS} = W_{ts} * \left(1 + \frac{Abs_G}{100}\right)$		
W _{TSSS}	5.357	kg

Masa de agregado grueso estado natural		
$W_{GEN} = W_{Gs} * \left(1 + \frac{HN_G}{100}\right)$		
W _{GEN}	4.770	kg

Masa de agregado fino estado SSS		
$W_{FSSS} = W_{TSSS} * \frac{\%F}{100}$		
W _{FSSS}	5.536	kg

Volumen de la pasta cementante		
$V_P = V_T * \frac{\%V_p - \%}{100}$		
V _p	0.00063	m ³

Masa de agregado fino seco		
$W_{Fs} = \frac{W_{FSSS}}{\left(1 + \frac{Abs_F}{100}\right)}$		
W _{Fs}	0.523	kg

Masa del cemento		
$c = \left(\frac{V_P}{\frac{1}{G_{EC}} + \frac{a}{c}}\right) * P_{ua}$		
c	1.002	kg

Masa de agregado fino natural		
$W_{FEN} = W_{Fs} * \left(1 + \frac{HN_F}{100}\right)$		
W _{FEN}	0.553	kg

Masa del agua de amasado		
$a_m = c * \frac{a}{c} + W_{Gs} * \left(\frac{Abs_G - HN_G}{100}\right) + W_{Fs} * \left(\frac{Abs_F - HN_F}{100}\right)$		
am	0.334	m ³

Masa de agregado grueso estado SSS		
$W_{GSSS} = W_{TSSS} - W_{FSSS}$		
W _{GSSS}	4.821	kg

Fibra:	0.6 kg/m ³	6.30	kg
Plastificante	0.5% cemento	15.03	ml

Anexo 17. Cálculo de permeabilidad y contenido de vacíos

PERMEABILIDAD									
a/c	ID	Dimensiones				Tiempo	K	K promedio	Desviación estándar
		Atubo	Acilindro	L	ho/h1				
		cm2	cm2	cm	cm				
0.35	1C-7	84.95	78.54	20	1.690	47.13	0.241	0.276	0.04
	1C-8	84.95	78.54	20	1.690	41.38	0.274		
	1C-9	84.95	78.54	20	1.690	36.08	0.314		
	1C-10	84.95	78.54	20	1.690	37.64	0.301	0.285	0.04
	1C-11	84.95	78.54	20	1.690	36.59	0.310		
	1C-12	84.95	78.54	20	1.690	46.34	0.245		
0.30	2C-7	84.95	78.54	20	1.690	32.54	0.349	0.370	0.02
	2C-8	84.95	78.54	20	1.690	30.11	0.377		
	2C-9	84.95	78.54	20	1.690	29.46	0.385		
	2C-10	84.95	78.54	20	1.690	34.22	0.332	0.367	0.04
	2C-11	84.95	78.54	20	1.690	31.38	0.362		
	2C-12	84.95	78.54	20	1.690	27.90	0.407		
CONTENIDO DE VACIOS									
a/c	ID	Volumen 1	Volumen 2	Volumen cilindro	Volumen cilindro poroso	Porosidad	Porosidad media	Desviación estándar	
		m3	m3	m3	m3	%	%		
0.35	1C-7	0.015	0.01625	0.00157	0.00125	20.42	21.48	0.97	
	1C-8	0.015	0.01623	0.00157	0.00123	21.70			
	1C-9	0.015	0.01622	0.00157	0.00122	22.33			
	1C-10	0.015	0.01624	0.00157	0.00124	21.06	21.70	0.64	
	1C-11	0.015	0.01623	0.00157	0.00123	21.70			
	1C-12	0.015	0.01622	0.00157	0.00122	22.33			
0.3	2C-7	0.015	0.01622	0.00157	0.00122	22.33	23.50	1.12	
	2C-8	0.015	0.01620	0.00157	0.00120	23.61			
	2C-9	0.015	0.016185	0.00157	0.00119	24.56			
	2C-10	0.015	0.01623	0.00157	0.00123	21.70	23.39	1.60	
	2C-11	0.015	0.01620	0.00157	0.00120	23.61			
	2C-12	0.015	0.01618	0.00157	0.00118	24.88			

Anexo 18. Reporte ensayo a flexión

1V-1

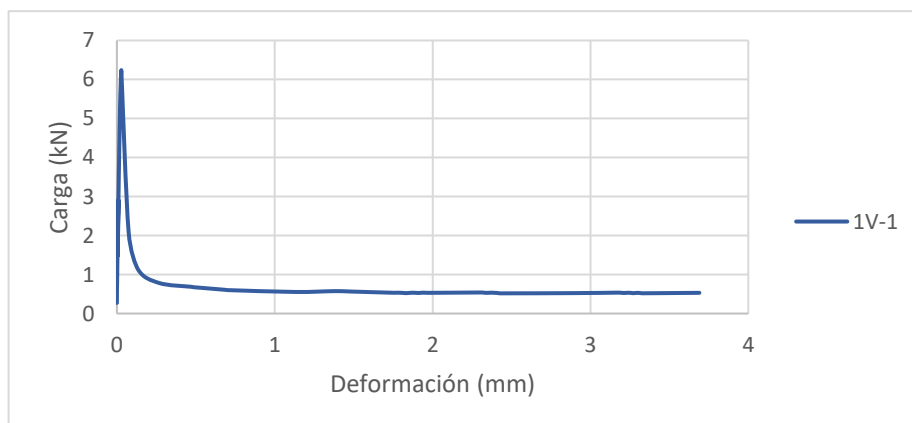
Longitud entre apoyos (mm)	300
Ancho de la probeta (mm)	101
Distancia fractura-apoyo (mm)	115

Ubicación de la falla:	Tercio Medio
Altura de la probeta (mm)	100
Módulo de rotura (MPa)	1.85



Deflexión de la rotura (mm)	0.03
CARGA (kN)	
Carga máxima	6.24
L/600 (0.58 mm)	0.62
L/150 (2.33 mm)	0.53
TRABAJO (kN*mm)	
Rotura-2mm	1.44 1
Rotura	0.10 6
1 mm	1.01 3
2 mm	1.54 6

ESFUERZO (MPa)	
Esfuerzo máximo	1.87
L/600 (0.58 mm)	0.19
L/150 (2.33 mm)	0.16
ENERGÍA DE ROTURA (N/m)	
Rotura-2mm	142.624
Rotura	10.470
1 mm	100.302
2 mm	153.094



1V-2

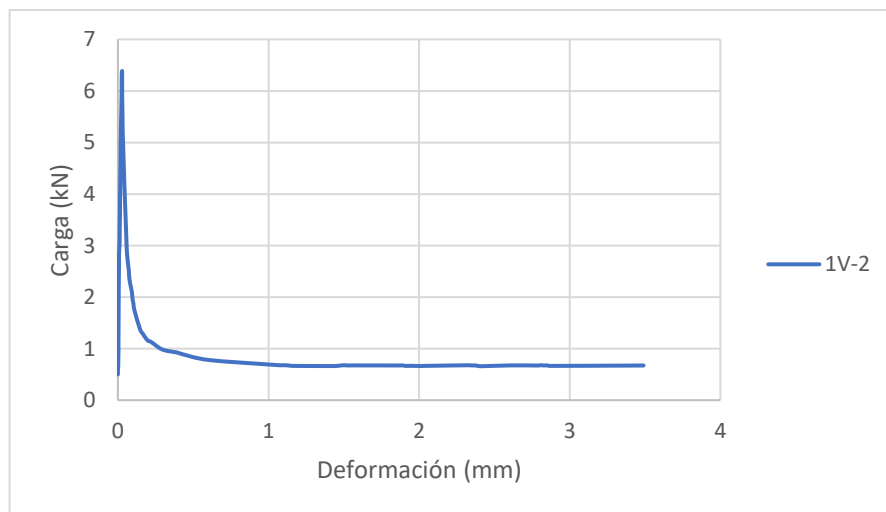
Longitud entre apoyos (mm)	300
Ancho de la probeta (mm)	100
Distancia fractura-apoyo (mm)	85

Ubicación de la falla:	Fuera del Tercio Medio
Altura de la probeta (mm)	99
Módulo de rotura (MPa)	1.663



Deflexión de la rotura (mm)	0.03
CARGA (kN)	
Carga máxima	6.39
L/600 (0.58 mm)	0.76
L/150 (2.33 mm)	0.68
TRABAJO (kN*mm)	
Rotura-2mm	1.709
Rotura	0.105
1 mm	1.142
2 mm	1.814

ESFUERZO (MPa)	
Esfuerzo máximo	1.92
L/600 (0.58 mm)	0.23
L/150 (2.33 mm)	0.20
ENERGÍA DE ROTURA (N/m)	
Rotura-2mm	172.584
Rotura	10.643
1 mm	115.326
2 mm	183.228



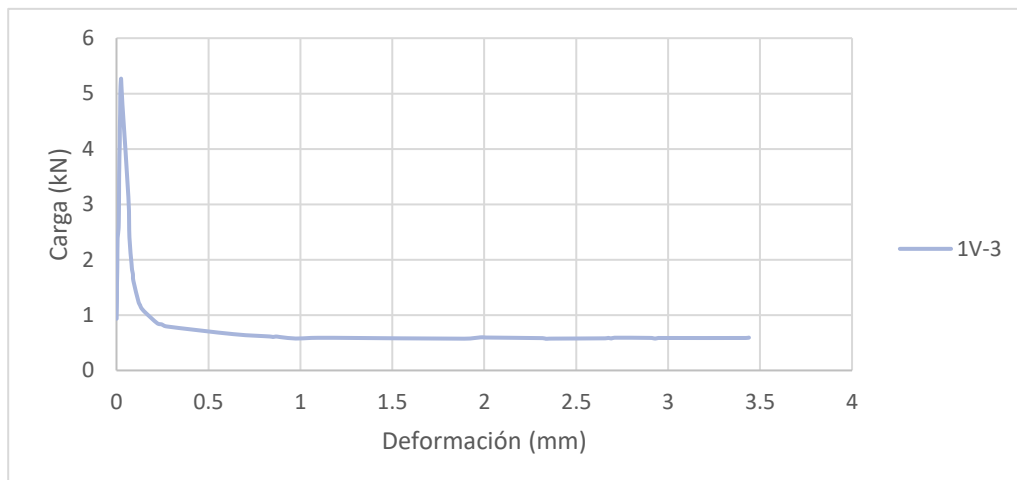
1V-3

Longitud entre apoyos (mm)	300	Ubicación de la falla:	Tercio Medio
Ancho de la probeta (mm)	100	Altura de la probeta (mm)	101
Distancia fractura-apoyo (mm)	162	Módulo de rotura (MPa)	1.55



Deflexión de la rotura (mm)	0.03
CARGA (kN)	
Carga máxima	5.27
L/600 (0.58 mm)	0.68
L/150 (2.33 mm)	0.57
TRABAJO (kN*mm)	
Rotura-2mm	1.479
Rotura	0.08
1 mm	0.98
2 mm	1.56

ESFUERZO (MPa)	
Esfuerzo máximo	1.58
L/600 (0.58 mm)	0.20
L/150 (2.33 mm)	0.17
ENERGÍA DE ROTURA (N/m)	
Rotura-2mm	146.477
Rotura	7.855
1 mm	96.602
2 mm	154.333



2V-1

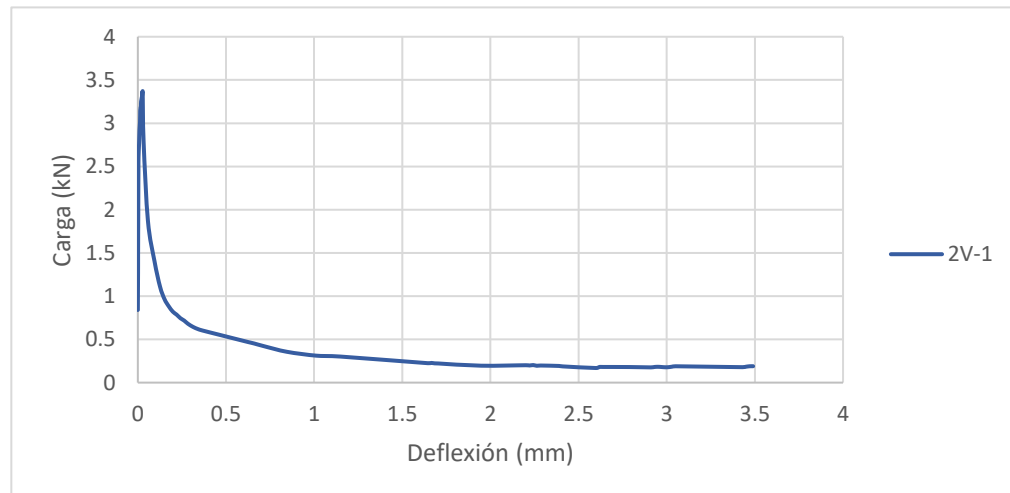
Longitud entre apoyos (mm)	300
Ancho de la probeta (mm)	101
Distancia fractura-apoyo (mm)	135

Ubicación de la falla:	Tercio Medio
Altura de la probeta (mm)	102
Módulo de rotura (MPa)	0.96



Deflexión de la rotura (mm)	0.03
CARGA (kN)	
Carga máxima	3.37
L/600 (0.58 mm)	0.41
L/150 (2.33 mm)	0.20
TRABAJO (kN*mm)	
Rotura-2mm	0.89 1
Rotura	0.07 9
1 mm	0.71 9
2 mm	0.97 0

ESFUERZO (MPa)	
Esfuerzo máximo	1.01
L/600 (0.58 mm)	0.12
L/150 (2.33 mm)	0.06
ENERGÍA DE ROTURA (N/m)	
Rotura-2mm	104.630
Rotura	7.639
1 mm	69.816
2 mm	94.165



2V-2

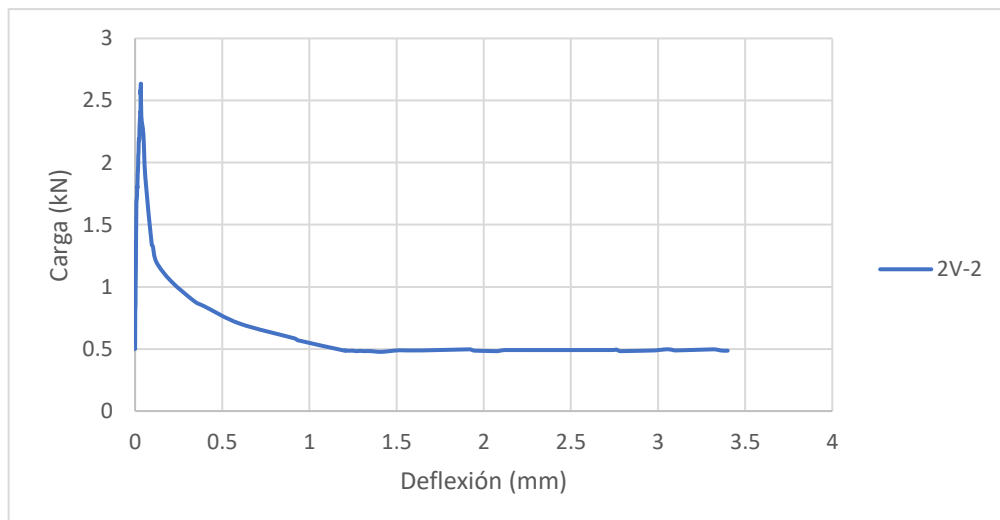
Longitud entre apoyos (mm)	300
Ancho de la probeta (mm)	100
Distancia fractura-apoyo (mm)	100

Ubicación de la falla:	Tercio Medio
Altura de la probeta (mm)	101
Módulo de rotura (MPa)	0.78



Deflexión de la rotura (mm)	0.03
CARGA (kN)	
Carga máxima	2.64
L/600 (0.58 mm)	0.72
L/150 (2.33 mm)	0.49
TRABAJO (kN*mm)	
Rotura-2mm	1.32 5
Rotura	0.06 2
1 mm	0.89 1
2 mm	1.38 7

ESFUERZO (MPa)	
Esfuerzo máximo	0.79
L/600 (0.58 mm)	0.22
L/150 (2.33 mm)	0.15
ENERGÍA DE ROTURA (N/m)	
Rotura-2mm	131.173
Rotura	6.139
1 mm	88.208
2 mm	137.312



2V-3

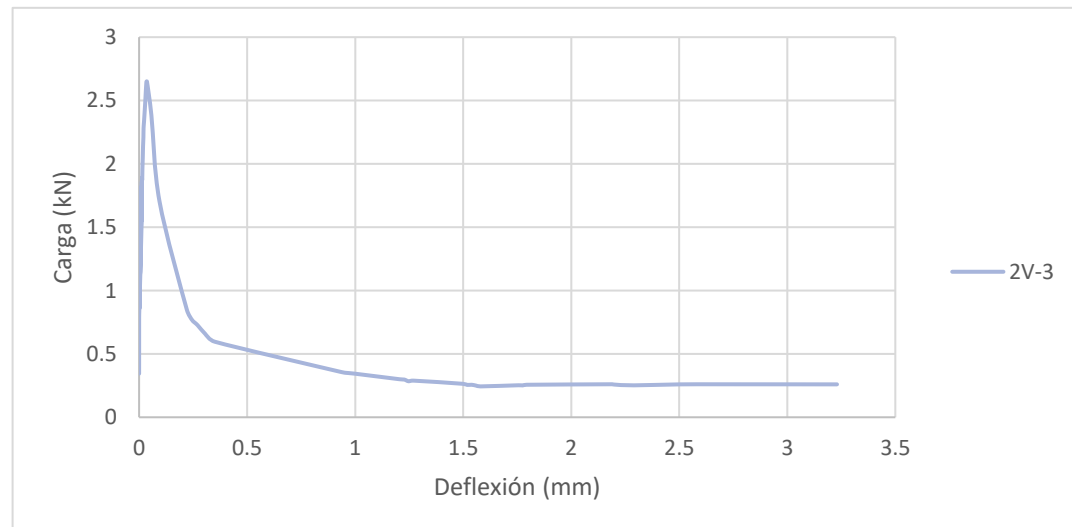
Longitud entre apoyos (mm)	300
Ancho de la probeta (mm)	100
Distancia fractura-apoyo (mm)	150

Ubicación de la falla:	Tercio Medio
Altura de la probeta (mm)	100
Módulo de rotura (MPa)	0.80







Deflexión de la rotura (mm)	0.04
CARGA (kN)	
Carga máxima	2.65
L/600 (0.58 mm)	0.50
L/150 (2.33 mm)	0.25
TRABAJO (kN*mm)	
Rotura-2mm	0.95 8
Rotura	0.07 3
1 mm	0.75 6
2 mm	1.03 1

ESFUERZO (MPa)	
Esfuerzo máximo	0.80
L/600 (0.58 mm)	0.15
L/150 (2.33 mm)	0.08
ENERGÍA DE ROTURA (N/m)	
Rotura-2mm	95.842
Rotura	7.285
1 mm	75.569
2 mm	103.127



Anexo 19. Fotografías

	
<p>Descripción: Obtención del material Cantera “Puerta del Sol”</p>	<p>Descripción: Tamizado para análisis granulométrico del agregado fino.</p>
	
<p>Descripción: Arena en estado SSS.</p>	<p>Descripción: Ensayo de densidad aparente.</p>
	
<p>Descripción: Pesaje de agregado para la mezcla de hormigón.</p>	<p>Descripción: Elaboración de vigas.</p>



Descripción: Consistencia del hormigón permeable.



Descripción: Ensayo de cono de Abrams.



Descripción: Fabricación del permeámetro de carga variable



Descripción: Permeámetro de carga variable.



Descripción: Preparación de probetas para ensayo de permeabilidad.



Descripción: Ensayo de permeabilidad.



Descripción: Ensayo de compresión.



Descripción: Ensayo de flexión.