

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

TEMA:

"ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN Y CORTE PURO DE HORMIGÓN PERMEABLE PARA DISTINTAS RELACIONES AGUA/CEMENTO CON ADICIÓN DE FIBRAS DE POLIPROPILENO"

Trabajo de titulación modalidad trabajo experimental, presentado previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

ESTUDIANTE:

JOSÉ DAVID NÚÑEZ PÉREZ

TUTOR:

ING. WLADIMIR JOSÉ RAMÍREZ CABRERA, MG.

Ambato – Ecuador
Febrero / 2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del trabajo experimental, previo a la obtención de Título de Ingeniero Civil, con el tema: **"ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN Y CORTE PURO DE HORMIGÓN PERMEABLE PARA DISTINTAS RELACIONES AGUA/CEMENTO CON ADICIÓN DE FIBRAS DE POLIPROPILENO"** elaborado por el estudiante José David Núñez Pérez, portador de la cédula de ciudadanía número 1805103353, 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, febrero 2025



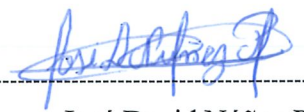
Ing. Wladimir José Ramírez Cabrera, Mg.

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **José David Núñez Pérez**, con C.I. 1805103353 declaro que todos los contenidos y actividades expuestos en el desarrollo del presente trabajo experimental con el tema: **"ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN Y CORTE PURO DE HORMIGÓN PERMEABLE PARA DISTINTAS RELACIONES AGUA/CEMENTO CON ADICIÓN DE FIBRAS DE POLIPROPILENO"**, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del trabajo experimental, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, febrero 2025



José David Núñez Pérez

C.I. 1805103353

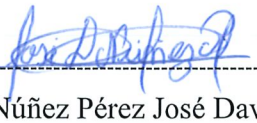
AUTOR

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 procesos 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, febrero 2025



Núñez Pérez José David

C.I. 1805103353

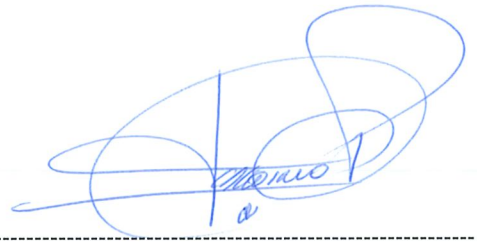
AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

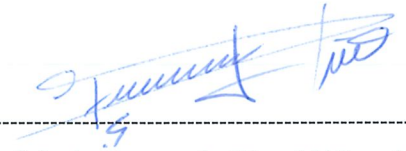
Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del trabajo experimental, realizado por el estudiante **José David Núñez Pérez**, de la Carrera de Ingeniería Civil bajo el tema: **"ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN Y CORTE PURO DE HORMIGÓN PERMEABLE PARA DISTINTAS RELACIONES AGUA/CEMENTO CON ADICIÓN DE FIBRAS DE POLIPROPILENO".**

Ambato, febrero 2025

Para constancia firman:



Ing. Carlos Patricio Navarro Peñaherrera, Mg.
MIEMBRO CALIFICADOR



Ing. María Fernanda Pico Núñez, Mg.
MIEMBRO CALIFICADOR

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico con todo cariño a mis padres, Luis y Consuelo, por el apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de este tiempo, haciendo posible concluir con mis estudios. A mis hermanas, Belén y Emily, gracias por su comprensión y paciencia durante este camino. A mi familia y amigos, quienes me han ofrecido su ayuda y me han acompañado en este proceso.

José David Núñez Pérez

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, por permitirme alcanzar un objetivo más acompañado de las personas que quiero.

A mis padres, Luis y Consuelo, por el esfuerzo y sacrificio realizado para permitirme completar mi formación académica.

A mis hermanas Emily y Belén, por su apoyo y respaldo durante los momentos más desafiantes de esta etapa.

A mi tutor y maestros, Ing. Wladimir Ramírez, Ing. Margarita Mayacela e Ing. Luis Contreras. Su paciencia, dedicación, y enseñanzas fueron clave para mi formación profesional y personal.

A mis amigos, Pame, Andrés, Sebas y Andrea, con quienes he compartido grandes experiencias dentro y fuera de clase. Gracias por su amistad y apoyo incondicional.

A mis amigos del colegio, cuya amistad ha perdurado a pesar de los años y la distancia que nos separa. Gracias por su compañía y aliento en los momentos más difíciles,

Finalmente, no puedo olvidarme de las personas quienes me acompañaron y brindaron su ayuda en el proceso experimental de esta investigación. Gracias por su granito de arena.

José David Núñez Pérez

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

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 CONTENIDO viii
ÍNDICE DE FIGURAS xi
ÍNDICE DE TABLAS xiii
ÍNDICE DE ANEXOS xiv
SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS xv
RESUMEN EJECUTVO xvi
ABSTRACT xvii
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO 1
I. JUSTIFICACIÓN 1
II. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS 1
III. OBJETIVOS 7
A. OBJETIVO GENERAL 7
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 7
CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA 8
I. EQUIPOS Y MATERIALES 8
II. MÉTODOS 9
A. PRIMERA FASE 9
1) Ensayos de laboratorio-Propiedades físicas de los materiales 10
a) Densidad del cemento hidráulico 10

b) Análisis granulométrico en los áridos fino y grueso 10
c) Peso volumétrico suelto y compactado de los agregados 12
d) Densidad real y capacidad de absorción del agregado fino 13
e) Densidad real y capacidad de absorción del agregado grueso 14
f) Contenido de humedad de los agregados 16
2) Dosificación 16
a) Procedimiento 16
3) Elaboración de la mezcla de hormigón permeable 19
B. SEGUNDA FASE 24
1) Densidad y porosidad del hormigón permeable en estado fresco 24
2) Densidad y porosidad del hormigón permeable en estado endurecido 25
3) Permeabilidad – Conductividad hidráulica 26
C. TERCERA FASE 28
1) Resistencia a compresión 28
2) Resistencia a corte puro 29
a) Metodología del ensayo 29
b) Configuración de la viga 30
CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUCIÓN 34
I. ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS 34
A. PRIMERA FASE 34
1) Ensayos de laboratorio-Propiedades físicas de los materiales 34
a) Densidad del cemento hidráulico 34
b) Análisis granulométrico de los áridos fino y grueso 34
c) Peso volumétrico suelto y compactado de los agregados 36
d) Densidad real y capacidad de absorción del agregado fino y grueso 37
2) Dosificación 37
3) Elaboración de la mezcla de hormigón permeable 38

B. SEGUNDA FASE 40
1) Densidad y porosidad del hormigón permeable en estado fresco 40
2) Densidad y porosidad del hormigón permeable en estado endurecido 43
3) Permeabilidad-conductividad hidráulica 46
C. TERCERA FASE 49
1) Resistencia a compresión 49
2) Resistencia a corte puro 53
a) Configuración de la viga 53
b) Análisis de la resistencia a corte puro 55
II. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS 63
A. HIPÓTESIS 63
B. VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS 63
CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 64
I. CONCLUSIONES 64
II. RECOMENDACIONES 65
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 66
Anexos 72

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Densidad real del cemento hidráulico. 10
Fig. 2. Granulometría del agregado Fino y Grueso. 12
Fig. 3. Tamizado de muestra para obtener agregado de 1/2" (12.7 mm) 12
Fig. 4. Densidad aparente Suelta y Compactada. 13
Fig. 5. Densidad Real y Capacidad de Absorción del Agregado Fino. 14
Fig. 6. Densidad Real y Capacidad de Absorción del Agregado Grueso. 15
Fig. 7. Contenido de humedad. 16
Fig. 8. Asentamiento del hormigón permeable. 20
Fig. 9. Densidad en estado fresco del hormigón permeable ASTM C1688. 21
Fig. 10. Elaboración de cilindros de hormigón permeable. 23
Fig. 11. Elaboración de vigas de hormigón permeable. 23
Fig. 12. Densidad en estado fresco del hormigón permeable. 25
Fig. 13. Densidad y porosidad en estado endurecido del hormigón permeable. 26
Fig. 14. Permeámetro de cabeza descendente simple. 27
Fig. 15. Ensayo a compresión de probetas cilíndricas de hormigón permeable. 29
Fig. 16. Metodología del ensayo. 30
Fig. 17. Configuración de la probeta prismática N°1. Las dimensiones se encuentran en (mm). 31
Fig. 18. Configuración de la probeta prismática N°2. Las dimensiones se encuentran en (mm). 32
Fig. 19. Configuración de la probeta de prueba N°3. Las dimensiones se encuentran en (mm). 32
Fig. 20. Curva granulométrica del agregado fino. 35
Fig. 21. Análisis granulométrico del agregado grueso. 36
Fig. 22. Inspección visual del hormigón permeable. 39
Fig. 23. Densidad en estado fresco del hormigón permeable. 41
Fig. 24. Porosidad en estado fresco del hormigón permeable. 42
Fig. 25. Densidad en estado endurecido del hormigón permeable. 43
Fig. 26. Porosidad en estado endurecido del hormigón permeable. 44
Fig. 27. Gráfico comparativo Densidad Fresca vs Densidad Endurecida. 45
Fig. 28. Gráfico comparativo Porosidad fresca vs Porosidad endurecida. 46
Fig. 29. Permeabilidad promedio. 47
Fig. 30. Relación entre la permeabilidad y densidad. 48

Fig. 31. Relación entre la permeabilidad y porosidad. 48
Fig. 32. Resistencia a compresión promedio. 50
Fig. 33. Modos de falla típico (Muestras sin adición de PSM). 51
Fig. 34. Modos de falla típicos (Muestras con adición de PSM). 52
Fig. 35. Modo de falla - Probeta prismática N°1. 54
Fig. 36. Modo de falla - Probeta prismática N°2. 54
Fig. 37. Modo de falla - Probeta prismática N°3. 55
Fig. 38. Mecanismos de fractura. 56
Fig. 39. Diagramas de curvas: a) Carga vs Desplazamiento – a/c 0.30. b) Esfuerzo vs Desplazamiento – a/c 0.30. c) Carga vs Desplazamiento – a/c 0.35. d) Esfuerzo vs Desplazamiento – a/c 0.35. 58
Fig. 40. Resistencia a corte puro promedio. 60
Fig. 41. N° de PSM en la superficie de falla vs Esfuerzo máximo promedio. 60
Fig. 42. Energía de fractura. 63

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I ABERTURA DE TAMIZ PARA AGREGADO FINO. Adaptado de [61] 11
TABLA II. ABERTURA DE TAMIZ PARA AGREGADO GRUESO. Adaptado de [59], [61] 11
TABLA III CANTIDAD DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS REALIZADOS 22
TABLA IV CANTIDAD DE ESPECÍMENES PRISMÁTICOS REALIZADOS 22
TABLA V DOSIFICACIÓN AL PESO 38
TABLA VI ASENTAMIENTO DE MEZCLAS DE HORMIGÓN PERMEABLE 39
TABLA VII DENSIDAD Y POROSIDAD EN ESTADO FRESCO DEL HORMIGÓN PERMEABLE ASTM C1688 40
TABLA VIII RANGOS DE DENSIDAD Y POROSIDAD EN ESTADO FRESCO 40
TABLA IX DENSIDAD Y POROSIDAD EN ESTADO FRESCO DE HORMIGÓN PERMEABLE ASTM C1688/ ASTM C192 40
TABLA X DENSIDAD EN ESTADO ENDURECIDO DE HORMIGÓN PERMEABLE 43
TABLA XI RANGOS TÍPICOS DE DENSIDAD Y POROSIDAD 46
TABLA XII PERMEABILIDAD - CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA 46
TABLA XIII RANGOS TÍPICOS DE PERMEABILIDAD 48
TABLA XIV RESULTADOS RESISTENCIA A COMPRESIÓN 49
TABLA XV RANGOS TÍPICOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN 50
TABLA XVI RESULTADOS RESISTENCIA A CORTE PURO 59
TABLA XVII RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A CORTE EXPERIMENTAL Y CALCULADA 61
TABLA XVIII ESFUERZOS RESIDUALES 62
TABLA XIX TRABAJO Y ENERGÍA DE FRACTURA (2MM) 62

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Densidad del cemento hidráulico 72
Anexo 2: Análisis granulométrico del agregado fino. 72
Anexo 3: Análisis granulométrico del agregado grueso. 73
Anexo 4: Peso volumétrico suelto de los agregados. 73
Anexo 5: Peso volumétrico compactado de los agregados. 74
Anexo 6: Densidad real y capacidad de absorción del agregado fino. 74
Anexo 7: Densidad real y capacidad de absorción del agregado grueso. 75
Anexo 8: Cálculo de dosificaciones. 75
Anexo 9. Densidad y porosidad en estado fresco ASTM 1688. 84
Anexo 10. Densidad y porosidad en estado fresco ASTM C1688 / ASTM C192 85
Anexo 11. Densidad y porosidad en estado endurecido ASTM C1754 87
Anexo 12. Permeabilidad - Conductividad hidráulica. 89
Anexo 13. Resistencia a compresión. 91
Anexo 14. Diagramas “Carga vs Desplazamiento” y “Esfuerzo vs Desplazamiento” 93
Anexo 15. Resistencia a corte puro. 99
Anexo 16. Anexo Fotográfico 99

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

ACI PRC-522-23	American Concrete Institute (Pervious Concrete-Report Committee 522)
NTE INEN	Norma Técnica Ecuatoriana INEN (Servicio Ecuatoriano de Normalización
ASTM	American Society for Testing and Materials
NRMCA	National Ready Mixed Concrete Association
PSM	Macrofibras sintéticas de polipropileno
HP	Hormigón permeable
a/c	Relación agua/cemento
a:c	Relación agregado:cemento
IRC	Indian Roads Congress.
LVDT	Transformadores diferencias de variación lineal

RESUMEN EJECUTVO

El hormigón permeable es un material ampliamente utilizado como pavimento en capas superficiales, sin embargo, su uso está limitado a condiciones de carga menor debido a su estructura porosa. Su aplicación contribuye en reducir problemas generados por la escorrentía superficial como inundaciones, erosión del suelo, y disminución de recursos hídricos subterráneos. A pesar de que existen múltiples investigaciones sobre su diseño y propiedades, se ha identificado una limitación en el análisis de su comportamiento ante esfuerzos cortantes. Esta propiedad es crucial debido a la fragilidad del hormigón bajo dichas condiciones, lo cual puede ocasionar fallas súbitas en su estructura.

La investigación se centró en analizar la resistencia a compresión y corte puro de hormigón permeable para relaciones agua/cemento de 0.30 y 0.35, y adición de macrofibras de polipropileno en 2.50 y 4.00 kilogramos por metro cúbico. La dosificación se realizó conforme a las recomendaciones del Comité ACI PRC-522-23, empleando ripio de 1/2 pulgada y 10 por ciento de arena. Previo a la obtención de las propiedades mecánicas, se determinaron las propiedades físicas como densidad, porosidad y permeabilidad. Posteriormente, la resistencia a compresión se determinó en base a la normativa NTE INEN 1573/ASTM C39, mientras que la resistencia a corte se obtuvo mediante un procedimiento experimental a partir ensayos Push-Off, para lo cual se evaluaron tres configuraciones de viga con diferentes dimensiones y refuerzos a fin de identificar los mecanismos de fractura involucrados.

Los resultados evidenciaron que, un cambio en la relación agua/cemento tuvo mayor influencia sobre las propiedades mecánicas del hormigón permeable, incrementando la resistencia a compresión y corte en aproximadamente 31 y 70 por ciento respectivamente. Por otra parte, la adición de macrofibras de polipropileno mostró una mayor incidencia sobre la resistencia a corte, mejorando hasta un 55 por ciento. Para llevar a cabo el análisis a corte, se seleccionó el modelo de viga reforzada internamente con varillas de 6mm y externamente con fibra de vidrio adherida a las caras laterales mediante una capa de mortero.

Palabras clave: Hormigón permeable, propiedades físicas, resistencia a compresión, resistencia a corte, ensayos Push-Off.

ABSTRACT

Pervious concrete is a material widely used as pavement in surface layers; however, its use is limited to lower load conditions due to its porous structure. Its application contributes to reduce problems generated by surface runoff such as flooding, soil erosion, and reduction of groundwater resources. Despite the existence of multiple investigations on their design and properties, a limitation has been identified in the analysis of their behavior under shear stresses. This property is crucial due to the fragility of concrete under such conditions, which can cause sudden failures in its structure.

The research focused on analyzing the pure compressive and shear strength of permeable concrete for water/cement ratios of 0.30 and 0.35, and the addition of polypropylene macrofibers at 2.50 and 4.00 kilograms per cubic meter. The dosage was carried out in accordance with the recommendations of the ACI Committee PRC-522-23, using 1/2 inch gravel and 10 percent sand. Prior to obtaining the mechanical properties, physical properties such as density, porosity and permeability were determined. Subsequently, compressive strength was determined based on the NTE INEN 1573/ASTM C39 standard, while shear strength was obtained through an experimental procedure based on Push-Off tests, for which three beam configurations with different dimensions and reinforcements were evaluated in order to identify the fracture mechanisms involved.

The results showed that a change in the water/cement ratio had a greater influence on the mechanical properties of the permeable concrete, increasing the compressive and shear strength by approximately 31 and 70 percent, respectively. On the other hand, the addition of polypropylene macrofibers showed a greater impact on shear strength, improving it by up to 55 percent. To carry out the shear analysis, a beam model was selected, reinforced internally with 6 mm rods and externally with glass fiber adhered to the lateral faces by means of a layer of mortar.

Keywords: pervious concrete, physical properties, compressive strength, shear strength, Push-Off tests.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

En este capítulo vamos a abordar la justificación y los antecedentes investigativos que sustentan el uso y desarrollo del hormigón permeable siendo así que el enfoque de la presente investigación radica en la necesidad de profundizar el estudio de ciertas propiedades y características del material.

I. JUSTIFICACIÓN

El hormigón permeable es un material proporcionado con poros macroscópicos entrelazados, de modo que forman una estructura de poros abiertos, lo que facilita el flujo del agua a través del material mediante la acción de la gravedad [1]. Este tipo de compuesto a diferencia del hormigón tradicional está limitado por la presencia de agregados de granulometría abierta; es decir, aquellos que contienen una mayor cantidad de agregado grueso y una mínima o nula proporción de agregado fino con el objetivo de crear un alto contenido de vacíos que varía entre el 15 y el 35% [2]. Como consecuencia, su estructura resulta comprometida bajo la acción de grandes cargas, por lo que la resistencia se ve considerablemente reducida.

Actualmente, existen múltiples investigaciones que abordan el estudio de diferentes propiedades del hormigón permeable; sin embargo, no se ha encontrado literatura científica relacionada con la estimación de la resistencia a corte puro, a pesar de ser una propiedad esencial debido a la naturaleza frágil y vulnerabilidad del hormigón ante estos esfuerzos.

De este modo, con la presente investigación se pretende analizar el comportamiento del hormigón permeable evaluando ciertas propiedades físicas y mecánicas dentro de lo cual se busca solventar la carencia de información respecto a la resistencia al corte puro, con el fin de sentar bases y ofrecer un recurso a la comunidad científica para el desarrollo de estudios posteriores dentro de esta área.

II. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Según la bibliografía existente, el hormigón permeable se utilizó por primera vez en Reino Unido a mediados del siglo XIX, de modo que, estaba compuesto principalmente por agregado grueso y material cementante. De ahí se vuelve a mencionar nuevamente su uso en países como Escocia en el año 1923 donde se construyeron alrededor de 50 casas de dos pisos y que posteriormente para el año 1942 contribuyó en la edificación de 900 casas [1], [3].

Más adelante, tras los daños causados por la segunda guerra mundial, la mayor parte de Europa experimentó una gran demanda en la reconstrucción de viviendas. Sin embargo, ante la

escasez de materiales y mano de obra, se desarrolló el uso del hormigón permeable como una solución accesible y económica [4]. A partir de ello, se hizo evidente la necesidad de investigar las propiedades del hormigón permeable [1], [5], siendo así que, en la etapa posguerra se alcanzó una gama de aplicaciones más extensas, logrando estructuras de hasta 10 pisos [3].

A diferencia de Europa, en América del Norte el uso del hormigón permeable no era una necesidad, ya que no enfrentó tanta escasez de materiales y por lo tanto su desarrollo comenzó años más tarde [6]. En Estados Unidos, los muros del cementerio de Rosehill son el ejemplo más conocido, mientras que, en Canadá formó parte de diversas casas en Toronto y Ottawa [1].

A pesar de que el hormigón permeable se consolidó como una alternativa dentro de la construcción de elementos portantes en viviendas como paredes estructurales y muros de carga; su aplicación fue cuestionada debido a la calidad de mano de obra, ausencia de normativas estandarizadas y preocupación por el desempeño estructural [7].

En consecuencia, el hormigón permeable experimentó grandes cambios en su campo de aplicación, consolidándose como un material de gran importancia para satisfacer las necesidades de infraestructura moderna enfocada en el cuidado del medio ambiente, al contribuir con la mitigación de superficies impermeables que evitan que el agua se infiltre por debajo del suelo ocasionando la interrupción del ciclo natural del agua [8], [9]. Estas condiciones ocasionan a un desequilibrio en el ecosistema, al generar un aumento de la escorrentía superficial que da lugar a diversos problemas como el deterioro de aguas superficiales, erosión del suelo, inundaciones rio abajo, transporte de sedimentos y disminución de recursos hídricos subterráneos [10].

Es así como, la mayoría de las investigaciones han optado el uso y diseño de hormigón permeable como material de pavimento en capas de superficie como calles, estacionamientos, caminos de acceso, aceras, pisos, etc. [6], [9], [11], [12], [13], [14]. Por tal razón, es necesario tomar en cuenta su eficacia para cumplir con los requisitos de sostenibilidad, resistencia y durabilidad, considerando que su aplicación se limita a condiciones de cargas menores debido a su vulnerabilidad ante ciertos esfuerzos [11], [15].

El comité ACI 522 ha publicado distintos reportes sobre el hormigón permeable los cuales se han venido modificando regularmente desde el 2002 hasta su última actualización en 2023. Este documento ofrece una visión completa sobre las mejores prácticas y recomendaciones técnicas para optimizar su aplicación. Asimismo, dispone de datos esenciales acerca de las aplicaciones a lo largo de la historia, ventajas, desventajas, limitaciones, materiales, procedimientos de diseño, dosificaciones y propiedades a determinarse [1].

Debido a la gran cantidad de beneficios que ofrece el hormigón permeable, investigadores de todo el mundo están interesados en desarrollar materiales robustos y de larga duración que permitan conseguir diseños capaces de cumplir con las propiedades mecánicas e hidrológicas adecuadas [11]. Por ello, es necesario controlar estrictamente cada uno de los componentes y proporciones que intervienen dentro del diseño de mezclas de hormigón permeable [11], [16]. De manera general, los factores que se deben controlar al momento de diseñar este tipo de mezclas son: la relación agua/cemento, el tamaño del agregado grueso, la cantidad de agregado fino, adición de fibras y adición de aditivos. Estos aspectos inciden directamente en sus propiedades físicas y mecánicas [17], [18], [19], [20].

El creciente interés en la investigación acerca del diseño y propiedades del hormigón permeable se ha evidenciado en una gran cantidad de literatura científica. Kováč y Sičáková [8] evaluaron las propiedades "Densidad endurecida, contenido de vacíos, permeabilidad y resistencia a la tracción por compresión y división" a partir de tres proporciones a/c, agregado grueso de fracción 4/8 y un 7% de arena. En función de ello, determinaron una naturaleza rígida y poca adherencia para una relación a/c de 0.25; mientras que las mezclas con relación a/c de 0.30 y 0.35 fueron las más adecuadas debido a que los resultados demuestran que al aumentar la relación a/c, el contenido de vacíos y permeabilidad disminuyen en tanto aumenta la densidad, contribuyendo una mejora en las propiedades mecánicas.

Joshi y Dave [21] analizaron la influencia de la relación a/c y el tamaño de los agregados en las propiedades "Densidad, contenido de vacíos, permeabilidad y resistencia a compresión". En esta investigación se utilizan tres relaciones agua/cemento "0.30,0.35 y 0.40" y tres tamaños de agregados "6-10mm, 10-20mm, combinación de ambos", demostrando que la relación a/c de 0.3 y una combinación de agregados (50%) muestran los mejores resultados. La investigación determinó que al aumentar la relación a/c y disminuir el tamaño del agregado, el contenido de vacíos y la permeabilidad disminuyen, mientras que la densidad y resistencia a compresión aumenta.

Asimismo, en el estudio realizado por Ramírez *et al.*[22], evaluaron la resistencia a compresión y flexión a partir de una dosificación elaborada con una relación a/c de 0.30 y 0.35, agregado grueso de "9, 13 y 19 mm", adición de 10% de arena e incorporación de 0.6 kg/m^3 de fibras de polipropileno. Sus resultados demuestran que al aumentar la relación a/c y al disminuir el tamaño de los agregados, las propiedades mecánicas mejoran notablemente; sin embargo, el uso de fibras beneficia únicamente la resistencia a flexión en comparación con la resistencia a compresión. Como complemento, demostraron que el tamaño de agregado de 13 mm mantiene un equilibrio entre las propiedades mecánicas y permeabilidad.

Por otra parte, en el estudio realizado por Xu *et al.* [23] ajustaron la relación agua/cemento a 0.41 para investigar el efecto del tamaño de los agregados, que van desde 2.36 a 26.5 mm, en las propiedades de "Porosidad, permeabilidad, resistencia a compresión, estabilidad dinámica, resistencia por desgaste y estabilidad del volumen". De igual forma, indican que la adición de agregado fino mejora el punto de unión entre los agregados aumentando así la resistencia y durabilidad del hormigón permeable, aunque, tiene gran influencia en la estructura de poros. De esta forma, determinaron que la sección de poros disminuyó conforme aumentaron las cantidades de agregado fino en proporciones de 0, 10 y 15%. Así establecieron que la adición del 10% de agregado fino mantiene un tamaño mediano de poros, mientras que al adicionar más del 15%, los poros tienden a obstruirse e imposibilita el drenaje de agua.

De manera similar, de acuerdo con la investigación realizada por Bonicelli *et al*. [24] evaluaron las propiedades "contenido de vacíos, permeabilidad y resistencia al deshilachado, resistencia a tracción indirecta y módulo de rigidez" para una relación a/c de 0.27, 0.30, 0.35; adición de arena en 5-10% e incorporación de fibras de polipropileno, poliolefina, polipropileno/polietileno y polipropileno de alta tenacidad. Como resultado, obtuvieron que la adición del 10% de arena fue la opción más efectiva para mejorar la resistencia al desgarro del hormigón permeable; mientras que, la incorporación de fibras de polipropileno/polietileno contribuyó significativamente sobre la resistencia a tracción directa.

Adicionalmente, según el estudio desarrollado por Zhu *et al.* [25], investigaron las propiedades "porosidad, permeabilidad, resistencia a compresión y flexión" a partir de tres relaciones a/c "0.25, 0.30 y 0.35", incorporación de 10% de arena reciclada y adición de fibra gruesa de polipropileno, fibra de polipropileno y fibra recubierta de cobre. En base a ello, determinaron que la relación a/c más adecuada fue de 0.3, debido a que con 0.25 la hidratación fue insuficiente, mientras que con 0.35 aumentó la lechada de cemento, acumulándose en el fondo. Asimismo, luego de evaluar tres proporciones de fibra gruesa de polipropileno "2, 3 y 4 kg//m^3", identificaron que 3 kg/m^3 de fibra dio como resultado un equilibrio entre porosidad, permeabilidad y resistencia.

Siguiendo el mismo enfoque, en el trabajo realizado por Wu *et al.* [26], diseñaron muestras para una relación a/c de 0.3 y determinaron las propiedades "Porosidad, permeabilidad, resistencia a compresión, flexión, congelación y corrosión ácida". Complementariamente, agregaron fibras de polipropileno en proporciones de 0 kg/m^3, 3 kg/m^3, 6 kg/m^3 y 9 kg/m^3. Como resultado, evidenciaron que la porosidad y permeabilidad disminuyen rápidamente conforme aumenta la cantidad de fibra en la mezcla. Conjuntamente a las propiedades físicas,

establecieron que, para una proporción de fibra de 6 kg/m3 se alcanza la resistencia máxima en comparación a los demás porcentajes de fibras, siendo así la dosificación más adecuada.

Dentro de la bibliografía revisada, se encuentra una amplia gama de investigaciones sobre el hormigón permeable, enfocadas principalmente en el estudio de propiedades como: densidad, porosidad, permeabilidad, resistencia a compresión, flexión, tracción indirecta, estabilidad dinámica y resistencia por desgaste [8], [25], [26], [27], [28], [29], [30]. Sin embargo, se ha identificado la inexistencia de estudios relacionados con la estimación de resistencia a corte puro y considerando la fragilidad inherente del hormigón ante esfuerzos cortantes, surge el interés por explorar y profundizar el análisis de su resistencia.

Se ha identificado tres configuraciones de prueba (Z-type Push-Off specimen, Double notched push-through specimen y Single notched FIP-type specimen), que resultan efectivas para investigar el estado puro de corte [31]. El ensayo tipo Push-Off es la opción que mejor se adapta a los recursos disponibles, de fácil aplicación, uso común [32] e incluso conducen a resultados más representativos debido a que genera un solo plano de corte vertical [33].

Aunque el procedimiento de ensayo se encuentra bien estructurado y definido, no se dispone de una normativa aplicable que lo regule. Por tanto, únicamente se ha encontrado investigaciones que desarrollan campañas experimentaciones bajo ciertas condiciones de prueba.

Según lo expuesto en [33], [34], [35], [36], [37], [38], las dimensiones de los especímenes parten de una fracción residual de una viga ensaya a flexión, de la cual se obtienen muestras de hasta 300 mm de longitud; sin embargo, de acuerdo con lo señalado en [32], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], se pueden utilizar dimensiones más grandes de hasta 700mm. A su vez, se han planteado varios planos de falla guiados por la profundidad de las entalladuras realizadas [47], [48] ; no obstante, la configuración de prueba más utilizada consiste en una muestra compuesta por dos aberturas opuestas equidistantes conectadas a través de un plano vertical alineado a la dirección de la carga [33], la cual se ha aplica a una velocidad de desplazamiento que oscila entre 0.001 mm/s hasta 0.13 mm/s [33], [35], [37], [39], [43], [46], [49], [50], [51].

Es así que, el principal desafío radica en garantizar que la falla ocurra dentro del plano de corte, evitando modos de falla no deseados por efecto de flexión o compresión [45]. Para abordar esta problemática, según [37], [38], [39], [48] sugieren reforzar las caras externas con fibra de carbono; aunque de acuerdo con [51], [52], [53], han optado por reforzar internamente mediante varillas de acero en forma de L, sin afectar el plano de corte.

En este marco de referencia, la resistencia a corte puro ha sido estudiando ampliamente bajo múltiples variables de análisis. Según lo descrito en [32], [39], [40], [54], evaluaron la influencia del acero corrugado que cruza a través del plano de corte, mientras que en [34], [35], [36], [37], [38], [45], [55], analizaron el efecto de distintos tipos de fibras utilizadas para controlar la apertura de grietas generada por esfuerzos cortantes.

Considerando que existe una amplia cantidad de bibliografía disponible, se ha identificado que la metodología empleada por Picazo [38] recoge los aspectos más relevantes y es la que mejor se adapta a las necesidades planteadas en la presente investigación, tomando como referencia su protocolo metodológico para ejecutar el ensayo.

En [38], a partir de muestras sobrantes de ensayos a flexión en tres puntos, obtuvieron muestras de 150 x 150 x 270 mm, en las que se realizaron dos entalladuras opuestas con una profundidad de 75mm y 9 mm de espesor, formando una altura de ligamento de 90 mm por donde se transmite el esfuerzo cortante. Dentro de este estudio se consideró la posibilidad de que las probetas fallen por flexión en los voladizos y para prevenir estos inconvenientes, reforzaron las caras empleando un tejido de carbono adherido con resina epoxi. El ensayo se controló a una velocidad de desplazamiento de 0.001 mm/s a través de la aplicación una carga puntual mediante el uso de dos barras de acero de 10 x 10 x 200 mm ubicadas en la parte superior e inferior de la probeta con el objetivo de alinear la carga con la superficie de falla. Por último, utilizaron transformadores diferencias de variación lineal (LVDT) para medir los desplazamientos relativos de la fisura de corte.

En base a los antecedentes revisados y en el mejor conocimiento del autor, se ha visto la necesidad de estudiar la influencia de la relación a/c y la adición de fibras de polipropileno sobre las propiedades físicas y mecánicas del hormigón permeable; destacando la resistencia a corte puro como una propiedad aún no investigada en este tipo de materiales, por lo que representa una innovación en el campo de estudio para futuras investigaciones.

.

III. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la resistencia a compresión y corte puro de probetas de hormigón permeable con distintas relaciones agua/cemento con adición de fibras de polipropileno.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1) Dosificar muestras de hormigón permeable a partir de distintas relaciones agua/cemento y adición de fibras de polipropileno.

2) Evaluar las propiedades físicas como densidad, porosidad y permeabilidad.

3) Analizar las propiedades mecánicas como resistencia a compresión y corte puro, de probetas de hormigón permeable.

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA

En este capítulo vamos a describir los equipos, materiales, metodología y métodos necesarios para el desarrollo de la investigación. Con el fin de asegurar su cumplimiento, la presente investigación se dividió en tres fases que reflejan cada uno de los objetivos planteados.

De manera global, en la primera fase se realizó la dosificación del hormigón permeable para distintas relaciones agua/cemento y adición de fibras de polipropileno. En la segunda fase se establecieron las propiedades físicas del hormigón permeable como densidad en estado fresco y endurecido, porosidad y permeabilidad. Finalmente, en la tercera fase se determinaron las propiedades mecánicas del hormigón permeable como resistencia a compresión y corte puro mediante ensayos Push-Off / Empuje.

I. EQUIPOS Y MATERIALES

A continuación, se describen los materiales y equipos utilizados durante la investigación:

En la primera fase, se seleccionaron y determinaron las propiedades de los materiales necesarios para la dosificación y mezcla del hormigón permeable. Dentro de los materiales se incluyen agua potable, cemento portland tipo GU (Holcim), agregado fino y grueso provenientes de la Mina “ALVORTIZ”, aditivo acelerante plastificante (Sika Plastocrete 161 HE), macrofibras sintéticas de polipropileno (TenaBrix) cuyo diámetro es de 0.8mm, módulo de elasticidad ≥ 5000 MPa y densidad de 0.91 g/cm^3. De igual forma se emplearon diversos equipos que se dispone en el laboratorio de Ingeniería Civil , destacando de manera general el uso de un horno industrial Quincy lab (51-V1172) y una balanza analítica SHIMADZU (AUW220D), los cuales se utilizaron en la mayoría de los ensayos. De manera específica, para el ensayo de la densidad del cemento, se utilizó un Frasco Le Chatelier. En los ensayos de granulometría, masa unitaria (Suelta y Compactada) y densidad real del agregado fino y grueso se usaron respectivamente un juego de tamices (Humboldt), una tamizadora (CONTROLS), un molde cilíndrico de metal, un picnómetro y una canastilla de alambre. Finalmente, para la elaboración de muestras, se empleó una concretera de motor eléctrico (Century 200 L), moldes cilíndricos (Diámetro: 100 mm, Longitud: 200 mm), moldes prismáticos (150 x 150 x 290mm) con placas de madera (Ancho:75 mm, Espesor: 10mm) incorporadas en su interior para formar muescas en las probetas durante su proceso de moldeo, varillas compactadoras (Longitud: 300 y 600 mm, Diámetro: 10 y16 mm respectivamente), un martillo de goma (0.6 ± 0.2 kg) y una cámara de curado (Temperatura 23 ± 2°C).

Para el desarrollo de la Fase 2, fue necesario el uso de ciertos equipos a fin de determinar la densidad, porosidad y permeabilidad hormigón permeable. En primer lugar, para obtener la

densidad y porosidad se hizo uso de un molde de acero (3.09 L), un martillo proctor estándar (5.5 lb), una canasta de alambre, una balanza y un mazo de goma (0.6 ±0.2 kg). De igual manera, para determinar la permeabilidad fue indispensable el uso de un cronómetro y un permeámetro de cabeza descendente, el mismo que fue construido en base a las recomendaciones de la ACI PRC-522-23 [1] y Neithalath *et al.* [56].

Por último, para la ejecución de la Fase 3, se empleó una Máquina de Ensayo (SHIMADZU CONCRETO 2000X con extensómetros incorporados), siendo así que se determinó ciertas propiedades mecánicas del hormigón permeable como la resistencia a compresión y corte puro. Adicionalmente, para evaluar la resistencia a corte puro se requirió el uso de varilla corrugada (Diámetro: 6mm, Esfuerzo de fluencia: 420 MPa), fibra de vidrio (E GLASS CHOPPED STRAND MAT 378G/M^2) cuya resistencia a tensión es de 130 N), resina de poliéster pura ortoftalica (PINTULAC), Mortero Maxilevel Topping 210 (INTACO) y un adhesivo epóxico (SIKADUR 32 PRIMER).

II. MÉTODOS

La presente investigación está principalmente orientada a la comunidad científica y los métodos utilizados pueden resultar de gran interés para ingenieros civiles dedicados al estudio de nuevos materiales empleados en el ámbito de la construcción. La metodología es de carácter cuantitativa debido a que se pretende generar resultados objetivos a partir de datos numéricos obtenidos en cada uno de los ensayos propuestos.

En el marco de la investigación realizada, se llevó a cabo un total de 90 cilindros de hormigón permeable, de los cuales se utilizaron 36 para evaluar las propiedades físicas y 54 para determinar la resistencia a compresión. Asimismo, se elaboró 18 vigas con la finalidad de analizar la resistencia a corte puro. El detalle de los especímenes realizados se encuentra descrito dentro de las fases propuestas.

A continuación, se describen los métodos empleados para el desarrollo de cada una de las fases:

A. PRIMERA FASE

Durante la primera fase, se realizó la dosificación del hormigón permeable para distintas relaciones agua/cemento con adición de fibras de polipropileno. Dentro de esta fase se utilizó dos métodos de investigación:

En primer lugar, se destaca el método de análisis cuantitativo, dado que, para la dosificación se obtuvieron datos numéricos a partir de ensayos de laboratorio, estableciéndose así las distintas propiedades del cemento, agregado fino y agregado grueso.

En segundo lugar, se empleó el método de investigación bibliográfica o documental, en donde se indagó los métodos de diseño, dosificación y elaboración de hormigón permeable.

1) Ensayos de laboratorio-Propiedades físicas de los materiales

a) Densidad del cemento hidráulico

Se determinó la densidad del cemento en base al método volumétrico de Le Chatelier de acuerdo con la normativa NTE INEN 156 / ASTM C188 [57], [58] , en donde se relaciona la masa del cemento respecto al volumen de un líquido no reactivo. Para este ensayo se utilizó aproximadamente 64 gr de cemento y 0.5 cm^3 de gasolina premium. La densidad se expresa de la siguiente manera:

$$\rho_c = \frac{M_c}{V_d} \qquad (1)$$

Donde,

ρ_c Densidad del cemento [gr/cm^3].

M_c Masa del cemento [gr].

V_d Volumen desplazado [cm^3].

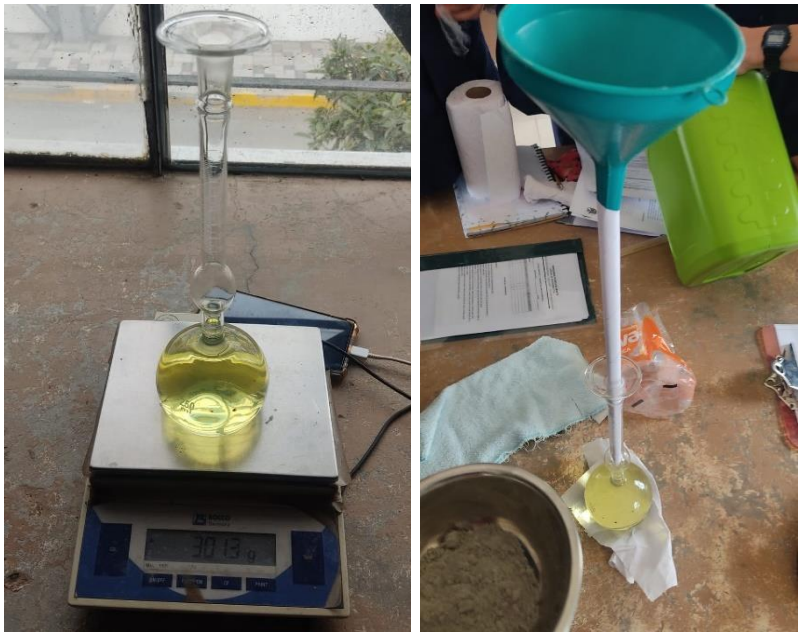


Fig. 1. Densidad real del cemento hidráulico.

b) Análisis granulométrico en los áridos fino y grueso

Se determinó la distribución granulométrica por tamizado de los áridos fino y grueso de acuerdo a la normativa NTE INEN 696 / ASTM C136 [59], [60]. Para ello se dejó secar las

muestras a una temperatura de 110 °C ± 5°C hasta conseguir una masa constante. La cantidad de agregado fino utilizado fue de 1000 gr , mientras que para el agregado grueso fue de 2 kg.

Este procedimiento se basa en la separación de los áridos en función del tamaño de abertura de una serie de tamices, los mismos que fueron ordenados en forma decreciente como se muestra en la TABLA I y TABLA II para el agregado fino y grueso respectivamente.

TABLA I
ABERTURA DE TAMIZ PARA AGREGADO FINO. Adaptado de [61]

Tamiz N°	**Abertura/Tamaño**	**Límites % que Pasa**
3/8	9.50 mm	100
#4	4.75 mm	95-100
#8	2.36 mm	80-100
#16	1.18 mm	50-85
#30	600 µmm	25-60
#50	300 µmm	5-30
#100	150 µmm	0-10

Nota: La norma recomienda que la granulometría del agregado fino debe encontrarse dentro de los límites.

TABLA II.
ABERTURA DE TAMIZ PARA AGREGADO GRUESO. Adaptado de [59], [61]

Tamiz N°	**Abertura/Tamaño (mm)**	**% Que Pasa**
2”	50.80	-
1 1/2”	38.1	-
1”	25.4	100
3/4”	19.05	90-100
1/2"	12.7	20-55
3/8”	9.5	0-15
#4	4.75	0-5

A partir de ello, se obtuvo los pesos retenidos acumulados y el porcentaje que pasa por cada tamiz, permitiendo elaborar una Curva Granulométrica (Abertura Tamiz vs % Pasa).

En el caso del agregado fino se calculó el Módulo de Finura dividiendo para 100 la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados de los tamices #100, #50, #30, #16, #8, #4, 3/8”, etc. [62]. De igual manera, se constató que la cantidad de sustancias perjudiciales presentes en el agregado se encuentre dentro del rango aceptable (≤5%); Este valor se evalúa mediante el porcentaje que pasa el tamiz #200 (75µm) [61].

A su vez, para el agregado grueso se determinó el tamaño nominal máximo, definido como el tamiz más pequeño por donde pasa la mayor parte de la muestra y que retiene aproximadamente del 5% al 15% [63].



Fig. 2. Granulometría del agregado Fino y Grueso.

Es importante resaltar que, el análisis granulométrico del agregado grueso se realizó únicamente para identificar la cantidad disponible de agregado de 1/2" (12.7mm), el mismo que fue empleado en la investigación debido a que, según los resultados obtenidos en la investigación de Ramírez *et al*. [22], determinaron que este tamaño de agregado es el más adecuado en términos de equilibrio entre las propiedades de permeabilidad y resistencia.

El agregado de 1/2" corresponde al material que pasa el 100% el tamiz 3/4" y se retiene en el tamiz de 1/2" [64].



Fig. 3. Tamizado de muestra para obtener agregado de 1/2" (12.7 mm) .

A partir de este tamaño de agregado, se realizó el resto de los ensayos que se describen más adelante.

c) Peso volumétrico suelto y compactado de los agregados

Se obtuvo el peso volumétrico de los agregados fino y grueso en el estado suelto y compactado de acuerdo con la normativa NTE INEN 858 / ASTM C29/C29M [65], [66]. El procedimiento se lo realizó con una muestra previamente secada al horno a una temperatura de 110°C±5°C

hasta obtener una masa constante. La compactación se lo realizó dentro de tres capas ubicadas a un tercio de la altura del molde mediante un varillado de 25 golpes alrededor de toda la superficie. Finalmente, para calcular numéricamente el peso volumétrico, se aplicó la siguiente fórmula:

$$D_{SU} = \frac{Msu - Mm}{V} \quad (2)$$

$$D_{CO}(DRUW) = \frac{Mco - Mm}{V} \quad (3)$$

Donde,

D_{SU} Densidad en estado suelto [kg/dm^3].

D_{CO} Densidad compactada (DRUW) [kg/dm^3].

Msu Masa del agregado suelto más el molde [kg].

Mco Masa del agregado compactado más el molde [kg].

Mm Masa del molde [kg].

V Volumen del molde [dm^3].



Fig. 4. Densidad aparente Suelta y Compactada.

d) Densidad real y capacidad de absorción del agregado fino

Se determinó la densidad real y absorción del árido fino mediante el método gravimétrico de acuerdo con la normativa NTE INEN 856 / ASTM C128 [67], [68]. Este ensayo se lo realizó con una muestra saturada superficialmente seca (SSS). Para alcanzar este estado, la muestra debe estar sumergida en agua durante aproximadamente 24h ± 4h. A continuación, se secó la superficie de la muestra utilizando una secadora hasta lograr la condición deseada. A modo de asegurar esta condición, se colocó una porción de agregado fino dentro de un cono truncado y se compacto mediante 25 golpes; al levantar este cono, la muestra debe desmoronarse ligeramente, indicando así la condición saturada superficialmente seca.

Dentro de este método, se utilizó un picnómetro el cual tiene una marca de aforo de 500 cm^3 los mismos que deben ser llenados con agua. Seguidamente se colocó una muestra de 500 gramos generando así un volumen de agua desalojada. Posteriormente se agitó el picnómetro a fin de eliminar las burbujas de aire existente y finalmente se constató el nivel del agua se encuentre en la marca de aforo. La densidad real se calculó de la siguiente manera:

$$DR_F = \frac{M_{SSS}}{V_{SSS}} \quad (4)$$

Donde,

DR_F Densidad real del agregado fino [gr/cm^3].

M_{SSS} Masa de la muestra en estado saturado superficialmente seco [gr].

V_{SSS} Volúmen del agua desalojada [cm^3].

Por último, para calcular la absorción del agregado se utilizó una muestra en estado SSS y se lo dejó secar en el horno a 110°C±5°C para determinar su contenido de humedad de la siguiente manera:

$$\%\, A = \frac{M_{SSS} - M_S}{M_S} * 100 \quad (5)$$

Donde,

$\%A$ Porcentaje de absorción [%].

M_{SSS} Masa de la muestra en estado saturado superficialmente seco [gr].

M_S Masa de la muestra seca al horno [gr].

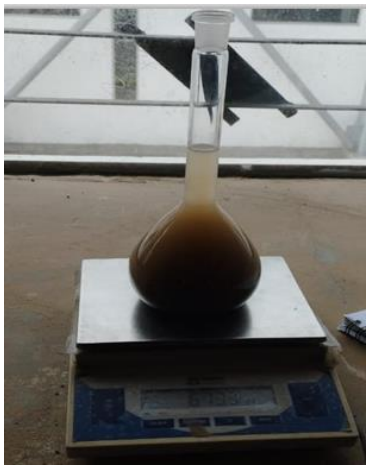


Fig. 5. Densidad Real y Capacidad de Absorción del Agregado Fino.

e) Densidad real y capacidad de absorción del agregado grueso

Se determinó la densidad real y absorción del árido grueso de acuerdo con la normativa NTE INEN 857 / ASTM C127 [69], [70]. Este ensayo se lo realizó con una muestra saturada

superficialmente seca (SSS). Para alcanzar este estado, la muestra debe estar sumergida en agua durante aproximadamente 24h ± 4h. A continuación, se secó la superficie de la muestra utilizando una franela hasta lograr la condición deseada. Una forma visual de asegurar esta condición es cuando la superficie del agregado deja de brillar.

Seguidamente, se determinó el peso de la canastilla en el aire y sumergía en agua . De inmediato se colocó la muestra en estado SSS y se pesó de la misma manera. La densidad real se calculó de la siguiente manera:

$$DR_G = \frac{M_{SSS}}{\frac{M_{SSS} - M_{SSS\ agua}}{\rho w}} \quad (6)$$

Donde,

DR_G	Densidad real del agregado grueso [gr/cm^3].
$M_{SSSaire}$	Masa de la muestra en estado saturado superficialmente seco en el aire [gr].
$M_{SSSagua}$	Masa de la muestra en estado saturado superficialmente seco en el agua [gr].
ρw	Densidad del agua [gr/cm^3].

Por último, para calcular la absorción del agregado se utilizó una muestra en estado SSS y se lo dejó secar en el horno a 110°C±5°C para determinar su contenido de humedad de la siguiente manera:

$$\%\,A = \frac{M_{SSS} - M_S}{M_S} * 100 \quad (7)$$

Donde,

%A	Porcentaje de absorción [%].
M_{SSS}	Masa de la muestra en estado saturado superficialmente seco [gr].
M_S	Masa de la muestra seca al horno [gr].



Fig. 6. Densidad Real y Capacidad de Absorción del Agregado Grueso.

f) Contenido de humedad de los agregados

Se determinó la cantidad de agua que contienen los agregados de acuerdo con la normativa NTE INEN 862 / ASTM C566 [71], [72]. El procedimiento de obtención es sencillo, se secó la muestra en el horno hasta eliminar la humedad tanto interna como superficial. El contenido de humedad se expresa como porcentaje de agua evaporada respecto a la masa seca y se calcula de la siguiente manera:

$$\%H = \frac{M - M_S}{M_S} * 100 \quad (8)$$

Donde,

%H Porcentaje de absorción [%].

M Masa de la muestra original [gr].

M_S Masa de la muestra seca al horno [gr].



Fig. 7. Contenido de humedad.

2) Dosificación

La dosificación para el hormigón permeable se lo realizó en base a las recomendaciones de la última actualización de la ACI PRC-522-23 [1].

a) Procedimiento

Se determinó la cantidad de agregado grueso requerido, multiplicando el peso unitario con varilla seca (DRUW) por el factor 0.9 dado por la norma para hormigones permeables que contengan arena [1].

$$M_G = 0.9 * DRUW \quad (9)$$

Donde,

M_G Masa del agregado grueso [kg]/m^3 de hormigón.

DRUW Peso unitario varillado en seco (dry-rodded unit weight) / Densidad compactada del agregado grueso [kg/m^3].

A partir de la cantidad del agregado grueso, se calculó la proporción de agregado fino, que de acuerdo con la bibliografía antes mencionada [22], [23], [24], [25] se seleccionó una adición del 10% de arena, en vista de que con esta incorporación se mostraron buenos resultados al mejorar la resistencia mecánica del hormigón permeable.

$$M_F = 10\% * (M_G) \quad (10)$$

Donde,

M_F Masa del agregado fino [kg]/m^3 de hormigón.

M_G Masa del agregado grueso [kg] /m^3 de hormigón.

A continuación, se calculó la cantidad de cemento requerido, multiplicando la proporción de agregado grueso por el factor 0.21 dado por la norma para hormigones permeables con alta energía de compactación [1]. Según la investigación realizada por Meininger [73] ,y en donde a través de ensayos de laboratorio, determinó que una alta energía de compactación se logra a través del procedimiento por varillado según por la normativa ASTM C31.

$$M_C = 0.21 * M_G \quad (11)$$

Donde,

M_C Masa del cemento [kg]/m^3 de hormigón.

M_G Masa del agregado grueso [kg]/m^3 de hormigón.

Posteriormente, se determinó la cantidad de agua de amasado en base a las relaciones agua/cemento. La relación agua/cemento se eligió en base a investigaciones previas [8], [22], [24], [25], [74] donde determinaron que las mezclas que tienen una relación en el rango de 0.30 y 0.35 fueron las más adecuadas desde el punto de vista de trabajabilidad y resistencia.

$$Para\ una\ relación\ a/c\ de\ 0.30:\ M_A = 0.30 * Mc \quad (12)$$

$$Para\ una\ relación\ a/c\ de\ 0.35: M_A = 0.35 * Mc \quad (13)$$

Donde,

M_A Masa del agua [kg]/m^3 de hormigón.

M_C Masa del cemento [kg] /m^3 de hormigón.

Por otra parte, se estableció la adición de macrofibras sintéticas de polipropileno (PSM) en dos cantidades, que de acuerdo con la normativa se recomienda la incorporación de entre 1.5 y 4.4 kg/m^3 [1]. Por ello, se ha utilizado 2.50 y 4.00 kg por cada m^3 de hormigón.

$M_{fib} = 2.50$

$M_{fib} = 4.00$

Donde,

M_{fib} Masa de las fibras [kg]/m^3 de hormigón.

Asimismo, se vio la necesidad de añadir un aditivo plastificante para mejorar la trabajabilidad del hormigón permeable y en paralelo con la investigación de Ramírez *et al*. [22], se utilizó un aditivo plastificante acelerante Sika Plastocrete 161 HE. Según el fabricante [75] se recomienda utilizar entre 0.2% y 2.5% al peso del cemento; sin embargo, utilizar más del 1% incrementa un 80% la resistencia en 24 horas, por lo que se ha optado por utilizar 1% para que la resistencia se alcance a lo largo de los 28 días de curado.

$$M_P = 1\% * M_C \quad (14)$$

Donde,

M_p Masa del plastificante [kg] /m^3 de hormigón.

M_C Masa del cemento [kg] /m^3 de hormigón.

Posteriormente, se calculó el volumen absoluto de cada uno de los componentes del hormigón en función de la masa y su densidad.

$$V_{abs} = \frac{masa\ [kg]}{densidad\ [kg/m^3]} \quad (15)$$

En el caso de la densidad del agregado fino y grueso es necesario que su condición sea en estado seco:

$$d_{SH}G = \frac{DR_G}{(1 + \%A)} \quad (16)$$

$$d_{SH}F = \frac{DR_F}{(1 + \%A)} \quad (17)$$

Donde,

$d_{SH}G$ Densidad del agregado grueso en estado seco [kg/m^3].

$d_{SH}F$ Densidad del agregado fino en estado seco [kg/m^3].

DR_G Densidad real del agregado grueso [kg/m^3].

DR_G Densidad real del agregado fino [kg/m^3].

$\%A$ Porcentaje de absorción de agregado grueso o fino [%].

Finalmente se hizo una corrección de humedad debido a que los agregados tienden a tener un contenido de humedad natural y una absorción del material

$$P_{hum.}G = M_G\left(1 + \frac{\%_{hum.}G}{100}\right) \quad (18)$$

$$P_{hum.}F = M_F\left(1 + \frac{\%_{hum.}F}{100}\right) \quad (19)$$

Donde,

$P_{hum.}G$ Peso por humedad natural del agregado grueso [kg]/m^3 de hormigón.

$P_{hum.}F$ Peso por humedad natural del agregado fino [kg]/m^3 de hormigón.

M_G Masa del agregado grueso [kg]/m^3 de hormigón (Estado seco).

M_F Masa del agregado fino [kg]/m^3 de hormigón (Estado seco).

$\%_{hum.}G$ Porcentaje de humedad natural del agregado grueso [%].

$\%_{hum.}F$ Porcentaje de humedad natural del agregado fino [%].

$$\%H_{sup.}G = \%_{hum.}G - \%_{Abs}G \quad (20)$$

$$\%H_{sup.}F = \%_{hum.}F - \%_{Abs}F \quad (21)$$

Donde,

$\%H_{sup.}G$ Porcentaje de humedad superficial del agregado grueso [%].

$\%H_{sup.}F$ Porcentaje de humedad superficial del agregado fino [%].

De esta manera se obtuvo la masa de agua corregida:

$$M_a corregida = M_a - M_G\left(\frac{H_{sup.}G}{100}\right) - M_F\left(\frac{H_{sup.}F}{100}\right) \quad (22)$$

Donde,

$M_a corregida$ Masa del agua corregida [kg]/m^3 de hormigón.

3) Elaboración de la mezcla de hormigón permeable

Luego de obtener la dosificación, se procedió a realizar la mezcla de hormigón permeable en base a la NTE INEN 3124 / ASTM C192/ ASTM C31 [76], [77], [78] debido a que no existe una normativa para especímenes de hormigón permeable.

La mezcla de hormigón se lo realizó en una concretera donde previamente a la rotación, se adicionó el agregado grueso juntamente con parte de la solución del agua y aditivo. A continuación, se encendió la concretera y se colocó el agregado fino, el cemento, las fibras y la fracción restante de agua. Seguidamente se mezcló por 3 minutos; después se dejó en reposo 3 minutos y se encendió nuevamente por 2 minutos más [76], [77].

A partir de la mezcla realizada, se realizaron pruebas de asentamiento en base a la NTE INEN 1578 [79], en donde la mezcla de hormigón permeable se compactó con 25 golpes, en 3

capas dentro de un molde de cono trucando con una varilla lisa de 600 mm de longitud y 16mm de diámetro. El asentamiento se mide como el desplazamiento al retirar el molde.



Fig. 8. Asentamiento del hormigón permeable.

Seguidamente y previo a la elaboración de las probetas de hormigón permeable se verificó y controló la calidad del hormigón permeable a partir de pruebas visuales y complementariamente a través de la determinación de la densidad en estado fresco del mismo.

La densidad y la porosidad en estado fresco se determinó de acuerdo con la normativa ASTM C1688 [80]. Para ello se utilizó el Método A en el cual se colocó una muestra de hormigón permeable en un molde de acero de 3.093 L. y se compactó en dos capas, aproximadamente de la misma profundidad, dejando caer 20 veces un martillo proctor estándar (5.5 lb) a una altura de 30.5 cm. Luego de la compactación, se niveló y se terminó la superficie con una placa de enrasado.

Posteriormente, se determinó la masa del hormigón, restando el peso total del peso del recipiente.

La densidad se calculó de la siguiente manera:

$$D_F = \frac{Mc - Mm}{Vm} \quad (23)$$

Donde,

DF Densidad en estado fresco [kg/m^2].

Mc Masa del molde + Masa del hormigón [kg].

Mm Masa del Molde [kg].

Vm Volumen del molde [m^3].

La porosidad se calculó de la siguiente manera:

$$U = \frac{T - D}{T} * 100 \quad (24)$$

$$T = \frac{M_s}{V_s} \quad (25)$$

Donde,

U Porosidad (contenido de vacíos) [%].

T Densidad teórica del hormigón calculada sin aire [kg/m^3].

Ms Masa total de todos los materiales dosificados [kg].

Vs Suma de los volúmenes absolutos de los ingredientes [m^3].



Fig. 9. Densidad en estado fresco del hormigón permeable ASTM C1688.

Cabe destacar que la energía de compactación no coincide con la energía aplicada en las probetas a realizarse, por lo que no se pueden comparar los valores obtenidos con otros métodos de compactación.

Luego de verificar la dosificación, se determinó la cantidad de probetas a elaborarse en base a las recomendaciones que presentan distintas normas.

Según la normativa ACI 318-19 [81] se deben realizar pruebas de resistencia a compresión en el cual se deben elaborar por lo menos tres cilindros con dimensiones de 100 x 200 mm, o por lo menos dos cilindros con dimensiones de 150 x 300 mm. A partir de estas recomendaciones y para la validez de un resultado, se realizó 3 probetas por cada resultado, obteniéndose así 9 probetas cilíndricas de 100 x 200mm para cada relación a/c (0.3 -0.35) con una adición fija del 10% de agregado fino (%F) y con 0.00 , 2.50 y 4.00 kg/m^3 de macrofibras sintéticas de polipropileno (PSM). Asimismo, se realizaron 6 probetas adicionales para determinar las propiedades físicas del hormigón permeable, llevándose a cabo un total de 90 muestras.

A continuación, se presenta un cuadro resumen con el número de especímenes que se elaboraron:

TABLA III
CANTIDAD DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS REALIZADOS

EDAD:	**28 días**
MUESTRA:	**N° de Especímenes**
Control - a/c 0.3+10%F	15
Control - a/c 0.35+10%F	15
HP - a/c 0.3 + 10%F + 2.5 kg/m^3 PSM	15
HP - a/c 0.3 + 10%F + 4 kg/m^3 PSM	15
HP - a/c 0.35 + 10%F + 2.5 kg/m^3 PSM	15
HP - a/c 0.35 + 10%F + 4 kg/m^3 PSM	15
TOTAL	**90**

Sumado a ello y para fines de la siguiente investigación se elaboró probetas prismáticas de 150 x 150 x 290 mm, debido a que para el ensayo de resistencia a corte puro (Push-Off / Empuje), en la bibliografía existente toman las mitades restantes luego de realizar un ensayo a flexión [33], [34], [82] cuyas dimensiones de viga cumple con la normativa INEN 1576 / ASTM C42 [83], [84].

Según la normativa IS 516-2021 Parte 1, se deben utilizar por lo menos tres especímenes en cada edad seleccionada [85].

A continuación, se presenta un cuadro resumen con el número de especímenes que se elaboraron:

TABLA IV
CANTIDAD DE ESPECÍMENES PRISMÁTICOS REALIZADOS

EDAD:	**28 días**
MUESTRA:	**N° de Especímenes**
Control - a/c 0.3+10%F	3
Control - a/c 0.35+10%F	3
HP - a/c 0.3 + 10%F + 2.5 kg/m^3 PSM	3
HP - a/c 0.3 + 10%F + 4 kg/m^3 PSM	3
HP - a/c 0.35 + 10%F + 2.5 kg/m^3 PSM	3
HP - a/c 0.35 + 10%F + 4 kg/m^3 PSM	3
TOTAL	**18**

Posteriormente, la colocación del hormigón en los moldes cilíndricos, se lo realizó en 2 capas compactadas uniformemente con 25 golpes por capa, utilizando una varilla de acero lisa de 300 mm de longitud y 10 mm de diámetro. De manera similar, para la colocación del hormigón en

los moldes prismáticos se lo realizó en 2 capas compactadas uniformemente empleando una varilla de 16 mm de diámetro y con un golpe por cada 14 cm^2 del área superficial de la viga. En este contexto, la viga utilizada tuvo un área superficial de (29cm x 15cm=435cm^2) lo que resulta en 31 golpes por cada capa. Inmediatamente después de compactar cada capa , se golpeó de 10 a 15 veces el exterior del molde con un mazo de 0.6 kg. Luego de terminar con el vertido y compactación del hormigón permeable, se procedió a igualar la superficie superior a fin de obtener una acabado lo más uniforme posible lo que puede resultar difícil dado que la estructura del hormigón permeable no lo posibilita [76], [77], [78].

Una vez finalizado el moldeo y terminado, los especímenes se almacenaron en el cuarto de curado por un periodo de 24 horas para su curado inicial. Seguidamente se desmoldaron las muestras para pasar al curado final durante 28 días. Las muestras cilíndricas y prismáticas se sumergieron en la cámara de curado, la misma que cumple con los requisitos de la NTE INEN 2528 , asegurando así mantener una temperatura de 23 ± 2°C y humedad relativa no menor a 95% [76], [77], [78].



Fig. 10. Elaboración de cilindros de hormigón permeable.



Fig. 11. Elaboración de vigas de hormigón permeable.

B. SEGUNDA FASE

Durante la segunda fase, se evaluaron las propiedades físicas como densidad, porosidad y permeabilidad del hormigón permeable. Dentro de esta fase se utilizó el método de análisis cuantitativo dado que se obtendrán datos numéricos de cada uno de los parámetros mencionados anteriormente.

1) Densidad y porosidad del hormigón permeable en estado fresco

Se determinó la densidad y la porosidad del hormigón permeable en estado fresco de acuerdo a las recomendaciones de la normativa ASTM C1688 [80].

Si bien, en la fase anterior ya se había determinado la densidad en estado fresco para el control de calidad; en esta fase se obtuvo la densidad del hormigón permeable elaborado en probetas cilíndricas de 100 x 200mm y según los procedimientos de compactación establecidos en las normas NTE INEN 3124 / ASTM C192 / ASTM C31 [76], [77], [78]

Se determinó la masa del hormigón, restando el peso total del peso del recipiente.

La densidad se calculó de la siguiente manera:

$$D_F = \frac{Mc - Mm}{Vm} \quad (26)$$

Donde,

DF Densidad en estado fresco [kg/m^2].

Mc Masa del molde + Masa del hormigón [kg].

Mm Masa del Molde [kg].

Vm Volumen del molde [m^3].

La porosidad se calculó de la siguiente manera:

$$U = \frac{T - D}{T} * 100 \quad (27)$$

$$T = \frac{M_s}{V_s} \quad (28)$$

Donde,

U Porosidad (contenido de vacíos) [%].

T Densidad teórica del hormigón calculada sin aire [kg/m^3].

Ms Masa total de todos los materiales dosificados [kg].

Vs Suma de los volúmenes absolutos de los ingredientes [m^3].



Fig. 12. Densidad en estado fresco del hormigón permeable.

2) Densidad y porosidad del hormigón permeable en estado endurecido

Se calculó la densidad y la porosidad del hormigón permeable en estado endurecido de acuerdo con la normativa ASTM C1754 [86].

Para ello se empleó el método de secado A, el cual se dejó secar la muestra en un horno a una temperatura de 38 ± 3°C durante 24 ± 1h. El proceso de secado se lo realizó dos veces para comparar que las lecturas obtenidas de masa no varíen en un 0.5%, sino por el contrario se debe repetir el procedimiento por un periodo de 24 horas más [86]. Luego de haber secado las muestras, se determinó la longitud y diámetro promedio. La longitud se obtuvo según la normativa ASTM C1542 [87] a partir de 3 mediciones a 90°,180° y 270° alrededor de cilindro; mientras que el diámetro se obtuvo a partir de dos mediciones en ángulos rectos a la mitad de la altura del cilindro. Posteriormente, se sumergieron en agua dentro de una canastilla en un periodo de 30 minutos y bajo el agua se golpeó la superficie de la muestra 10 veces con el mazo de goma de 0.6 ± 0.2 kg. para liberar las burbujas atrapadas dentro del hormigón permeable. Finalmente, se determinó la masa sumergida y la temperatura a la que se encuentra el agua [86].

La densidad se calculó de la siguiente manera:

$$D_E = \frac{K * A}{d^2 * L} \qquad (29)$$

Donde,

DF	Densidad en estado fresco [kg/m^3].
A	Masa seca de la muestra [g].
D	Diámetro promedio de la muestra [mm].
L	Longitud promedio de la muestra [mm].

Factor K: $1273240\,\frac{\mathrm{mm}^3 * \mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3 * \mathrm{g}}$

La porosidad se calculó de la siguiente manera:

$$\%V = \left[1 - \left(\frac{K * (A - B)}{\rho_W * d^2 * L}\right)\right] * 100 \qquad (30)$$

Donde,

%V Porcentaje de vacíos [%].

B Masa sumergida de la muestra [g].

ρw Densidad del agua [kg/m^3].



Fig. 13. Densidad y porosidad en estado endurecido del hormigón permeable.

3) Permeabilidad – Conductividad hidráulica

Para determinar la conductividad hidráulica del hormigón permeable se elaboró un permeámetro de cabeza descendente simple [56], el mismo que es recomendado por la ACI PRC-522-23 [1]. A partir de ello, se construyó un dispositivo adecuado que permite la circulación de agua a través de la muestra cómo se observa en la Fig. 14

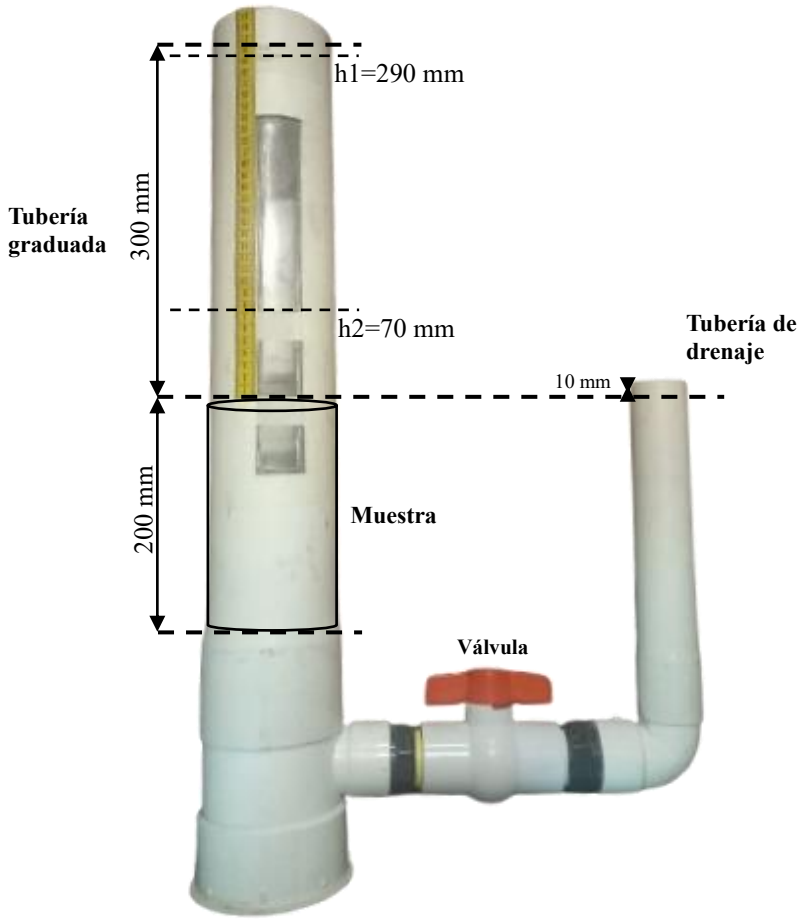


Fig. 14. Permeámetro de cabeza descendente simple.

El dispositivo consta de un tubo PVC de 500 mm de longitud y 4” de diámetro interior. Los 300 mm superiores del tubo se encuentran graduados, mientras que en los 200 mm inferiores se debe ubicar la muestra de hormigón permeable. A continuación, la muestra descansa sobre una tee con una reducción a 50 mm en la cual se conecta una válvula de 50 mm de diámetro, la misma que sirve para conectar la parte inferior del tubo a una tubería vertical de 50 mm de diámetro que sobresale 10 mm sobre la parte superior de la muestra con el objetivo de que no se produzca un flujo no saturado durante la prueba.

A fin de evitar filtraciones en los bordes, las probetas se envolvieron con papel film y se colocó en el dispositivo de prueba. Posteriormente, se añadió agua hasta llenar la celda de la muestra y el tubo de drenaje, siendo así que el nivel del cilindro graduado fuera el mismo que el de la parte superior de la tubería de drenaje. A continuación, se cerró la válvula de agua y se llenó la probeta graduada con agua. Después, se abrió la válvula y se anotó el tiempo que toma en descender el agua desde una altura inicial de 290 mm hasta una altura final de 70mm [56].

Para el cálculo del coeficiente de permeabilidad se empleó la ley de Darcy [56]:

$$K = \frac{A_1 L}{A_2 t} * log\left(\frac{h2}{h1}\right) \quad (31)$$

Donde,

K	Coeficiente de permeabilidad [cm/s].
A1	Área de la sección transversal de la probeta de hormigón permeable [cm^2].
A2	Área de la sección transversal del tubo [cm^2].
L	Altura de la probeta [cm].
t	Tiempo que demoró en pasar de h1 a h2 [s].
h1	Altura inicial (290mm) [cm].
h2	Altura final (70mm) [cm].

C. TERCERA FASE

Finalmente, para el desarrollo de tercera fase, se evaluaron las propiedades mecánicas, resistencia a compresión y corte puro, del hormigón permeable. Dentro de esta fase se utilizaron dos métodos de investigación. En primer lugar, el método de análisis cuantitativo dado que se obtuvieron datos numéricos o graficas (Esfuerzo-Deformación o Esfuerzo-Desplazamiento). En segundo lugar, se empleó una investigación exploratoria debido a que no existe una normativa o literatura disponible que contemple el análisis de la resistencia a corte puro del hormigón permeable. Es por ello que, fue indispensable recopilar información y aspectos relevantes a partir de estudios realizados en hormigón convencional.

1) Resistencia a compresión

La resistencia a compresión se determinó conforme la normativa NTE INEN 1573 / ASTM C39 [88] ante la ausencia de normativa para hormigón permeable. Este ensayo se lo debe realizar en condición húmeda, es decir, lo más pronto posible después de sacarlos de la cámara de curado. Los cilindros fueron ensayados a la edad de 28 días mediante la aplicación de carga axial de compresión a una velocidad de 0.25 ± 0.05 MPa/s hasta que ocurra la falla del espécimen. La resistencia a la compresión se calculó dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo para el área de la sección transversal del espécimen [88].

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (32)$$

Donde,

σ	Resistencia a compresión [MPa]
P	Carga axial máxima soportada [N].
A	Área promedio de la sección transversal del cilindro [mm^2].



Fig. 15. Ensayo a compresión de probetas cilíndricas de hormigón permeable.

2) Resistencia a corte puro

Se analizó la resistencia a corte puro mediante ensayos push-off / Empuje. Considerando que no existe una normativa que regule este ensayo, se tomó como referencia diversas investigaciones [31], [32], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55], [89] que incluyen enfoques teóricos, experimentales y pruebas para garantizar la validez de los resultados obtenidos. Es así que, de acuerdo con la bibliografía revisada, se optó por utilizar la metodología expuesta por Picazo [38], adaptándose a pequeñas modificaciones de acuerdo a las necesidades de la presente investigación.

a) Metodología del ensayo

El ensayo a corte se lo realizó en una máquina SHIMADZU CONCRETO 2000X cuya capacidad de carga es de 2000 kN. La carga se transmitió mediante dos placas de 35 x 15 mm a una velocidad de desplazamiento de 0.001 mm/s (0.06 mm/min). Bajo estas condiciones, la máquina registró la carga aplicada y el desplazamiento en cada abertura empleando dos transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT), cuyo límite de desplazamiento es de 6.6 mm, como se muestra en la Fig. 16. La resistencia a corte se calculó dividiendo la carga máxima aplicada para el área de corte.

$$\tau = \frac{V}{A_C} \qquad (33)$$

Donde,

τ	Resistencia a corte [MPa].
V	Carga máxima aplicada [N].
Ac	Área del plano de corte [mm^2].

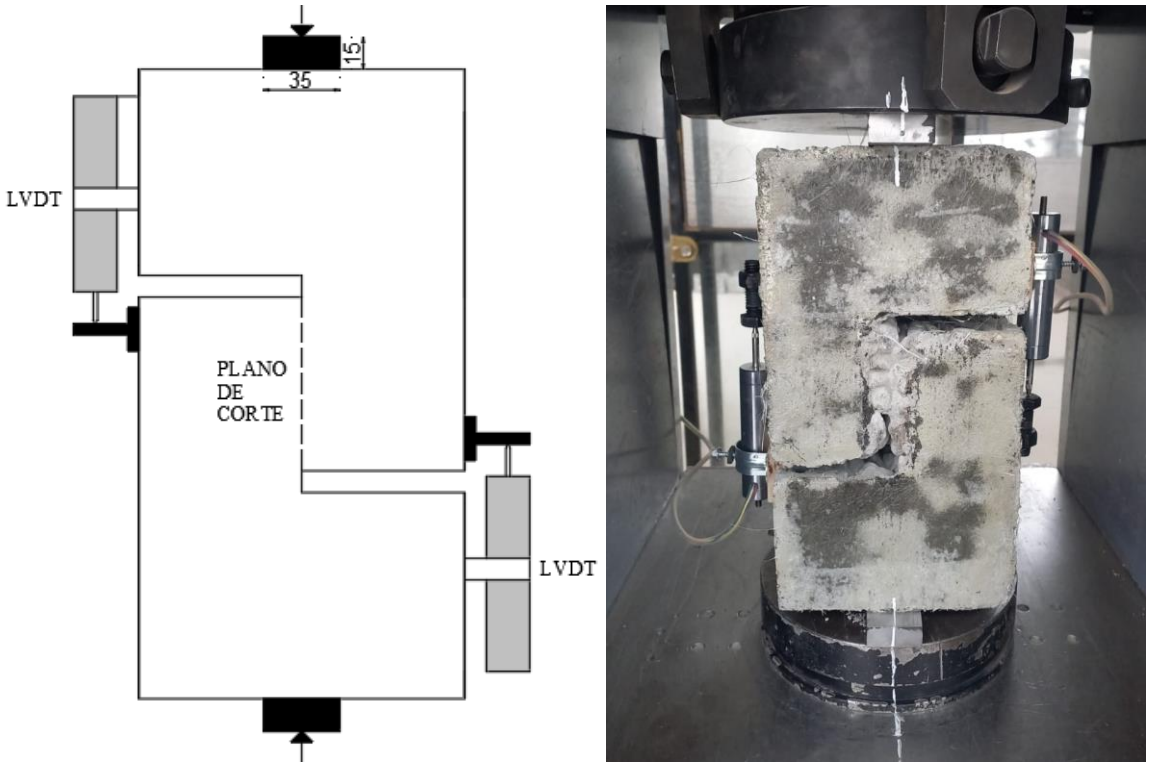


Fig. 16. Metodología del ensayo.

A partir de los datos registrados, se elaboraron gráficas promedio de las curvas "Carga vs Desplazamiento" y "Esfuerzo vs Desplazamiento". Se calcularon los esfuerzos residuales y la energía total disipada por el elemento a través del trabajo (W_f), expresada como el área bajo la curva de la gráfica "Carga vs Desplazamiento". En base a ello, se obtuvo la energía media de fractura que puede disiparse en una unidad de área [90]:

$$G_f = \frac{W_f}{A_c} \qquad (34)$$

Donde,

G_f Energía de fractura [N/m]

W_f Trabajo (kN*mm)

Ac Área del plano de corte [m^2].

b) Configuración de la viga

Se elaboraron tres probetas prismáticas con diferentes configuraciones que fueron ensayadas a corte puro con el objetivo de identificar su comportamiento y mecanismo de fractura. Se estableció como modelo definitivo aquel que presentó la falla en el plano de corte y no en los extremos, donde están influenciados por esfuerzos de flexión. Las probetas se realizaron con la

dosificación “Control - a/c 0.35+10%F” las cuales fueron sumergidas en la cámara de curado durante 7 días para su posterior ensayo.

La primera probeta fue de 150 x 150 x 270 mm con dos entalladuras a cada lado, de 75 mm de profundidad y 10 mm de espesor, ubicadas 85 mm de los extremos como se muestra en la Fig. 17.

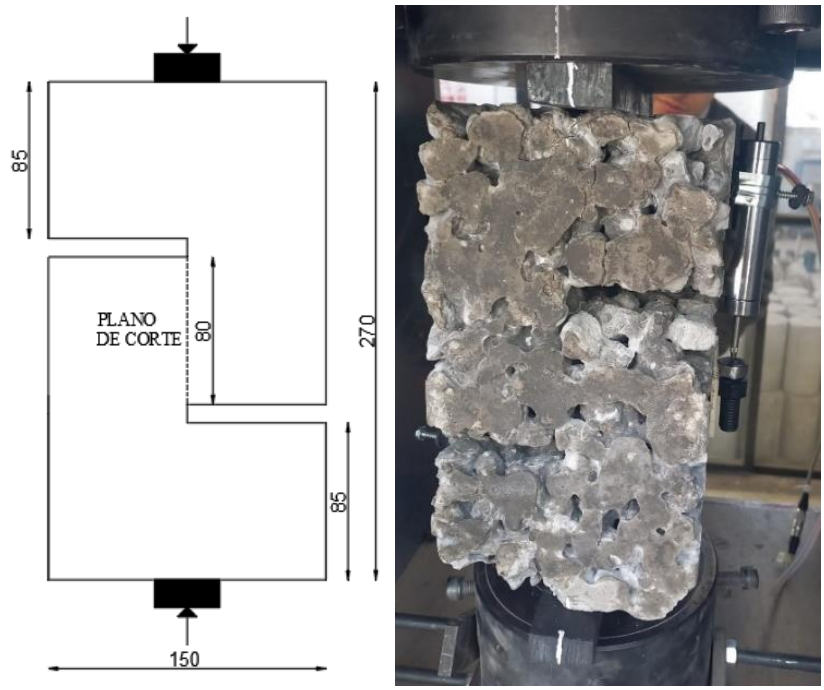


Fig. 17. Configuración de la probeta prismática N°1. Las dimensiones se encuentran en (mm).

La segunda probeta fue de 150 x 150 x 290 mm con dos entalladuras a cada lado de 75 mm de profundidad y 10 mm de espesor, ubicadas a 95 mm de los extremos como se muestra en la Fig. 18. A su vez, para evitar una posible falla de tracción por flexión en las caras tipo “L”, la probeta se reforzó externamente con fibra de vidrio; sin embargo, previo a la colocación la fibra, se niveló la superficie con mortero Maxilevel Topping 210 con el fin de crear un acabado uniforme que garantice una mejor adherencia.

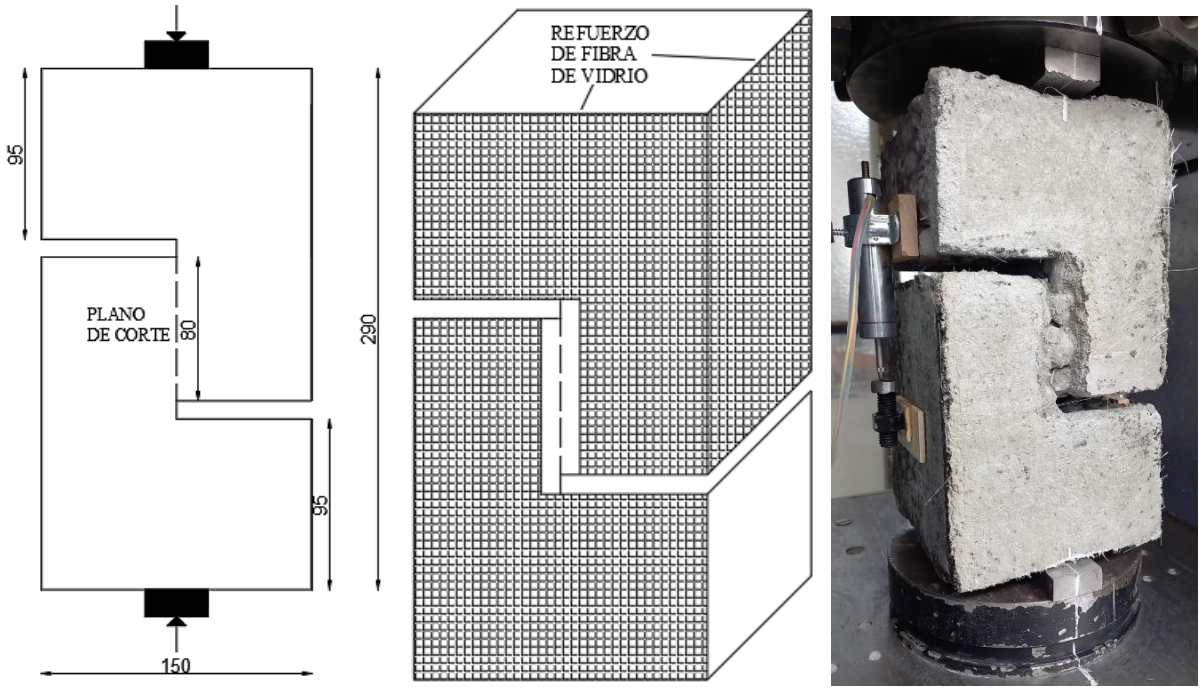


Fig. 18. Configuración de la probeta prismática N°2. Las dimensiones se encuentran en (mm).

La tercera probeta mantuvo las mismas dimensiones y refuerzo de vidrio tal y como se lo realizó con la probeta prismática N°2.; no obstante, se complementó con el uso de un adhesivo epóxico SIKADUR 32 PRIMER con el objetivo de garantizar una correcta unión entre el hormigon permeable endurecido y el mortero fresco. Sumado a esto, se implementó una medida de refuerzo interno, donde se incluyó 4 varillas de 6 mm de diámetro en forma de “L” con un recubrimiento de hormigon de 30 mm como se muestra en la Fig. 19.

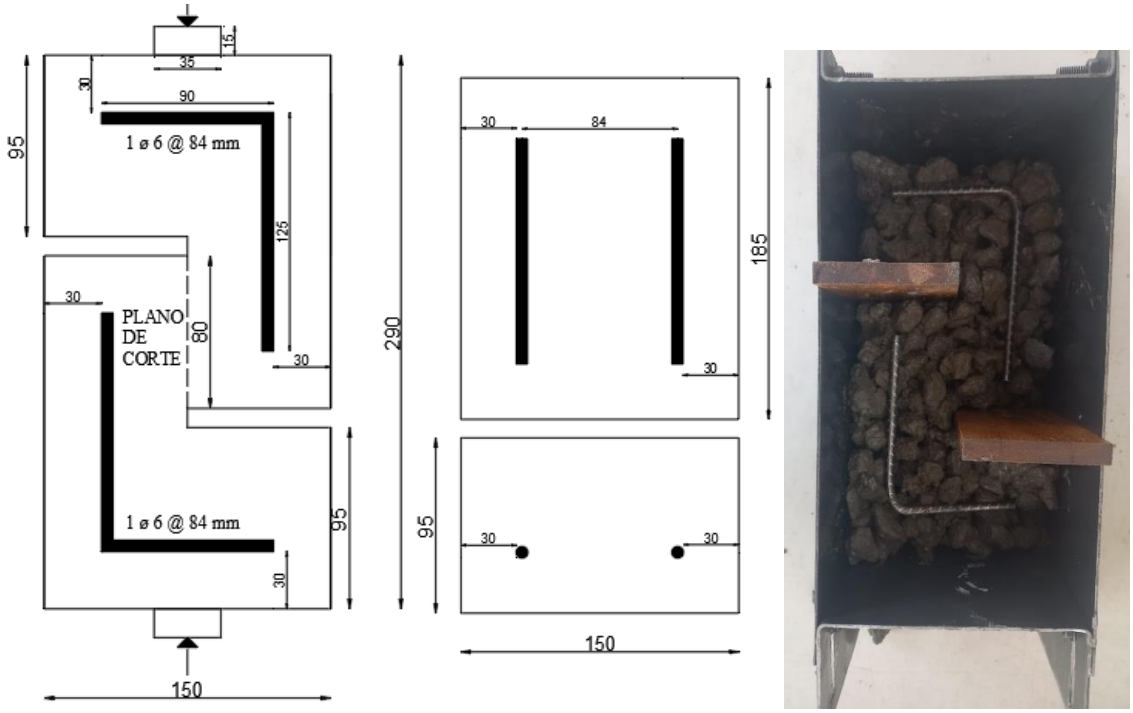


Fig. 19. Configuración de la probeta de prueba N°3. Las dimensiones se encuentran en (mm).

Resulta necesario señalar que las probetas N°2 y N°3 se ensayaron 5 días después de haber finalizado el tiempo de curado, en virtud de que fue el tiempo necesario para que el enlucido y la adhesión de la fibra se completaran de manera adecuada.

Finalmente, en base a los resultados obtenidos, se seleccionó la configuración de la probeta N°3, cuya falla se encontró localizada en el plano de corte. Una vez que se identificó dicha probeta, se elaboraron 18 vigas considerando las dosificaciones expuestas en la primera fase.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUCIÓN

En este capítulo abordaremos el análisis y discusión de resultados en base a la metodología utilizada en el apartado anterior. Para ello, vamos a interpretar y comparar los datos obtenidos con estudios previos dentro del campo de estudio. Así mismo, se realizará la verificación de la hipótesis con el objetivo de validar o descartar las suposiciones iniciales de la investigación. Este apartado es de gran importancia debido a que proporciona credibilidad y rigor científico a la investigación realizada.

I. ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

A. PRIMERA FASE

Dentro de la primera fase se llevaron a cabo ensayos de laboratorio para determinar ciertas características físicas del cemento hidráulico, agregado fino y agregado grueso. Estos resultados permitieron realizar las dosificaciones de mezcla, ajustando las proporciones de acuerdo con los parámetros establecidos. Una vez definida las proporciones de mezcla, se elaboraron probetas de hormigón permeable, las cuales sirvieron como objeto de análisis dentro de las fases posteriores.

1) Ensayos de laboratorio-Propiedades físicas de los materiales

a) Densidad del cemento hidráulico

A partir del ensayo realizado, ver Anexo 1, se obtuvo un valor de densidad de 3.02 gr/cm^3, lo cual es consistente con los valores típicos esperados para cemento portland que varía entre 2.9 y 3.15 gr/cm^3 [91].

b) Análisis granulométrico de los áridos fino y grueso

Se obtuvo la curva granulométrica tanto para los agregados fino y grueso. El detalle de los cálculos se encuentra en el Anexo 2 y Anexo 3 .

- *Agregado fino*

En función del análisis granulométrico del agregado fino ,ver Fig. 20 y Anexo 2, se identificó que el agregado fino cumple con los porcentajes máximos y mínimos de gradación según la normativa NTE INEN 872 [61]. Adicionalmente, se determinó que el módulo de finura es de 2.72%, el mismo que se encuentra dentro del rango de entre 2.30 y 3.10% establecidos en la misma normativa. De igual forma, se verificó que el porcentaje que pasa el tamiz #200 (75µm) es 0.24%; demostrándose que la cantidad de sustancias perjudiciales se encontraron dentro del rango aceptable (≤ 5%).

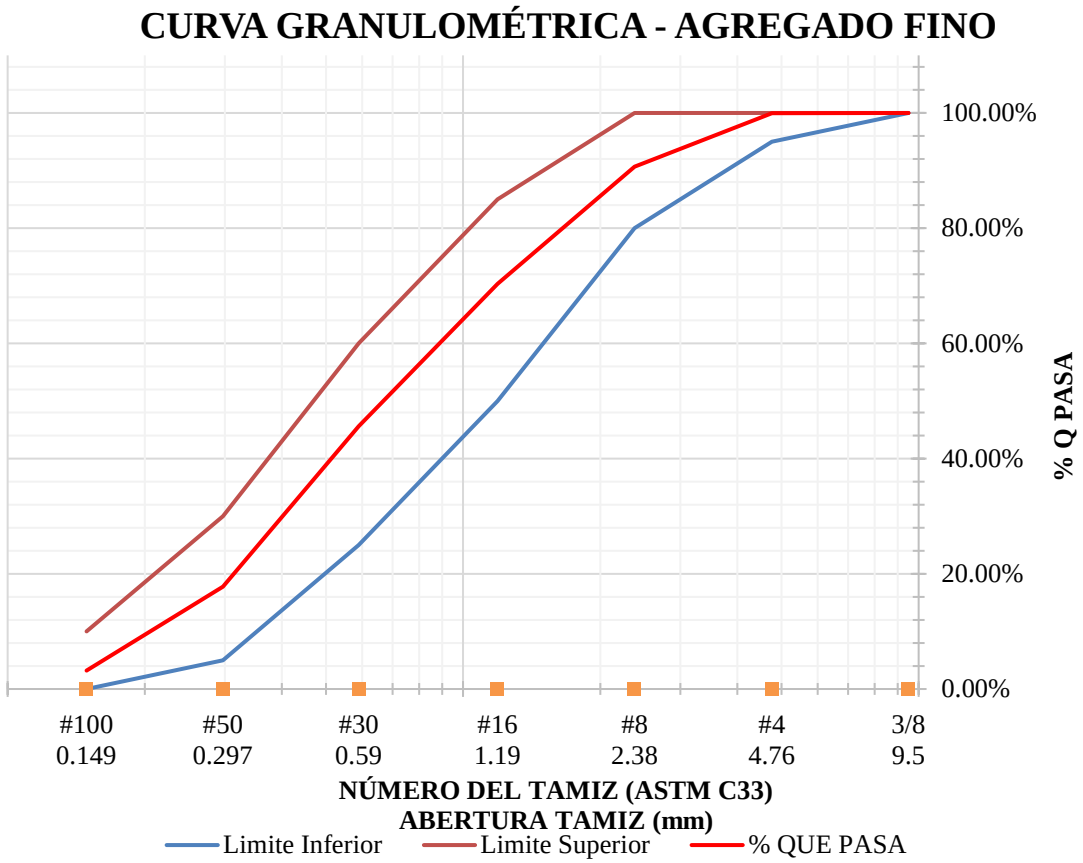


Fig. 20. Curva granulométrica del agregado fino.

- *Agregado grueso*

En función del análisis granulométrico del agregado grueso, ver Fig. 21 y Anexo 3, se determinó que el agregado grueso cumple con los requisitos de gradación definidos en la normativa NTE INEN 872 [61], lo cual lo identifica como número de tamaño 6. Es así, que se encuentra dentro de los porcentajes máximos y mínimos establecidos. Así mismo, se determinó que el tamaño nominal máximo corresponde a 3/4". Pese a ello, para la elaboración del hormigón permeable se consideró un solo tamaño de partícula, de modo que el análisis granulométrico se utilizó principalmente para obtener la cantidad presente de agregado de 1/2". Se estableció que existe un 41% de agregado retenido en el tamiz de 1/2" (12.7 mm), siendo así que con este tipo de agregado (TNM 3/4") podemos maximizar su uso en la presente investigación sin desperdicios significativos.

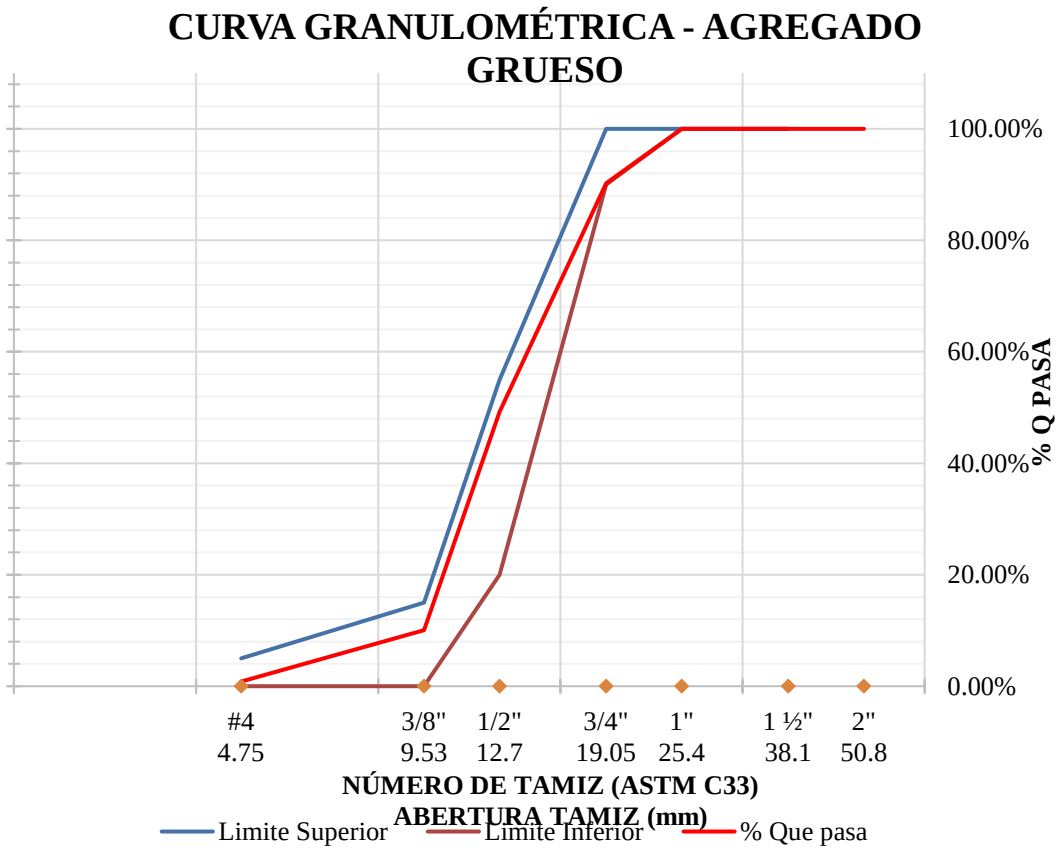


Fig. 21. Análisis granulométrico del agregado grueso.

c) Peso volumétrico suelto y compactado de los agregados

Los ensayos realizados del peso volumétrico suelto y compactado, ver Anexo 4 y Anexo 5, demostraron que el agregado fino tiene una densidad suelta y compactada de 1.445 gr/cm^3 y 1.482 gr/cm^3 respectivamente, mientras que el agregado grueso de 1/2" tiene una densidad suelta y compactada de 1.329 gr/cm^3 y 1.419 gr/cm^3 correspondientemente. Estos valores están en conformidad con el rango establecido por la normativa NTE IENE 694 [62] para áridos de densidad normal cuyos valores se encuentran entre 1.12 gr/cm^3 y 1.92 gr/cm^3.

De la misma manera, de acuerdo con la NEC-SE-CG (Cargas no sísmicas) [92] se establece que el peso unitario de la arena seca es de 1.479 g/rcm^3, demostrando así una estrecha correspondencia con los valores obtenidos en esta investigación. Asimismo, se señala que el peso unitario del ripio seco es de 1.632 gr/cm^3, lo cual corresponde a un valor mayor en comparación con el agregado de 1/2". Esto se debe a que el agregado de 1/2" deja espacios que no pueden ser ocupados por el hecho de que no existen partículas de menor tamaño que puedan llenar aquellos vacíos y en consecuencia la densidad es menor [91].

d) Densidad real y capacidad de absorción del agregado fino y grueso

Los ensayos realizados de la densidad real y capacidad de absorción , ver Anexo 6 y Anexo 7, evidenciaron que el agregado fino tiene una densidad real de 2.648 gr/cm^3 y una capacidad de absorción de 2.48%, en comparación con el agregado grueso que tiene una real de 2.608 gr/cm^3 y una capacidad de absorción de 1.97%. Estos valores se encuentran dentro del rango especificado en [91] para agregados de peso normal, en donde la densidad puede variar de entre 2.4 y 2.9 gr/cm^3 y la absorción de los agregados fino y grueso suelen tener un valor de entre 0.2 al 4% y 0.2 al 2% respectivamente.

Por otra parte, los valores correspondientes al agregado grueso cumplieron con los requisitos establecidos por la normativa NTE INEN 857 [69], según lo cual menciona que para una fracción de tamaño de 12.5 a 37.5 mm, le corresponde una densidad real de 2.56 gr/cm^3 y una absorción de 2.5% , demostrando una alta concordancia con los valores obtenidos en el ensayo a pesar de que solamente se utilizó agregado de 1/2" (12.7 mm).

2) Dosificación

Una vez caracterizados los materiales, se calculó la dosificación siguiendo las recomendaciones de la ACI PRC-522-23 [93]. De esta manera se obtuvieron las cantidades específicas de cemento, agregado grueso, agregado fino, agua, fibras y plastificante. Los cálculos detallados se encuentran en el anexo 8, donde se indica de manera ordenada los procedimientos, fórmulas y resultados obtenidos.

La TABLA V muestra el resumen de las dosificaciones al peso de la mezcla para 1m^3 de hormigón permeable. Tal como se evidencia, la cantidad de cemento utilizada fue de 268.26 kg/m^3. De acuerdo con el conocimiento práctico de la NRMCA [94] el contenido óptimo de cemento depende directamente del tamaño de agregado grueso y puede variar entre 265 y 325 kg/m^3 para producir una mezcla manejable y duradera. De manera similar, el ACI 522R-10 [93] establece rangos típicos para la cantidad de cemento, situándose entre 270 y 415 kg/m^3. Por otra parte, y en concordancia con la presente investigación, Ibrahim *et al.* [64] realizaron una mezcla de hormigón con agregado de 1/2" para una cantidad de 150 y 250 kg/m^3 de cemento. Los resultados indicaron una mejora en las propiedades mecánicas cuando la proporción de cemento fue mayor. En consecuencia, se determinó que el contenido de cemento se encuentra dentro de los rangos de acuerdo con ciertos parámetros establecidos.

Otro aspecto fundamental que se ha evaluado es la relación agregado:cemento, el cual corresponde a 4.76:1. Según la ACI 522R-10 [93], la relación a:c se encuentra dentro de un margen de entre 4 a 4,5:1. Sin embargo, investigaciones como la de Chandrappa *et al.* [16]

indican que la relación a:c puede variar en el rango de 4:1 hasta 6:1. De forma similar se muestra en un estudio realizado por Ghafoori y Dutta [95], dentro del cual analizaron cuatro proporciones a:c (4:1 , 4.5:1 , 5:1 y 6:1); identificando que se pueden lograr resistencias adecuadas con una relación de 4.5:1 o menores. Esta relación influye significativamente en las propiedades mecánicas del hormigón permeable, considerando que a medida que la relación a:c disminuye, la cantidad de pasta de cemento resulta adecuada para recubrir a los agregados, lo que se traduce en mayores resistencias [96]. Por tanto, se determina que la relación a:c se encuentra muy cerca a los valores recomendados.

Finalmente, resulta relevante mencionar que se requiere de una cantidad suficiente de pasta para recubrir los agregados y mantener un sistema de poros interconectados [96] debido a que un contenido de pasta insuficiente puede dar como resultado la reducción del recubrimiento del agregado, mientras que un alto contenido de pasta puede resultar en la obstrucción de los poros [1], [80]. Se destaca que para una relación agua/cemento de 0.30, le corresponde un porcentaje de pasta de 16.93%, mientras que para una relación de 0.35, el porcentaje de pasta asciende al 18.27%, lo que demuestra un incremento del 1.34%. Este incremento se justifica por una mayor adición de agua al incrementar la relación a/c.

TABLA V
DOSIFICACIÓN AL PESO

Dosificación al Peso						
Relación agua/cemento	**0.3**			**0.35**		
Contenido de Fibras (kg/m^3)	**0**	**2.5**	**4**	**0**	**2.5**	**4**
MC: Masa Cemento (kg/m^3)	268.26	268.26	268.26	268.26	268.26	268.26
MG: Masa A. Grueso (kg/m^3) (SH)	1277.45	1277.45	1277.45	1277.45	1277.45	1277.45
MF: Masa A. Fino (kg/m^3) (SH)	127.74	127.74	127.74	127.74	127.74	127.74
MA: Masa Agua (kg/m^3)	80.48	80.48	80.48	93.89	93.89	93.89
Mfib: Masa fibras (kg/m^3)	0.00	2.50	4.00	0.00	2.50	4.00
Plastificante (kg/m^3)	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68

Nota: *SH. El agregado se encuentra en condición seca y en base a estas condiciones se debe realizar la corrección por humedad.

3) Elaboración de la mezcla de hormigón permeable

Una vez obtenida la dosificación, se procedió a realizar la mezcla de los componentes empleando una concretera, con el objetivo de garantizar una combinación homogénea entre los materiales.

Una de las características del hormigón permeable recién mezclado, es que suele ser rígida a diferencia del hormigón convencional que debe ser plástico o semifluido [91]. Esta rigidez se ve reflejada en las pruebas de asentamiento cuyos valores en encuentran la Tabla VI. Como se evidencia, el asentamiento es nulo en todas las dosificaciones de prueba, lo que indica que este

ensayo no es muy eficaz para mezclas de hormigón permeable incluso cuando la relación a/c aumenta.

TABLA VI
ASENTAMIENTO DE MEZCLAS DE HORMIGÓN PERMEABLE

Identificación	Asentamiento (cm)
HP -a/c 0.30+10%F	0
HP -a/c 0.30+10%F+2.5PSM	0
HP -a/c 0.30+10%F+4.0PSM	0
HP -a/c 0.35+10%F	0
HP -a/c 0.35+10%F+2.5PSM	0
HP -a/c 0.35+10%F+4.0PSM	0

Por otra parte, según Ghafoori y Dutta [95], mencionan que las pruebas de asentamiento no son aplicables para medir la consistencia del hormigón permeable, por lo que sugieren realizar una inspección visual con el fin de garantizar que el agregado grueso esté uniformemente recubierto por la pasta de cemento. Esta inspección es satisfactoria cuando la mezcla de hormigón tiene un aspecto metálico húmedo, a lo que conjuntamente se puede apretar y luego soltar un puñado del mismo para constatar que la mezcla no se desmorone ni se desprenda pasta de cemento.

Considerando lo expuesto en el párrafo anterior, se observó que para una relación a/c de 0.30, el agregado grueso quedó recubierto por la pasta de cemento, sin embargo, mostraba una naturaleza poco rígida y una deficiencia del brillo característico. Por el contrario, para una relación a/c de 0.35, la trabajabilidad mejoro notablemente, apreciándose una superficie con un acabado brillante. Dentro de este contexto, se observa un comportamiento similar en la investigación realizada por Kováč y Sičáková [8], en donde a partir de tres relaciones a/ (0.25, 0.30 y 0.35) se obtuvieron resultados equivalentes. Asimismo, lo mencionan McCain y Dewoolkar [97], en su restudio realizado para una relación agua/cemento de 0.25, 0.29 y 0.33.



Fig. 22. Inspección visual del hormigón permeable.

A su vez, se verificó la calidad del hormigón permeable previo a la elaboración de las probetas cilíndricas y prismáticas. Para ello se obtuvo la densidad y porosidad en estado fresco según la normativa ASTM C1688 [58]. En la TABLA VII , se muestran los valores obtenidos para las distintas variaciones de relación a/c y adición de macrofibras de polipropileno. El detalle de los cálculos se encuentra en el Anexo 9.

TABLA VII
DENSIDAD Y POROSIDAD EN ESTADO FRESCO DEL HORMIGÓN PERMEABLE ASTM C1688

Densidad y porosidad en estado fresco del hormigón permeable						
Relación agua/cemento	**0,3**			**0,35**		
Contenido de Fibras (kg/m^3)	0	2,5	4	0	2,5	4
Densidad promedio (kg/m^3)	1960,38	1983,45	1947,02	2014,44	2024,25	2000,70
Porosidad promedio (%)	20,85	19,73	21,09	17,77	17,18	18,03

En base a los resultados se constató que las densidades y porosidades se encuentran dentro de los rangos establecidos según la ACI 522-23 y la ASTM 1688 [1], [80].

TABLA VIII
RANGOS DE DENSIDAD Y POROSIDAD EN ESTADO FRESCO

	Densidad (kg/m^3)	Porosidad (%)	Referencia
ACI 522-23	1990 - 2130	15 - 35	[1]
ASTM C1688	1750 - 2000		[80]

B. SEGUNDA FASE

Una vez concluida la primera fase, en la que se definieron las proporciones de mezcla y se elaboración las probetas de hormigón, se dio inicio a la segunda fase de la investigación. En esta etapa, a partir de 36 probetas cilíndricas, se evaluaron las propiedades físicas del hormigón permeable como la densidad-porosidad en estado fresco y endurecido y permeabilidad.

1) Densidad y porosidad del hormigón permeable en estado fresco

La TABLA IX presenta un resumen de los resultados obtenidos de la densidad y porosidad promedio en estado fresco. El detalle de los cálculos se encuentra en el Anexo 10.

TABLA IX
DENSIDAD Y POROSIDAD EN ESTADO FRESCO DE HORMIGÓN PERMEABLE ASTM C1688/ ASTM C192

Densidad y porosidad en estado fresco del hormigón permeable						
Relación agua/cemento	0,3			0,35		
Contenido de Fibras (kg/m^3)	0	2,5	4	0	2,5	4
Densidad promedio (kg/m^3)	1819,83	1827,31	1804,30	1890,39	1894,16	1874,00
Porosidad promedio (%)	26,53	26,05	26,87	22,84	22,50	23,23

En la Fig. 23 se observa un gráfico comparativo entre los valores de densidad en estado fresco. Estos resultados reflejan que existe un incremento de la densidad de 0.41% cuando se añade 2.5 kg/m^3 de PSM; mientras que al incorporar 4 kg/m^3 de PSM, disminuye 0.85% respecto a la muestra control. De forma similar ocurre con una relación a/c de 0.35, demostrándose que existe un aumento de la densidad de 0.20% cuando se añade 2.5 kg/m^3 de PSM; seguido por una reducción del 0.87% respecto a la muestra control al incorporar 4 kg/m^3 de PSM .

Por otra parte, está claro que conforme aumenta relación a/c, se observa un incremento en la densidad, por lo que existe una relación directa entre estos factores [97] . De esta manera, para una relación a/c de entre 0.30 y 0.35, se evidencia un aumento de la densidad del 3.88%, 3.66% y 3.86% con adiciones de 0.00, 2.50 y 4.00 kg/m3 de PSM. Esta tendencia encuentra su justificación en que para relación a/c de 0.30, la mezcla suele ser más rígida, por lo que resulta una densidad menor, mientras que una relación a/c de 0.35, existe un mayor contenido de pasta de cemento, por lo que la densidad será mayor. Es así como estas tendencias son congruentes con las investigaciones realizadas en [8], [97].

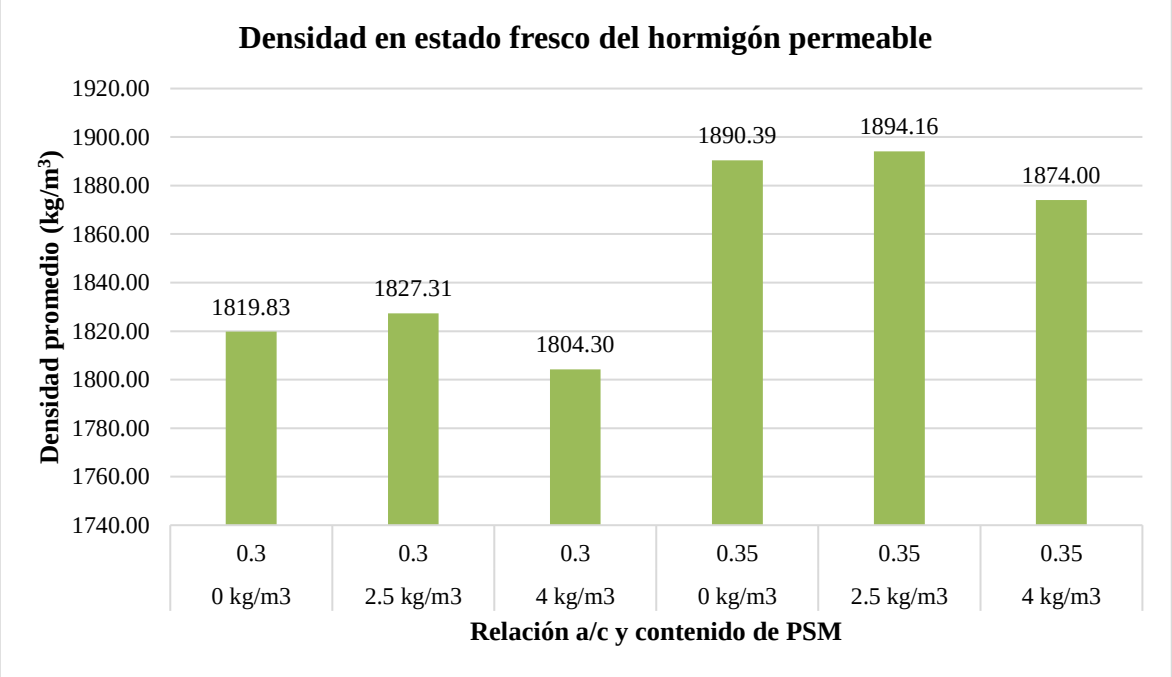


Fig. 23. Densidad en estado fresco del hormigón permeable.

Sumado a esto, se demuestra que existe una relación inversamente proporcional entre la densidad y la porosidad. Esto significa que conforme aumenta la densidad, la porosidad tiende a reducirse y viceversa. Por lo tanto, en la Fig. 24, se aprecia un gráfico comparativo entre los valores de porosidad en estado fresco. Para una relación a/c de 0.30 la porosidad disminuye en 0.48% al incluir 2.5 kg/m^3 de PSM; y seguidamente ocurre un incremento respecto a la muestra

control del 0.35% al integrar 4 kg/m^3 de PSM. Del mismo modo sucede con la relación a/c de 0.35, donde la porosidad disminuye en 0.34% al incluir 2.5 kg/m^3 de PSM; y posteriormente integrar 4 kg/m^3 de PSM registra un aumento respecto a la muestra control del 0.39 %.

De manera general, cuando la cantidad de fibra aumentó a 2.5 kg/m^3, se observó un pequeño incremento en la densidad y una disminución de la porosidad. Esto se atribuye a que las fibras ocupan una parte del volumen de los poros, contribuyendo a la densidad del hormigón permeable. No obstante, cuando la cantidad de fibras aumentó a 4 kg/m^3 se experimentó una disminución en la densidad y un aumento de la porosidad, lo cual puede atribuirse a una cantidad excesiva de fibras que podría generar una mala dispersión entre las mismas y el sustrato de cemento, provocando un cambio en el espesor de la pasta de cemento que cubre los agregados, lo que afecta principalmente en la densidad y porosidad del hormigón permeable. Este comportamiento es consistente con la investigación realizada por Zhu *et al.* [25] y Aliabdo *et al.* donde contribuyen a que la disminución de la densidad y el aumento de la porosidad se debe a la mala dispersión y cohesión de las fibras pueden encontrarse en aquellos espacios ocupados por los agregados y al tener una densidad mucho menor, tienden a disminuir la densidad global del hormigón permeable.

Así mismo, se demuestra que al aumentar la relación a/c de 0.30 a 0.35, la porosidad disminuye en 3.69%, 3.55% y 3.64% al añadir 0.00, 2.50 y 4.00 kg/m3 de PSM. Esta reducción de la porosidad ocurre debido a un mayor espesor de pasta que recubre los agregados, lo cual influye directamente sobre la porosidad.

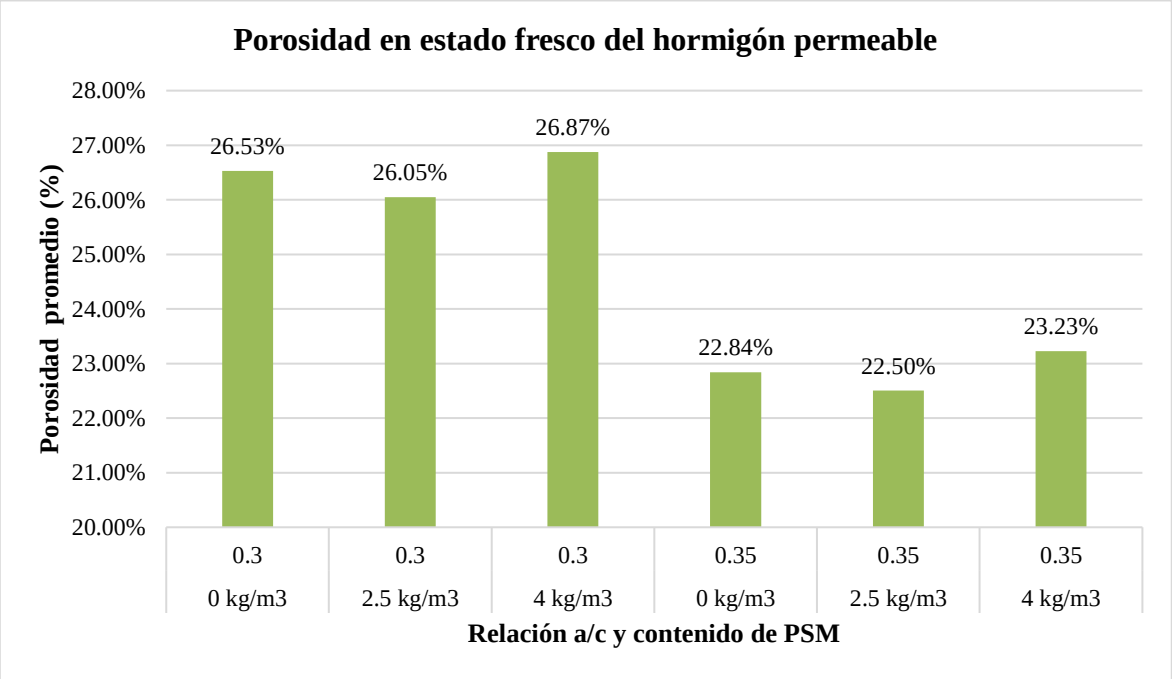


Fig. 24. Porosidad en estado fresco del hormigón permeable.

2) Densidad y porosidad del hormigón permeable en estado endurecido

La TABLA X, presentan un resumen de los resultados obtenidos de la densidad y porosidad promedio en estado endurecido. El detalle de los cálculos se encuentra en el Anexo 11.

TABLA X
DENSIDAD EN ESTADO ENDURECIDO DE HORMIGÓN PERMEABLE

Densidad y porosidad en estado endurecido del hormigón permeable						
Relación agua/cemento	0.3			0.35		
Contenido de Fibras (kg/m^3)	0	2.5	4	0	2.5	4
Densidad promedio (kg/m^3)	1805.05	1813.24	1791.61	1862.95	1867.60	1845.04
Porosidad promedio (%)	27.96%	27.41%	29.01%	26.51%	25.91%	27.17%

En la Fig. 25 se muestra que para una relación a/c de 0.30 se refleja un incremento de la densidad de 0.45% cuando se adiciona 2.5 kg/m^3 de PSM; tras lo cual registra una disminución respecto a la muestra control del 0.74% al incluir 4 kg/m^3 de PSM. De manera análoga ocurre con la relación a/c de 0.35, donde la densidad se incrementa en 0.25% cuando se añade 2.5 kg/m^3 de PSM; seguido de una reducción respecto a la muestra control del 0.96% al incorporar 4 kg/m^3 de PSM.

Así mismo, un cambio en la relación a/c de 0.30 a 0.35, produjo un aumento de la densidad en 3.11%, 2.91% y 2.90% al adicionar 0.00, 2.50 y 4.00 kg/m^3 de PSM.

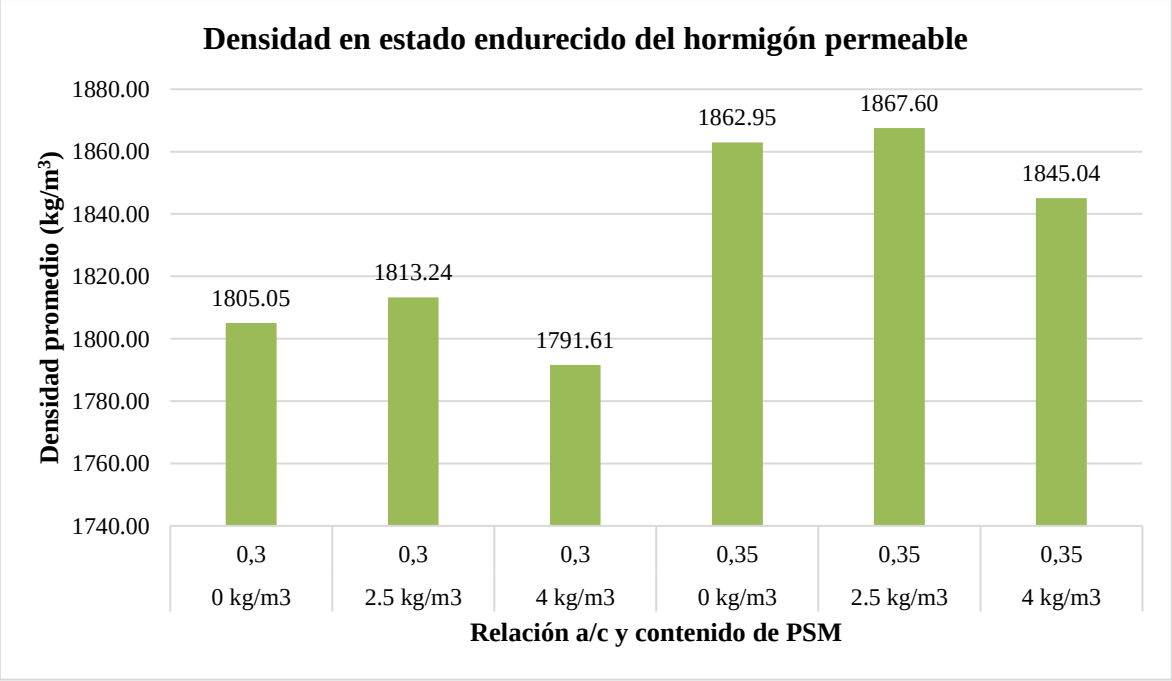


Fig. 25. Densidad en estado endurecido del hormigón permeable.

Adicionalmente, en la Fig. 26 se constata que la porosidad disminuye en 0.56 % al incluir 2.5 kg/m^3 de PSM; y luego ocurre un incremento respecto a la muestra control del 1.04% al integrar 4 kg/m^3 de PSM. Del mismo modo sucede con las porosidades con una relación a/c de 0.35, en donde la porosidad disminuye en 0.60% al incluir 2.5 kg/m^3 de PSM; y seguidamente registra un aumento respecto a la muestra control del 0.66% al integrar 4 kg/m^3 de PSM.

Por otro lado, se demuestra que al incrementar la relación a/c de 0.30 a 0.35, la porosidad disminuye en 1.45%, 1.50% y 1.84% al incorporar 0.00, 2.50 y 4.00 kg/m^3 de PSM.

De manera similar a lo observado en la densidad en estado fresco, se observa que cuando la cantidad de fibra aumentó a 2.5 kg/m^3, existe un incremento en la densidad y una disminución de la porosidad; mientras que cuando la cantidad de fibras aumentó a 4 kg/m^3 se experimentó una disminución en la densidad y un aumento de la porosidad.

Por otra parte, se refleja un comportamiento similar con respecto a la relación a/c, determinándose que cuando la relación a/c aumenta, la porosidad se incrementa paralelamente.

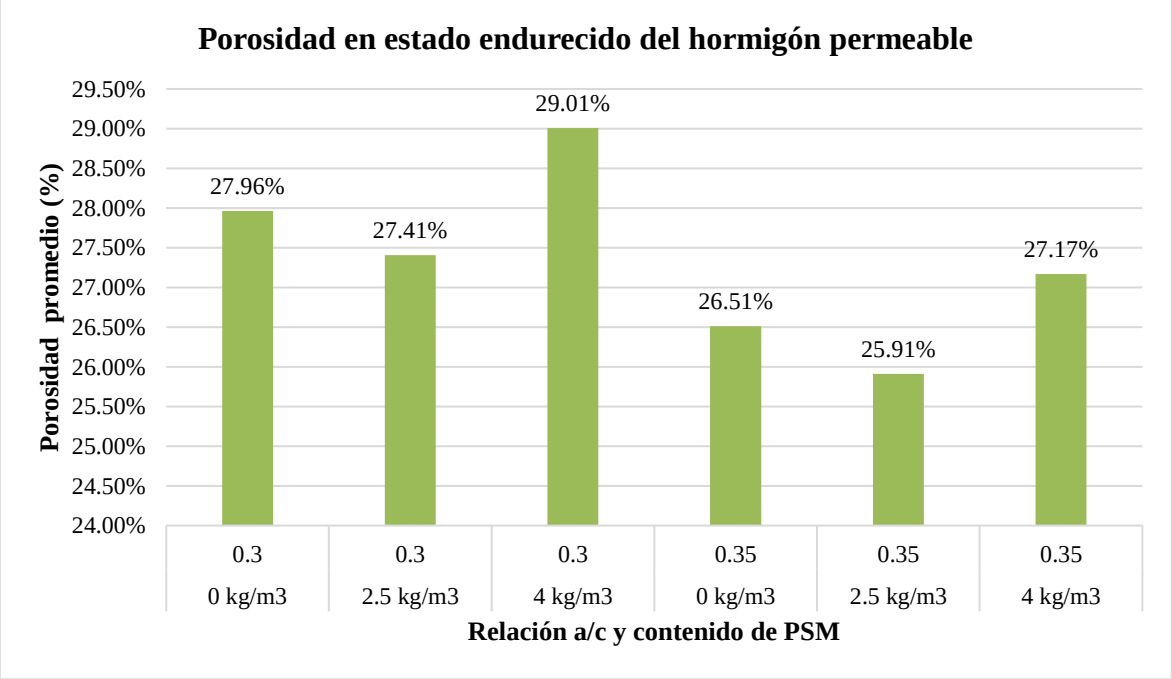


Fig. 26. Porosidad en estado endurecido del hormigón permeable.

En la Fig. 27 y la Fig. 28 se puede observar un gráfico comparativo entre la densidad y porosidad en estado fresco y endurecido.

Tal como se observa en la Fig. 27, para una relación a/c de 0.30 la densidad en estado endurecido disminuye con respecto a la densidad en estado fresco en un 0.81%, 0.77% y 0.70% para adiciones de 0.00, 2.50 y 4.00 kg/m^3 de PSM respectivamente. Simultáneamente, cuando la relación a/c es de 0.35 la densidad endurecida disminuye en un 1.45%, 1.40% y 1.54% para

adiciones de 0.00, 2.50 y 4.00 kg/m^3 de PSM correspondientemente. Esta disminución en la densidad se debe a que el hormigón tiende a perder progresivamente humedad durante su proceso de fraguado, lo que resulta en una menor densidad en estado endurecido. Según [91] la cantidad de agua evaporable del hormigón, a una humedad relativa del 50%, es del 0.5% al 3%; sin embargo, la cantidad real va a depender contenido de agua inicial y los elementos del hormigón.

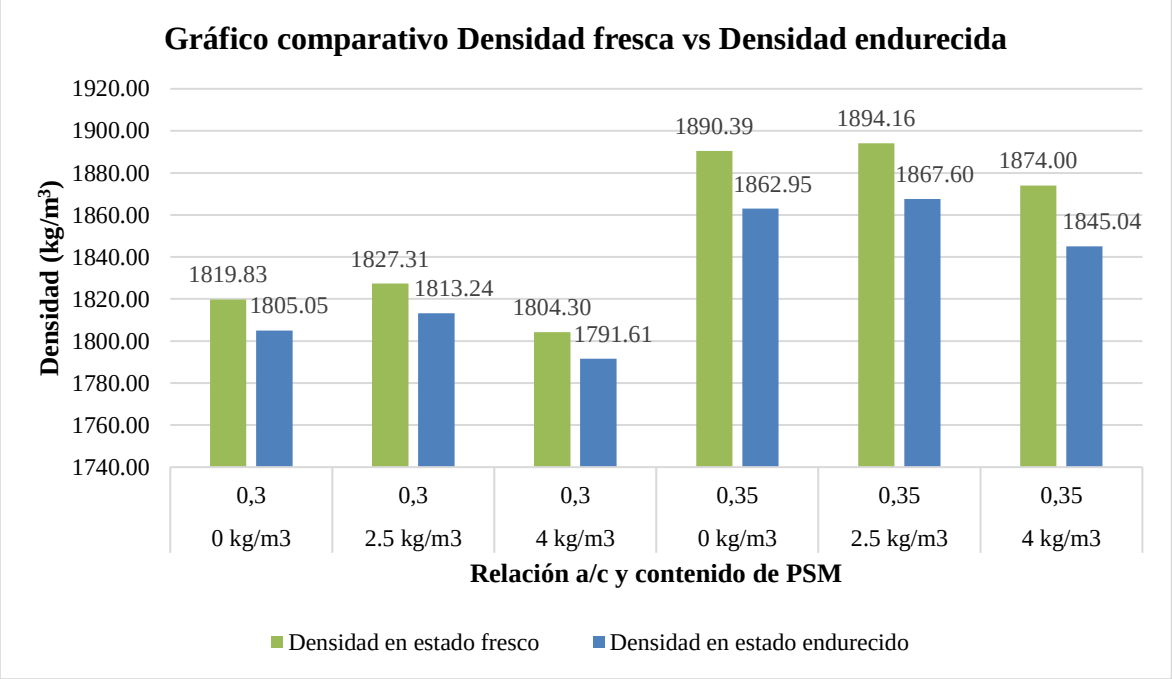


Fig. 27. Gráfico comparativo Densidad Fresca vs Densidad Endurecida.

Por el contrario, en la Fig. 28, se muestra que para una relación a/c de 0.30 la porosidad en estado endurecido aumentó en relación con la porosidad en estado fresco en un 1.44%, 1.36% y 2.13% al añadir 0.00, 2.50 y 4.00 kg/m^3 de PSM correspondientemente. A la vez, cuando la relación a/c es de 0.35, la porosidad se incrementó en un 3.67%, 3.41% y 3.94% para adiciones de 0.00, 2.50 y 4.00 kg/m^3 de PSM respectivamente. El incremento de la porosidad se justifica por la diminución de la densidad en comparación con la densidad en estado fresco, lo que genera espacios intersticiales dentro de la estructura del hormigón permeable.

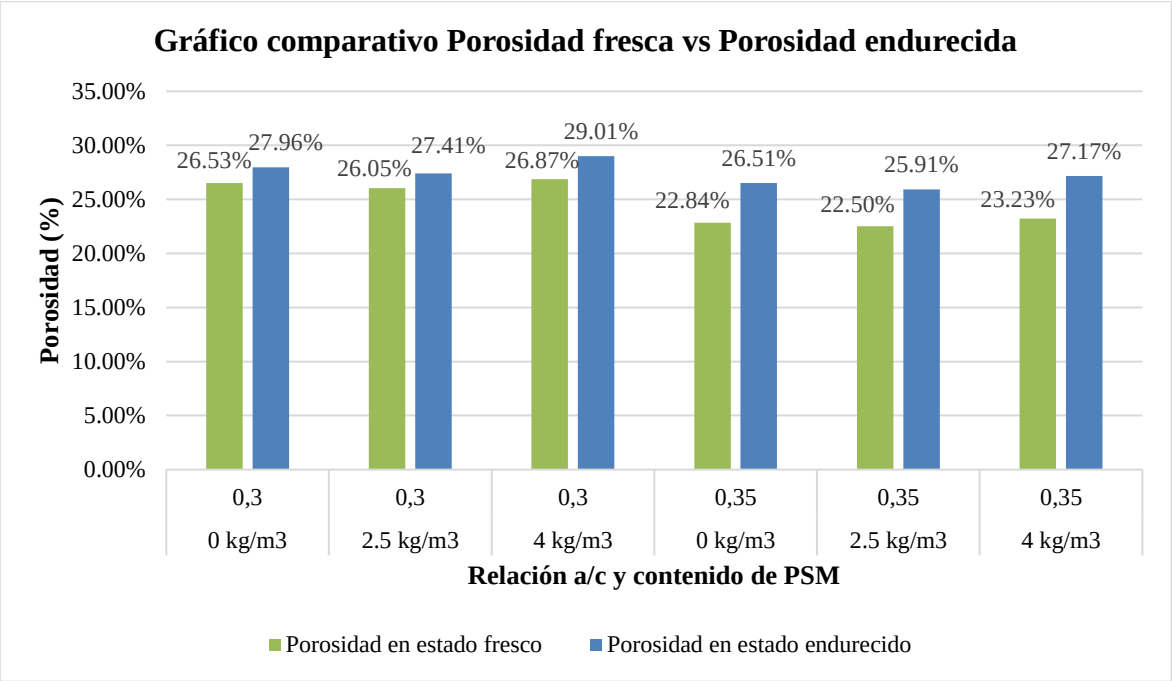


Fig. 28. Gráfico comparativo Porosidad fresca vs Porosidad endurecida.

En función del análisis realizado, se constata que los resultados para densidad y porosidad en estado fresco y endurecido se encuentran dentro de los valores típicos propuestos de acuerdo a la TABLA XI.

TABLA XI
RANGOS TÍPICOS DE DENSIDAD Y POROSIDAD

	Densidad fresca (kg/m^3)	**Densidad endurecida (kg/m^3)**	**Porosidad (%)**	**Referencia**
ACI 522-23	1990 - 2130		15-35	[1]
ASTM 1688	1750 - 2000			[80]
Tennis *et al.*		1600-2000	15-25	[98]
IRC:44-2017			15-35	[99]

3) Permeabilidad-conductividad hidráulica

La TABLA XII, presenta un resumen de los resultados obtenidos de permeabilidad. El detalle de los cálculos se encuentra en el Anexo 12.

TABLA XII
PERMEABILIDAD - CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Permeabilidad - Conductividad hidráulica (cm/s)						
Relación agua/cemento	0.30			0.35		
Contenido de Fibras (kg/m^3)	0	2.5	4	0	2.5	4
Permeabilidad promedio (cm/s)	0.462	0.400	0.542	0.372	0.335	0.411

Como se puede evidenciar en la Fig. 29 , la permeabilidad disminuye en un 13.42% al añadir 2.5 kg/m^3 de PSM para luego aumentar en 17.31% respecto la muestra control al incorporar 4.5 kg/m^3 de PSM. De forma similar ocurre con la relación a/c de 0.35, en donde la permeabilidad presenta una reducción del 9.82% al adicionar 2.5 kg/m^3 de PSM y luego se incrementa en un 10.59% respecto la muestra control al adicionar 4 4.5 kg/m^3 de PSM.

Adicionalmente, se muestra que al aumentar la relación a/c de 0.30 a 0.35, la permeabilidad se ve reducida en un 19.54%, 16.19% y 24.15% cuando se adicionan 0.00 , 2.50 y 4.00 kg/m^3 de PSM. Esta reducción está fundamentada en que al incrementarse la relación a/c, se aumenta la cantidad de pasta y por ende afecta la estructura de poros los cuales tienden a reducirse u obstruirse, disminuyendo así la permeabilidad. Este patrón es equivalente a los resultados reportados en [8], [19], [25], [74], [96], [100].

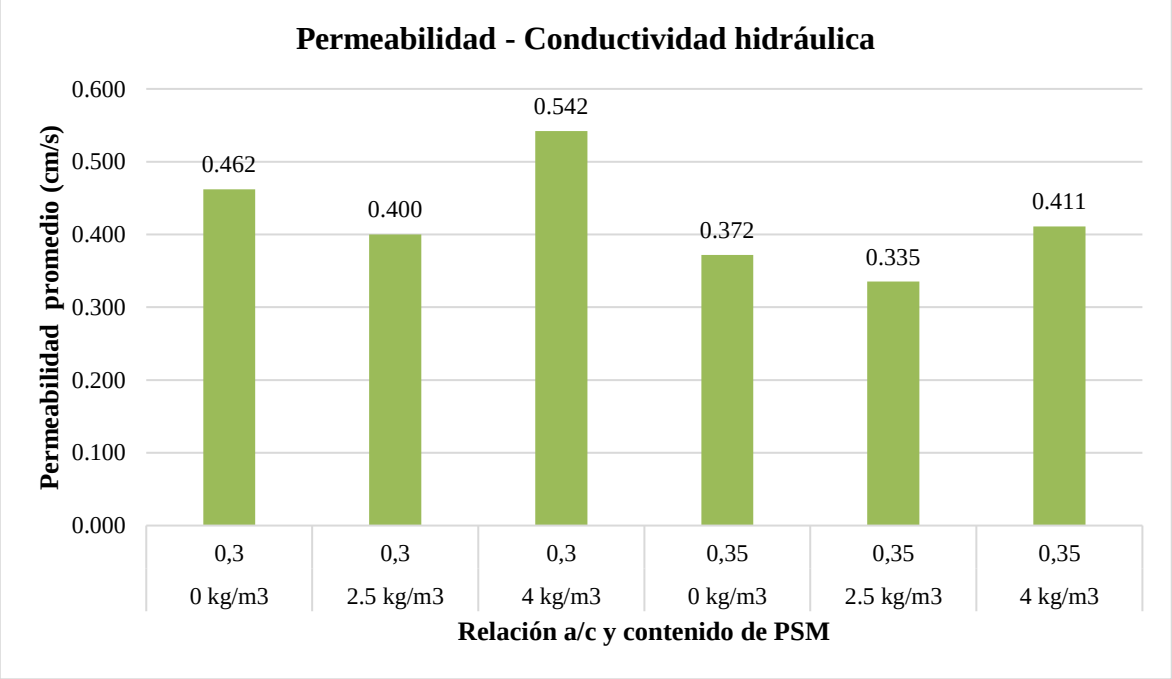


Fig. 29. Permeabilidad promedio.

Por otra parte, se ha observado que la permeabilidad guarda una relación entre la densidad y porosidad. En la Fig. 30 y Fig. 31 se evidencia que la permeabilidad aumenta a medida que la densidad disminuye y la porosidad Aumenta. Este comportamiento es consistente con lo reportado en [9], [15], [96].

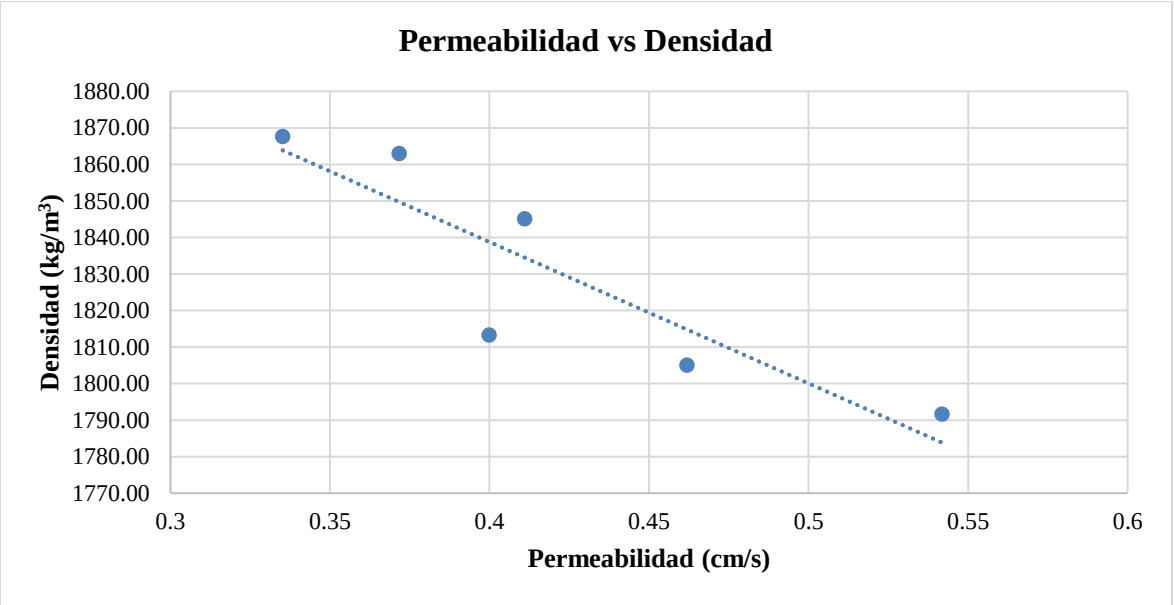


Fig. 30. Relación entre la permeabilidad y densidad.

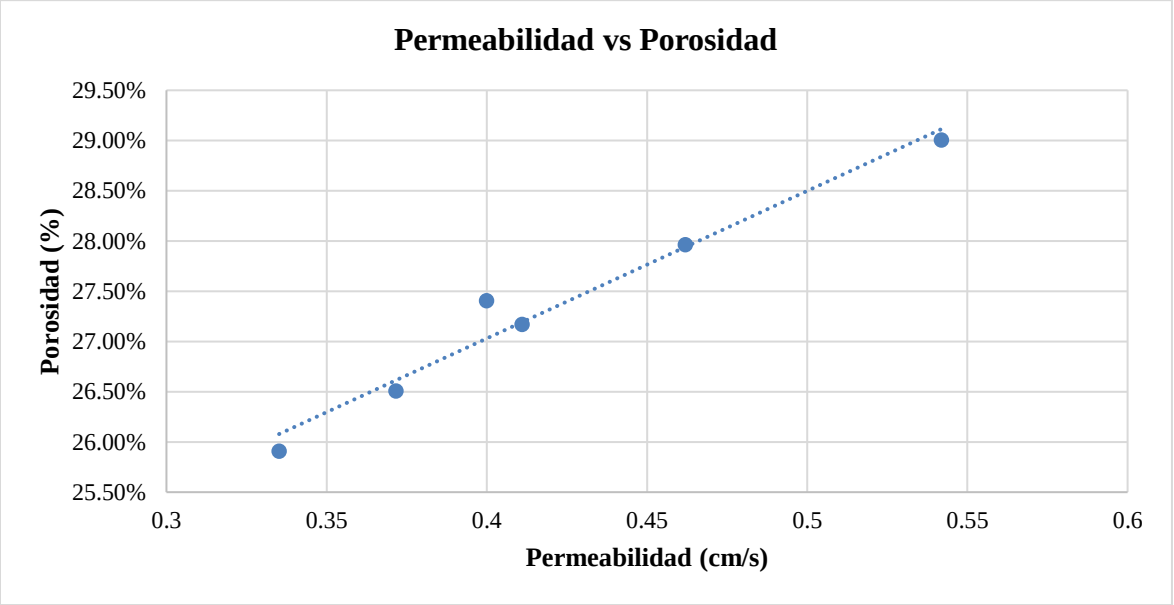


Fig. 31. Relación entre la permeabilidad y porosidad.

A partir del análisis realizado, se determinó que la permeabilidad en todas las proporciones de mezcla se encuentra según las especificaciones dadas en la TABLA XII, siendo así que cumplen con los valores estándares propuestos.

TABLA XIII
RANGOS TÍPICOS DE PERMEABILIDAD

	Permeabilidad (cm/s)	**Referencia**
ACI 522-23	0.17 - 1.20	[1]
IRC:44-2017	0.13 – 1.22	[99]

C. TERCERA FASE

Finalmente, se determinaron las propiedades mecánicas del hormigón permeable, incluyendo la resistencia a compresión y corte puro. Para determinar la resistencia a compresión, se ensayaron 54 probetas cilíndricas, mientras que, para la resistencia a corte puro, se tomaron en cuenta 18 probetas prismáticas.

1) Resistencia a compresión

En la Tabla XIV se presenta un resumen de la resistencia a compresión promedio para cada dosificación de mezcla. El procesamiento de información a partir de los datos obtenidos de la máquina de compresión se encuentra en el Anexo 13.

TABLA XIV
RESULTADOS RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Resistencia a compresión f'c (28 días)						
Relación agua/cemento	0.3			0.35		
Contenido de Fibras (kg/m^3)	0	2.5	4	0	2.5	4
Esfuerzo máximo promedio (MPa)	8.60	9.14	8.33	11.23	11.72	10.78

En la Fig. 32, se muestra una gráfica comparativa de la resistencia a compresión. Se evidencia que cuando la relación a/c es de 0.30, la resistencia aumenta en 6.30% cuando se agregan 2.50 kg/m^3 de PSM; sin embargo, cuando la mezcla contiene 4.00 kg/m^3 de PSM, la resistencia disminuye 3.12% en relación con la muestra control. Del mismo modo ocurre para una relación a/c de 0.35, en donde se incrementa la resistencia en un 4.40% al agregar 2.50 kg/m^3 de PSM, y posteriormente presenta una reducción respecto a la muestra control del 4.04% cuando se añaden 4.00 kg/m^3 de PSM.

Adicionalmente, se observa que cuando la relación a/c varía de 0.30 a 0.35, la resistencia a compresión mejoró en un 30.61%, 28.28% y 29.38% para proporciones de mezcla con 0.00, 2.50 y 4.00 kg/m^3 de PSM.

Mediante este análisis se determinó que el valor máximo de la resistencia a compresión del hormigón permeable fue de 11.72 MPa y se obtuvo cuando la relación a/c fue de 0.35 con adición de 2.5 kg/m^3 de PSM.

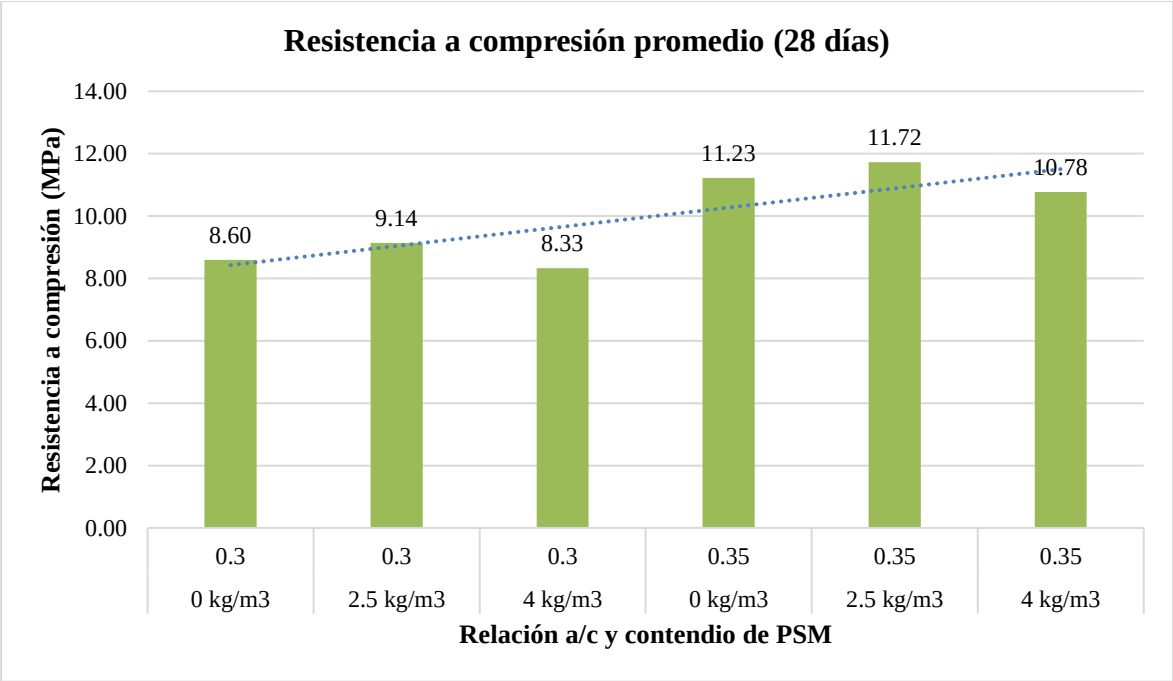


Fig. 32. Resistencia a compresión promedio.

Es así que, los resultados se sitúan dentro de los rangos establecidos por las siguientes especificaciones:

TABLA XV
RANGOS TÍPICOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

	Resistencia a compresión (MPa)	**Referencia**
ACI 522-23	2.8 – 28	[1]
IRC:44-2017	5 - 25	[99]

A su vez, según la investigación realizada por Ibrahim *et al.* [64], emplearon distintas dosificaciones de mezcla con agregado de 1/2", obteniendo resistencias a compresión de 2.43 MPa y 3.22 MPa para una relación a/c de 0.30 y 0.35 respectivamente. Es claro que estos resultados están muy por debajo de los obtenidos por este estudio, sin embargo, puede atribuirse a que la cantidad de cemento utilizado fue de 200 kg/m^3; estando por debajo de los valores recomendados. Por otra parte, de acuerdo con los resultados obtenidos por Joung y Grasley [101], la resistencia a compresión se situó entre 3.5 y 10.5 MPa al utilizar agregados de 1/2", con una relación a/c de 0.30 y un contenido de cemento que osciló entre 189.5 y 357.8 kg/m^3. En términos generales, un aumento de la relación a/c, genera mayores resistencias a compresión. Esto ocurre debido al incremento de la pasta de cemento, lo que mejora la capacidad de unión entre los agregados potenciando su resistencia a compresión. Este fenómeno ha sido reportado de forma similar en [25], [96].

Adicionalmente, diversas investigaciones abordan la influencia de varios tipos de fibras sobre la resistencia a compresión. Según Aliabdo *et al*. [102], determinaron que el uso de fibras de polipropileno disminuye ligeramente la resistencia a compresión, pero tiene un efecto positivo en la resistencia a tracción. Del mismo modo, Zhu *et al.* [25], identificaron que cuando se excede el contenido de fibra gruesa de polipropileno, existe una dispersión inadecuada, de modo que la interfaz entre la pasta de cemento, los agregados y las fibras es débil, afectando la capacidad resistente del hormigón. Así mismo, Wu, *et al*. [26] evaluaron la resistencia a compresión en muestras con distintas cantidades de fibras de polipropileno (0.00, 3.00, 6.00 y 9.00 kg/m^3). A pesar de que el tipo de fibra de polipropileno tenía características físicas diferentes, el comportamiento resultó comparable dado que la resistencia a compresión aumentó a medida que se incrementaba la cantidad de fibra hasta 6 kg/m^3 y posteriormente se redujo. De igual manera, Wu, *et al.* [103], determinaron que la resistencia a compresión aumenta al adicionar fibras de basalto en 2.00 y 4.00 kg/m^3; sin embargo, cuando la cantidad de fibra se incrementa a 6.00 y 8.00 kg/m^3, la resistencia se reduce.

Para complementar el análisis realizado, en la Fig. 33 se muestran los modos de falla correspondientes a las dosificaciones con una relación a/c de 0.30 y 0.35 (Sin adición de PSM). Se observa que, al alcanzar la carga máxima, se produce una ruptura entre la pasta de cemento y los agregados , lugar en el cual ocurre una concentración de esfuerzos. Esto provoca que gran parte de los agregados se desprendan fácilmente de la estructura del hormigón permeable. Una conducta similar se presenta en el estudio realizado por Wu *et al.* [26], en donde las muestras elaboradas sin fibras se destruyeron casi por completo, produciéndose una perdida significativa de agregados. Del mismo modo, según Sangthongtong *et al* [104], mencionan que los modos de falla son repentinos y los agregados se desprenden con un sonido leve cerca a la carga última.

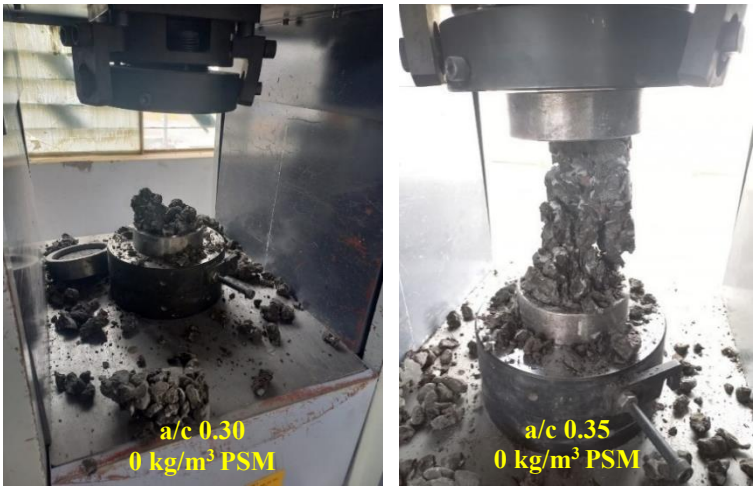


Fig. 33. Modos de falla típico (Muestras sin adición de PSM).

Por el contrario, en la Fig. 34, se muestran los modos de falla para una relación a/c de 0.30 y 0.35 al agregar 2.5 kg/m^3 y 4.0 kg/m^3 de PSM. De manera general, la fibra tiende a aumentar la cohesión entre la pasta de cemento y los agregados, siendo así que las muestras conservan la integridad luego de alcanzar su carga máxima, aunque algunos agregados suelen desprenderse de las esquinas. A pesar de ello, se debe tener mucho cuidado, debido a que un exceso de fibra puede resultar perjudicial y comprometer la resistencia del hormigón permeable.

Independientemente del tipo de fibra utilizado, diversas investigaciones muestran un comportamiento similar. De acuerdo con Wu et al. [105], al utilizar fibras de acero y basalto se fortalece la conexión entre los agregados mejorando la uniformidad de los esfuerzos para mantener la integridad de las muestras, siendo así que las fibras aún pueden soportar cierta carga luego del agrietamiento de la interfaz entre la pasta de cemento y los agregados. De igual forma, Wu et al. [103], apreciaron que, al integrar fibras de basalto, se produjeron pequeñas grietas y desprendimiento en las esquinas de la muestra, sin embargo, la integridad del concreto se mantuvo bien.

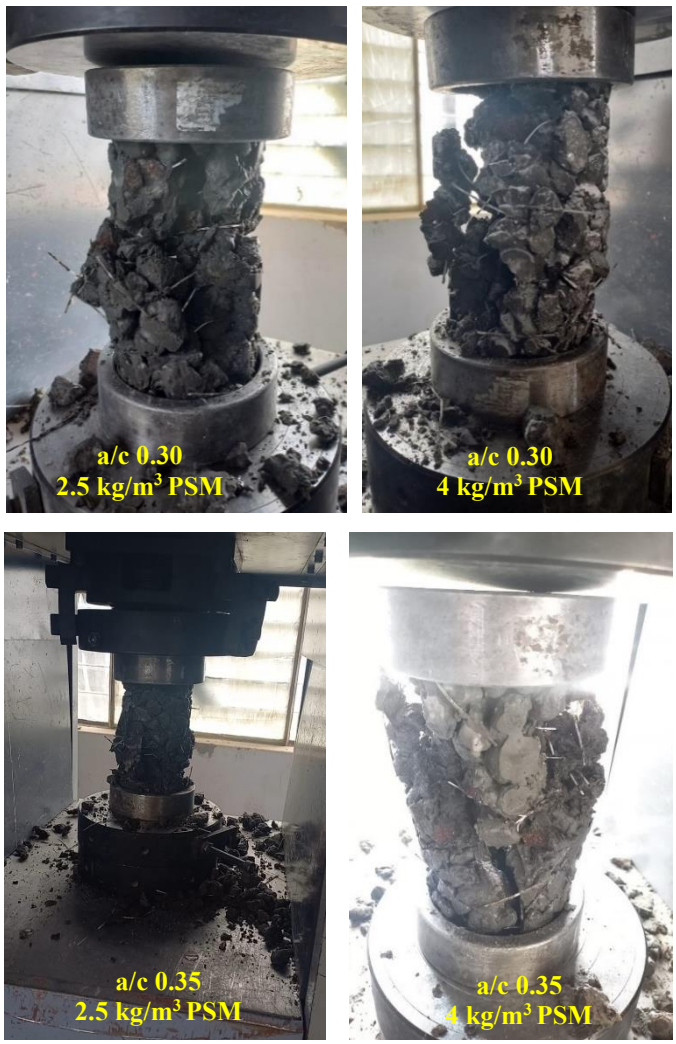


Fig. 34. Modos de falla típicos (Muestras con adición de PSM).

Por último, cabe mencionar que existe una discrepancia entre los criterios adoptados para el diseño de mezclas de hormigón permeable y hormigón convencional. La principal diferencia radica en las consideraciones de resistencia y durabilidad. En el caso del hormigón convencional, una baja relación a/c genera mayores resistencias a compresión y menor permeabilidad [91], [106]. Sin embargo, en el hormigón permeable, esta misma condición, resulta en bajas resistencias y altos valores de permeabilidad. Por otro lado, cuando la relación a/c aumenta, la resistencia a compresión del hormigón convencionales disminuye [91], [106], mientras que, en el hormigón permeable ocurre lo contrario debido a que las mayores resistencias se alcanzan cuando la relación a/c se incrementa. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta estas consideraciones al momento de diseñar y predecir las propiedades del hormigón permeable.

2) Resistencia a corte puro

a) Configuración de la viga

La Fig. 35, Fig. 36 y Fig. 37, muestra el tipo de falla encontrada luego de ensayar a corte puro las tres configuraciones de prueba.

En la Fig. 35, se evidencia que fractura se localizó en el tercio superior de la muestra, siendo una falla provocada por flexión en los volados. Por su parte, en la Fig. 36, se aprecia que la falla se produjo en las caras laterales de la muestra como resultado de esfuerzos de tracción inducidos por flexión. Adicionalmente, se identificó un desprendimiento parcial de la capa de mortero que recubre la superficie del hormigón permeable, lo cual limitó la efectividad de la fibra de vidrio adherida a dicha capa. Este tipo de fallas fueron predichas en [37], [38], [45], [47], [48], por lo que se descartó el uso de la probeta prismática N°1 y N°2.

En cambio, en la Fig. 37, se identificó que la fractura se focalizó en el plano de corte. Por tanto, se seleccionó la configuración de la probeta prismática N°3 como modelo definitivo para el análisis de resistencia corte puro a partir de las variables propuestas.



Fig. 35. Modo de falla - Probeta prismática N°1.

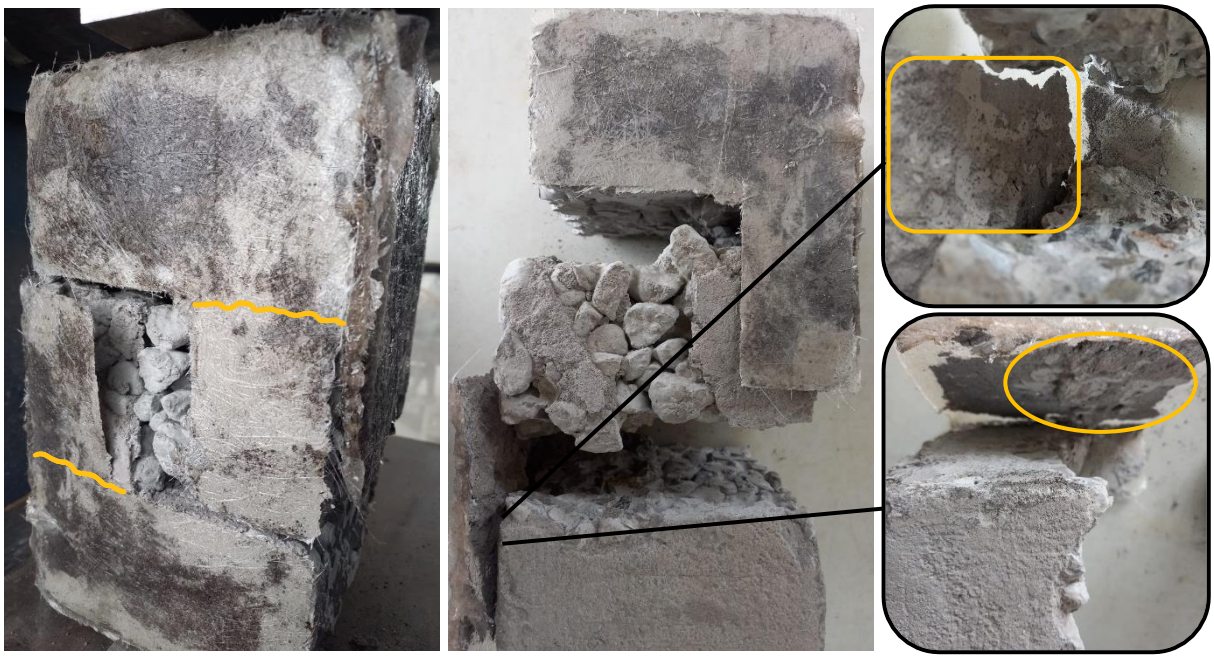


Fig. 36. Modo de falla - Probeta prismática N°2.

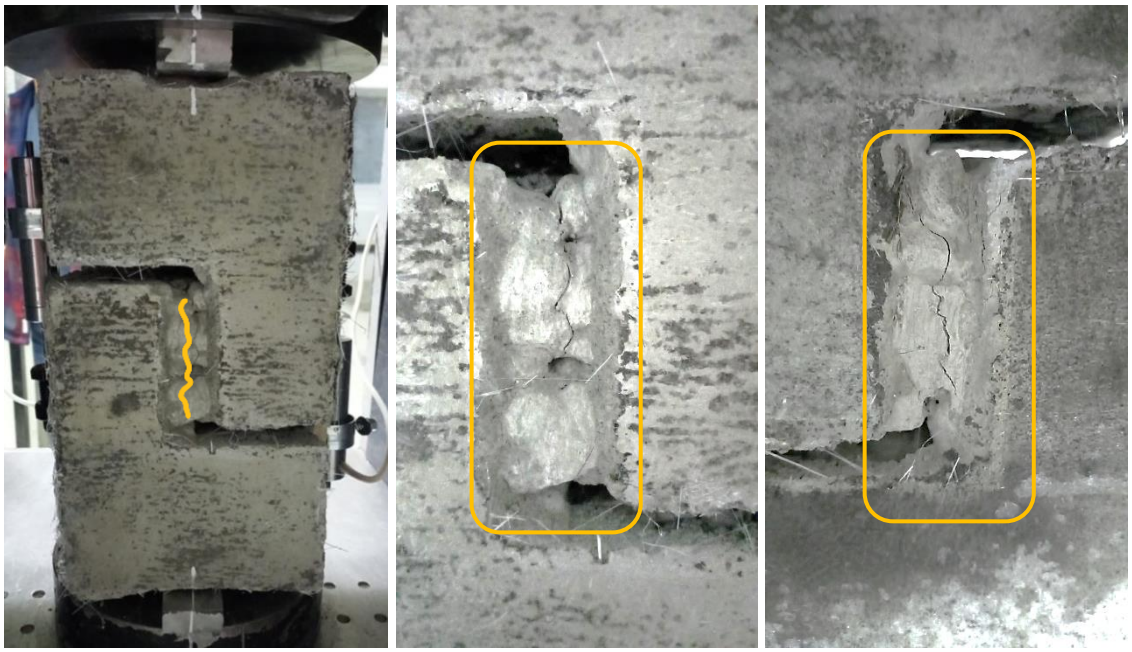


Fig. 37. Modo de falla - Probeta prismática N°3.

b) Análisis de la resistencia a corte puro

Se identificó que todas las probetas presentaron fallas dominadas por corte a lo largo del plano especificado como se muestra en la Fig. 38. Estas fallas se localizaron entre las puntas de las entalladuras, confirmando la ocurrencia de un mecanismo de falla por corte.



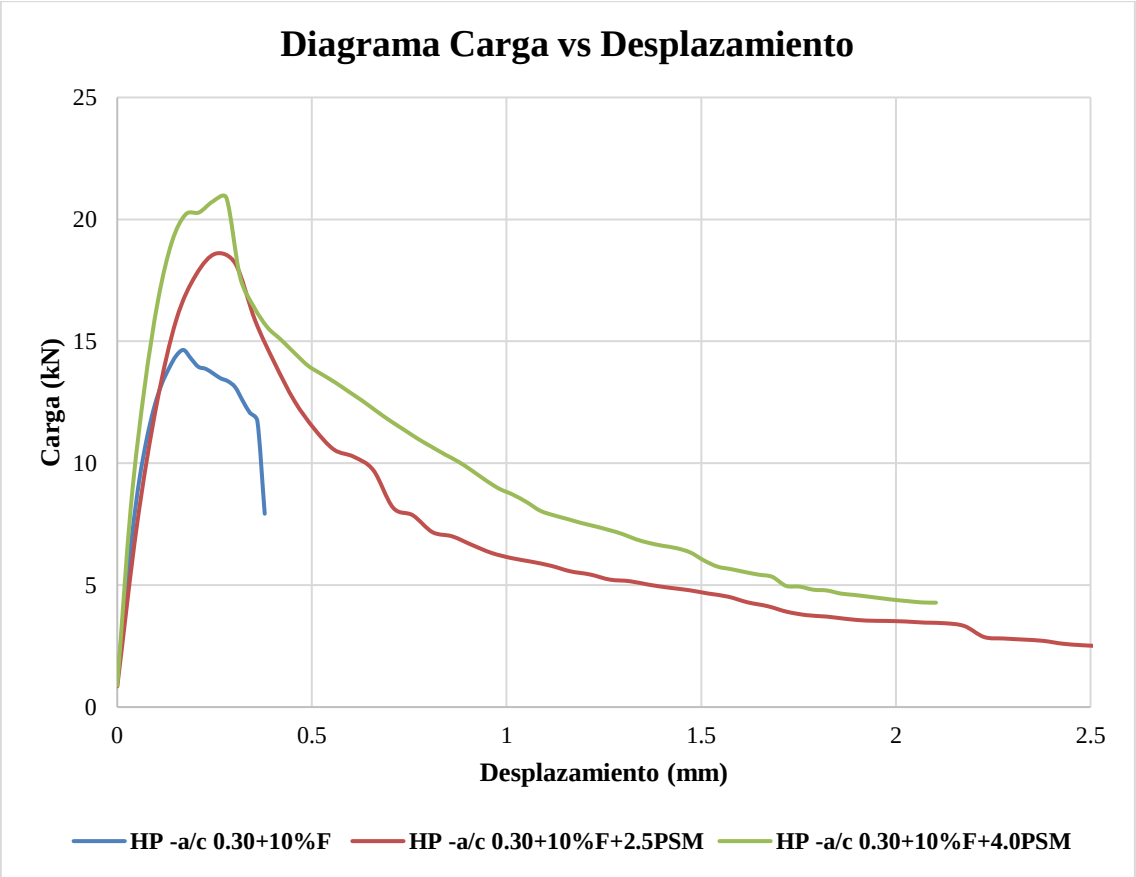


Fig. 38. Mecanismos de fractura.

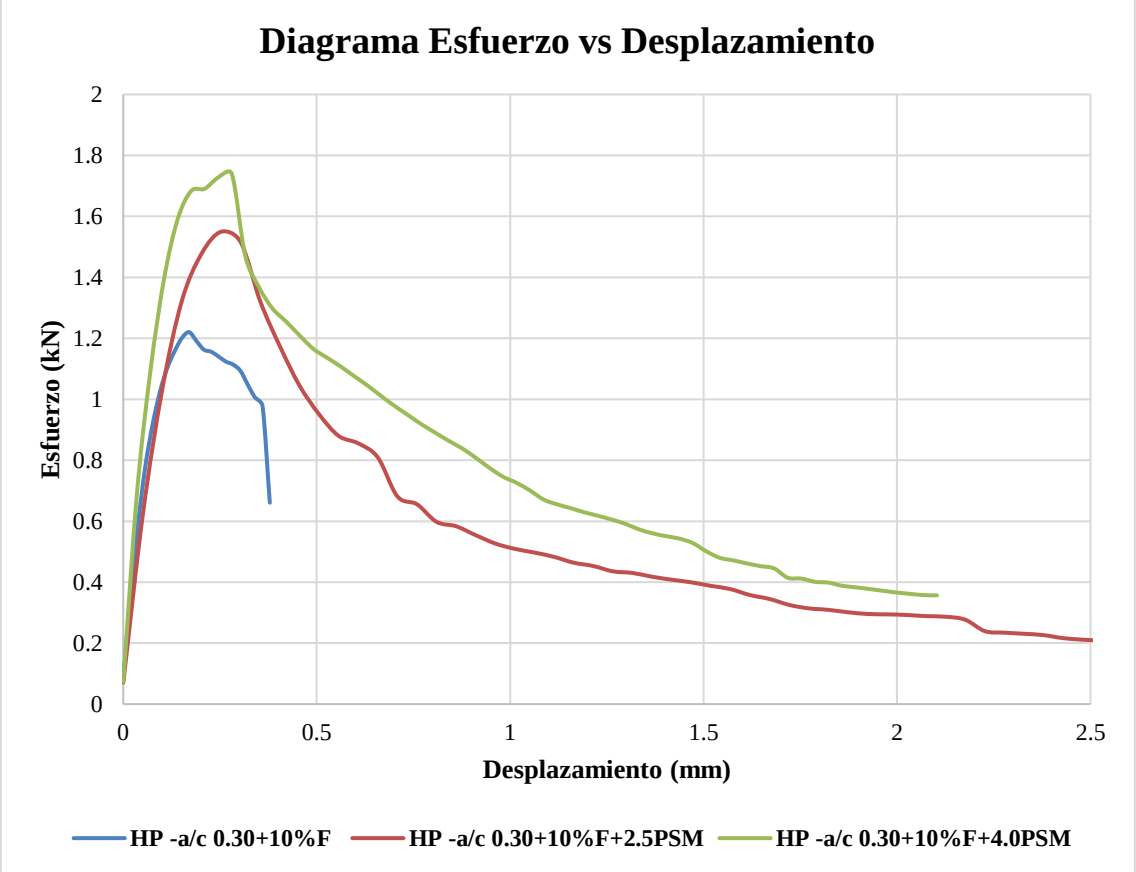
Una vez culminado el ensayo, se registraron los valores de carga y desplazamiento, lo cual permitió generar diagramas “Carga vs Desplazamiento” y “Esfuerzo vs Desplazamiento”.

El En el Anexo 14, se encuentran las curvas generadas a partir de todas las probetas ensayadas. Posteriormente se elaboró una curva promedio para representar el comportamiento de cada dosificación. No obstante, en las dosificaciones “HP -a/c 0.30+10%F” y “HP -a/c 0.35+10%F”, se descartó el uso de una de sus curvas debido a que mostraba un comportamiento totalmente diferente, lo cual podría introducir una variación excesiva en los resultados.

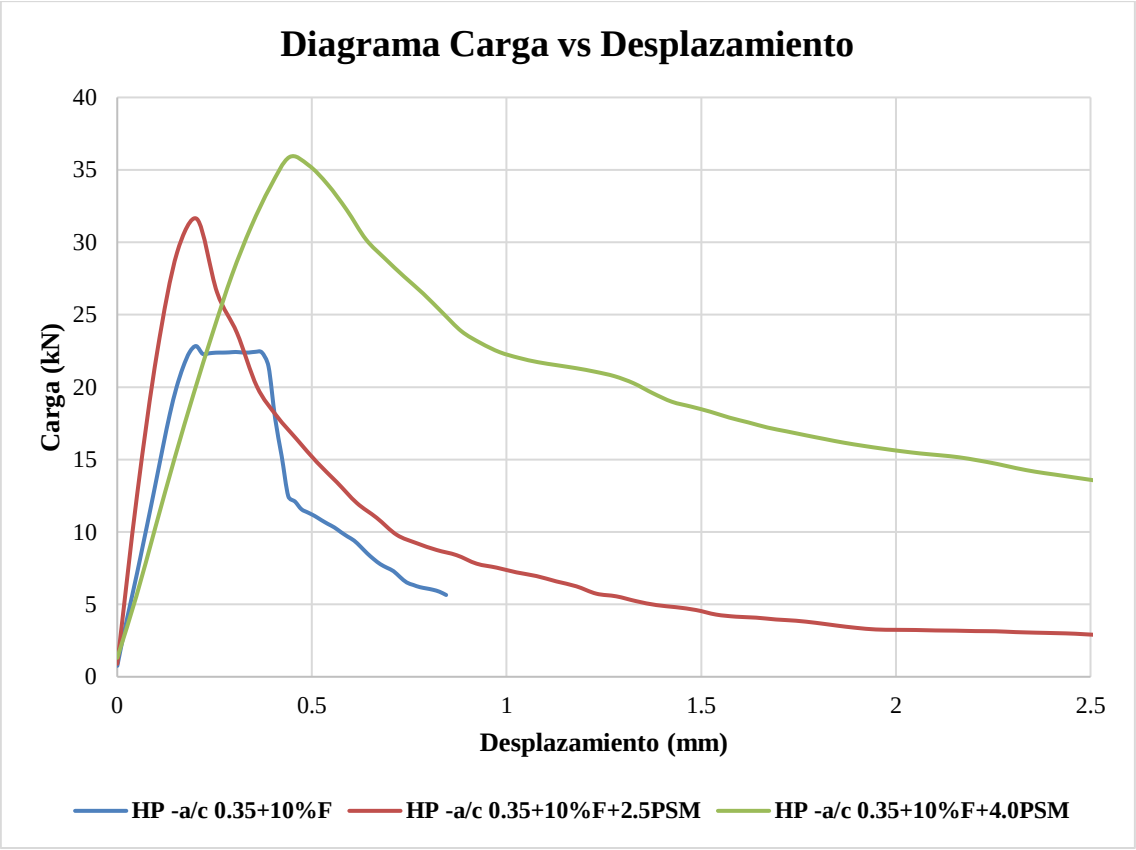
En la Fig. 39 se muestran las curvas promedio de “Carga vs Desplazamiento” y “Esfuerzo vs Desplazamiento” de las probetas correspondientes a las relaciones a/c de 0.30 y 0.35 y diferentes adiciones de PSM.


Diagrama Carga vs Desplazamiento
Carga (kN)
25
20
15
10
5
0
0
0.5
1
1.5
2
2.5
Desplazamiento (mm)
HP -a/c 0.30+10%F
HP -a/c 0.30+10%F+2.5PSM
HP -a/c 0.30+10%F+4.0PSM

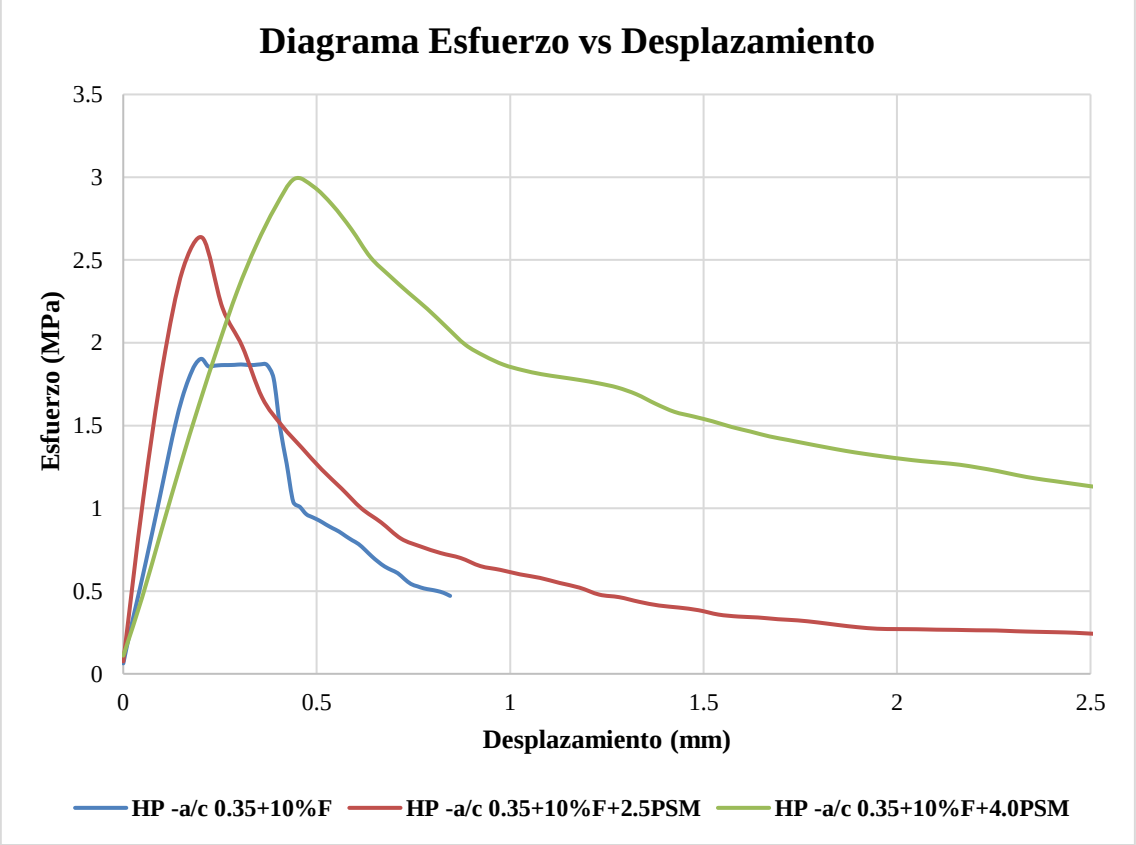
a)


Diagrama Esfuerzo vs Desplazamiento
Esfuerzo (kN)
2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
0.5
1
1.5
2
2.5
Desplazamiento (mm)
HP -a/c 0.30+10%F
HP -a/c 0.30+10%F+2.5PSM
HP -a/c 0.30+10%F+4.0PSM

b)



c)



d)

Fig. 39. Diagramas de curvas: a) Carga vs Desplazamiento – a/c 0.30. b) Esfuerzo vs Desplazamiento – a/c 0.30. c) Carga vs Desplazamiento – a/c 0.35. d) Esfuerzo vs Desplazamiento – a/c 0.35.

En base a las curvas obtenidas, se identificó la carga máxima promedio, el esfuerzo máximo promedio y el número de fibras encontradas en la superficie de falla para cada dosificación de mezcla. En la TABLA XVI se evidencian los datos registrados y los cálculos correspondientes se encuentran en el Anexo 15.

TABLA XVI
RESULTADOS RESISTENCIA A CORTE PURO

Resistencia a corte puro (28 días)						
Relación agua/cemento	0.3			0.35		
Contenido de Fibras (kg/m^3)	0	2.5	4	0	2.5	4
Carga máxima promedio (kN)	14.64	18.60	20.88	22.83	31.60	35.88
Esfuerzo máximo promedio (MPa)	1.22	1.550	1.74	1.90	2.63	2.99
N° de fibras (uds.)	0.00	17.00	24.00	0.00	18.00	23.00

La Fig. 40 muestra un gráfico comparativo entre los valores obtenidos. Se evidencia que cuando la relación a/c es de 0.30 la resistencia a corte aumenta en un 26.99% y 42.60% al añadir 2.50 y 4.00 kg/m^3 de PSM en comparación con la muestra control. Por otra parte, cuando la relación a/c es de 0.35, la resistencia a corte muestra un incremento del 38.39% y 57.15% al adicionar 2.50 y 4.00 kg/m^3 de PSM frente a la muestra control. Adicionalmente, se observó que al variar la relación a/c de 0.30 a 0.35, la resistencia a corte presentó un crecimiento equivalente al 55.92%, 69.92% y 71.83% para proporciones de mezcla con 0.00, 2.50 y 4.00 kg/m^3 de PSM.

En base al análisis realizado, se determinó que el valor máximo de resistencia a corte del hormigón permeable fue de 2.99 MPa, y se obtuvo cuando la relación a/c fue de 0.35 con 4 kg/m^3 de PSM.

Esto demuestra que, la incorporación gradual de PSM incrementa la resistencia a corte. Pese a ello, los hallazgos demostraron que el uso de 4.0 kg/m^3 de PSM resultó en un crecimiento menor en comparación con la dosificación de 2.5 kg/m^3. La explicación detrás de este comportamiento radica en que 4.0 kg/m^3 de PSM podría generar una mala distribución de las fibras, tal y como sucedió con lo registrado en la resistencia a compresión, en donde al incorporar esta proporción de fibras, se registró una disminución del 3 al 4% con respecto a la muestra control, indicando que una cantidad excesiva de fibras puede afectar negativamente sobre esta propiedad. Por consiguiente, se ha constatado que con un contenido de fibras de 2.5 kg/m^3, la dosificación se ajustó de forma equilibrada, de tal manera que se maximizó la resistencia a corte sin comprometer significativamente la resistencia a compresión.

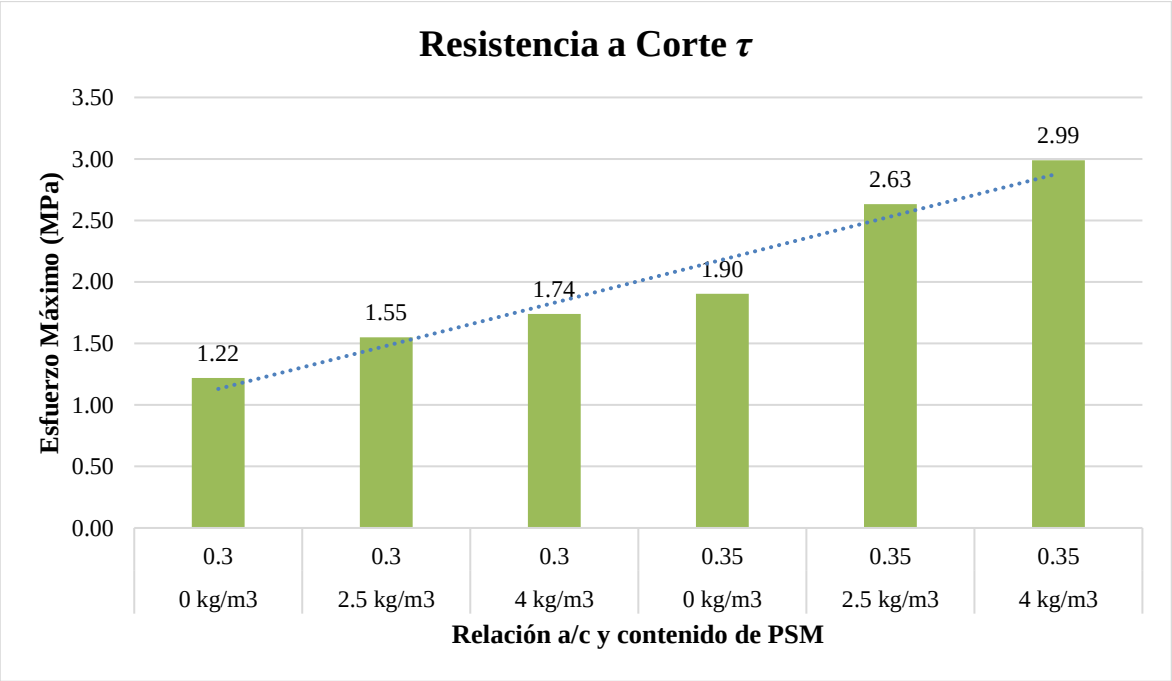


Fig. 40. Resistencia a corte puro promedio.

De manera adicional, en la Fig. 41 se demostró que la cantidad de fibras que atraviesan el plano de falla está directamente relacionada con la fracción volumétrica considerada en el diseño de la mezcla. Este comportamiento confirma que la incorporación de PSM contribuye de manera significativa a mejorar la resistencia al corte del material.

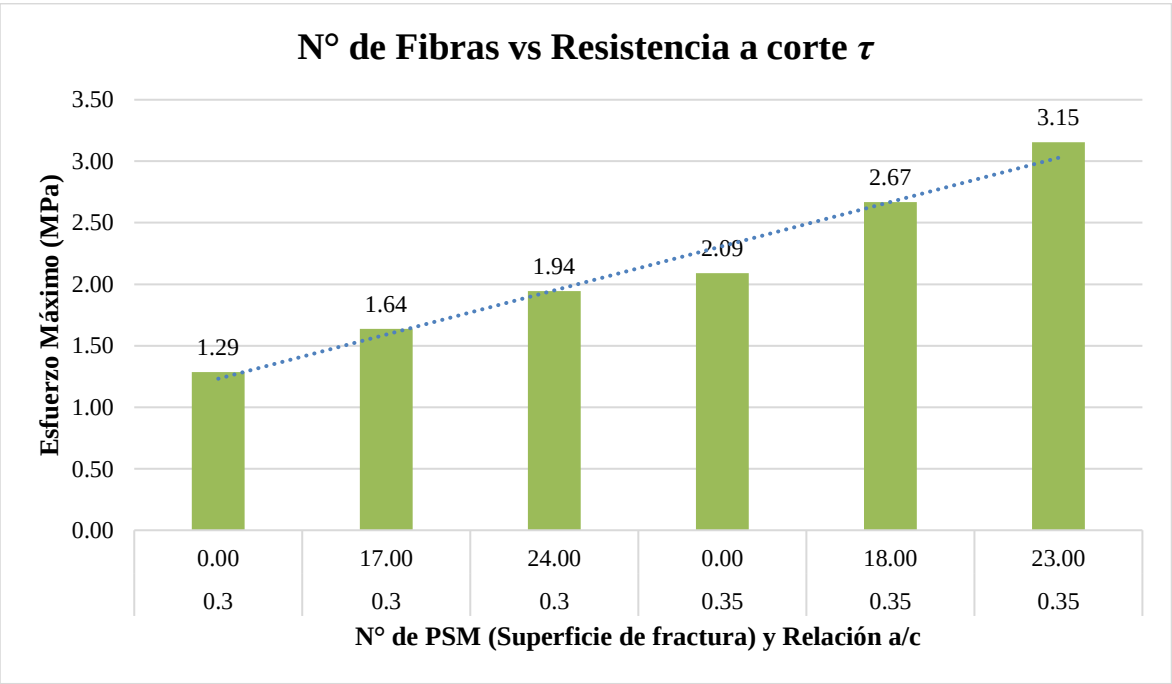


Fig. 41. N° de PSM en la superficie de falla vs Esfuerzo máximo promedio.

Se ha propuesto comparar los valores obtenidos experimentalmente con los resultados teóricos al calcular la resistencia a corte de acuerdo con la normativa ACI 318-18 [81] para

hormigones convencionales (Ec. 22.5.5.1). Según lo mencionado, la resistencia a corte depende principalmente de la resistencia a compresión, por lo que en la TABLA XVII, se proporcionan los resultados experimentales y teóricos considerando el f'c del hormigón permeable.

La resistencia a corte estimada experimentalmente se encuentra entre el 14 y el 28% de la resistencia a compresión, en tanto que. la resistencia a corte calculada teóricamente está en el rango de 5 a 6%. Esto demuestra que el cálculo de la resistencia a corte mediante la formulación del el ACI 318-18 mantiene un margen de seguridad bastante conservador, por lo que se podría aplicar para estimar una aproximación.

Considerando este análisis, se puede inferir que la resistencia del hormigón permeable frente a esfuerzos cortantes es superior en comparación con la respuesta observada en hormigones convencionales. Este comportamiento podría atribuirse a un mayor grado de engranamiento entre los agregados, derivado de la elevada proporción de agregados gruesos en el hormigón permeable. De acuerdo con [107], el entrelazamiento de los agregados, o fricción por corte en las grietas, tienen una contribución significativa en la capacidad a corte el concreto, por lo que este aumento en la resistencia a corte también puede estar influenciado por la composición granular del material.

TABLA XVII
RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A CORTE EXPERIMENTAL Y CALCULADA

Identificación	Resistencia a Compresión (f'c)	Especímenes Push-Off		ACI 318-19		
		Resistencia a corte (τexp.)	% f'c	Resistencia a corte (τcal.)	% f'c	Factor de seguridad
HP -a/c 0.30+10%F	8.60	1.22	14.2%	0.50	5.8%	2.4
HP -a/c 0.30+10%F+2.5PSM	9.14	1.55	17.0%	0.51	5.6%	3.0
HP -a/c 0.30+10%F+4.0PSM	8.33	1.74	20.9%	0.49	5.9%	3.5
HP -a/c 0.35+10%F	11.23	1.90	16.9%	0.57	5.1%	3.3
HP -a/c 0.35+10%F+2.5PSM	11.72	2.63	22.5%	0.58	5.0%	4.5
HP -a/c 0.35+10%F+4.0PSM	10.78	2.99	27.7%	0.56	5.2%	5.4

Por otro lado, las gráficas reflejan que las probetas fallaron en dos etapas sucesivas. En primer lugar, se registró una tendencia lineal hasta la carga máxima, que se manifestó tras la aparición de la primera grieta visible. El valor máximo de carga y esfuerzo se desarrolló a un deslizamiento comprendido entre 0.17 y 0.44 mm. Como segundo punto, se evaluó el comportamiento posterior al pico de las muestras simples y reforzadas con PSM.

En las muestras control, luego de alcanzar la resistencia máxima, se registró una disminución de la carga lo cual evidencia que el espécimen habido fallado. Por otra parte, en las muestras que contenían 2.5 kg/m^3 y 4.0 kg/m^3 de PSM, se evidenció que tras alcanzar la resistencia máxima y luego de localizar los primeros agrietamientos, se detectó un ablandamiento en la

curva, lo cual indica que la carga disminuye a una tasa menor, acompañada de mayores desplazamientos. Estos esfuerzos residuales se generaron gracias a la contribución de las fibras mediante la resistencia a la extracción y su acción pasador, que reduce la formación y extensión de las grietas [33], [52]. En la TABLA XVIII, se presentan los esfuerzos residuales calculados a desplazamientos de 1 mm, 1.5 mm y 2 mm. Los esfuerzos residuales alcanzaron hasta el 60%, 50% y 40% del esfuerzo máximo para un desplazamiento de 1.0mm, 1.5mm y 2.0mm respectivamente. En base a ello, se determinó que a medida que se incrementa la cantidad de PSM, los esfuerzos residuales registran un incremento proporcional.

TABLA XVIII
ESFUERZOS RESIDUALES

Identificación	**Esfuerzo (MPa)**	**Esfuerzos Residuales (MPa)**		
	Rotura	**1.0 mm**	**1.5 mm**	**2.0 mm**
HP -a/c 0.30+10%F	1.22	0.00	0.00	0.00
HP -a/c 0.30+10%F+2.5PSM	1.55	0.51	0.39	0.29
HP -a/c 0.30+10%F+4.0PSM	1.74	0.73	0.50	0.36
HP -a/c 0.35+10%F	1.90	0.00	0.00	0.00
HP -a/c 0.35+10%F+2.5PSM	2.63	0.60	0.36	0.27
HP -a/c 0.35+10%F+4.0PSM	2.99	1.83	1.53	1.30

Finalmente, en la TABLA XIX, se obtuvo el trabajo (W_f) representado como el área bajo la curva de los diagramas “Carga vs Desplazamiento “para un desplazamiento de 2 mm. En base a ello se determinó la energía de fractura (G_f).

TABLA XIX
TRABAJO Y ENERGÍA DE FRACTURA (2MM)

Identificación	**Trabajo (kN*mm)**	**Energía de fractura (N/m)**
HP -a/c 0.30+10%F	4.4814	373.45
HP -a/c 0.30+10%F+2.5PSM	15.7922	1316.02
HP -a/c 0.30+10%F+4.0PSM	19.8977	1658.14
HP -a/c 0.35+10%F	11.2089	934.08
HP -a/c 0.35+10%F+2.5PSM	20.3864	1698.87
HP -a/c 0.35+10%F+4.0PSM	43.7570	3646.42

En Fig. 42 se observa un gráfico comparativo que representa los datos de energía de fractura reportados donde se evidencia que la energía de fractura aumenta conforme se incrementa el contenido de fibras. En comparación con la muestra control, para una relación a/c de 0.30, la energía de fractura aumenta 3.5 veces al añadir 2.5 kg/m^3 de PSM y 4.5 veces con 4.00 kg/m^3 de PSM. De manera similar, con una relación a/c de 0.35, la energía de fractura es 1.8 veces

mayor al incluir 2.50 kg/m^3 de PSM y 3.9 veces al añadir 4.00 kg/m^3 de PSM. Estos resultados evidencian que la adición de PSM, ayudan a disipar una mayor cantidad de energía por unidad de área de fractura.

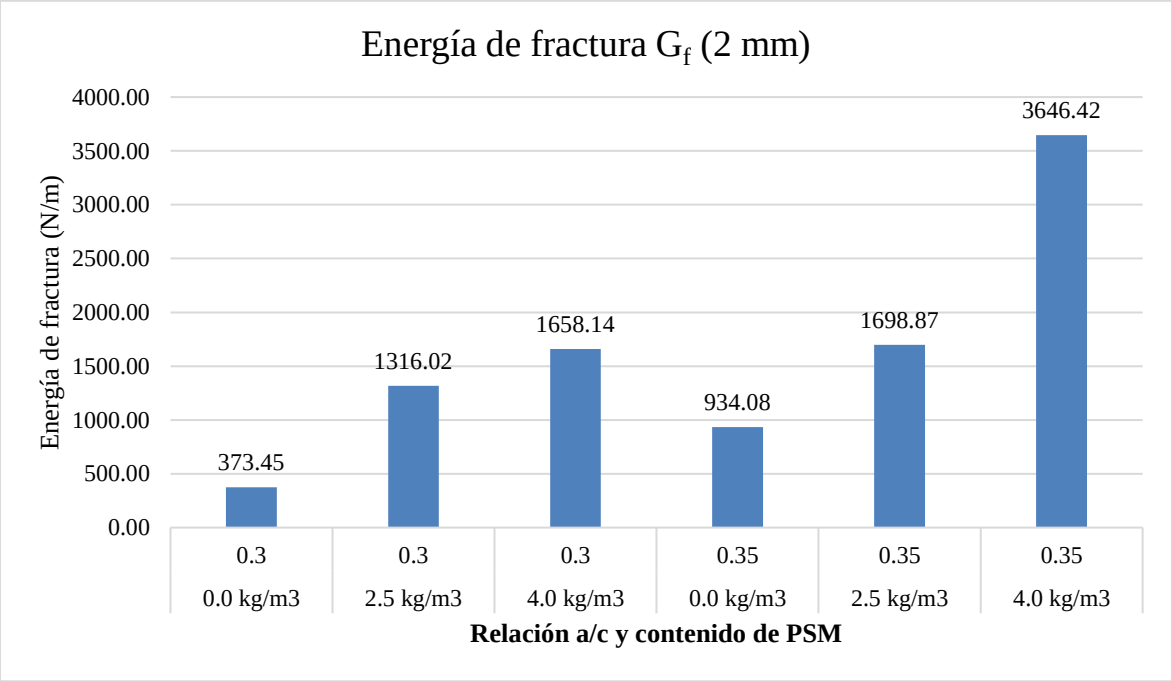


Fig. 42. Energía de fractura.

II. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS

A. HIPÓTESIS

La adición de fibras de polipropileno mejora las propiedades mecánicas de compresión y corte puro de probetas de hormigón permeable

B. VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Tras el análisis 54 probetas cilíndricas y 18 probetas prismáticas correspondientes a relaciones a/c de 0.30 y 0.35 con adiciones de 0.00, 2.50 y 4.00 kg/m^3 de PSM, se constató que: en comparación con muestra control, la incorporación de 2.50 kg/m^3 de PSM incrementó la resistencia a compresión en 6.30% y 4.40% para relaciones a/c de 0.30 y 0.35 respectivamente; sin embargo, al añadir 4.00 kg/m^3 de PSM, se evidenció una reducción de 3.12% y 4.04% para relaciones a/c de 0.30 y 0.35 respectivamente. Por otro lado, la resistencia a corte utilizando 2.50 kg/m^3 de PSM aumentó en un 26.99% y 38.39% para relaciones a/c de 0.30 y 0.35 correspondientemente. Asimismo, al adicionar 4.00 kg/m^3 de PSM se observó un crecimiento del 42.60% y 57.15% para relaciones a/c de 0.30 y 0.35 correspondientemente. Según el análisis realizado, es claro que, las fibras tienen mayor contribución en la resistencia a corte en comparación con la resistencia a compresión.

CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

I. CONCLUSIONES

- Se realizó dosificaciones de hormigón permeable siguiendo recomendaciones establecidas en el ACI PRC-522-23. Como resultado, se obtuvo una cantidad de cemento de 268.26 kg/m3 con una relación agregado:cemento de 4.76:1. El contenido de pasta fue de 16.93% para una relación a/c de 0.30 y 18.27% para una relación a/c de 0.35, evidenciándose un incremento del 1.34% . Estos valores aseguraron que el diseño se ajustara a los estándares establecidos.
- Un cambio en la relación a/c de 0.30 a 0.35, tuvo un impacto significativo en las propiedades físicas del hormigón permeable, generando variaciones aproximadas del 4% en los valores de densidad, 4% en la porosidad y 24% en la permeabilidad. Por otro lado, la incorporación de fibras en proporciones de 2.50 y 4.00 kg/m^3 tuvo un efecto menor, obteniendo variaciones aproximadas de 1% en los valores de densidad, 1% en porosidad y 17% en permeabilidad. Estos resultados evidenciaron que la relación a/c generó una mayor variación en las propiedades físicas del hormigón permeable, en comparación con la adición de fibras.
- La resistencia máxima a compresión fue de 11.72 MPa, obtenida con la dosificación “HP - a/c 0.35+10%F+2.5PSM”. Se observó que un cambio en la relación a/c de 0.30 a 0.35, influyó de manera significativa en la resistencia a compresión, generando una variación aproximada de 31%; mientras que, el contenido de fibras tuvo un impacto menor, con una variación de aproximadamente 6%.
- Se determinó la resistencia a corte mediante ensayos Push-Off / Empuje. La resistencia máxima fue de 2.99 MPa, alcanzada con la dosificación “HP -a/c 0.35+10%F+4.0PSM”. En este caso, el cambio de la relación a/c de 0.30 a 0.35 influyó en un aumento de hasta el 70% en la resistencia a corte, mientras que el contenido de fibras generó una variación menor, de aproximadamente 55%. Por tanto, la inclusión de fibras mejoró la capacidad de corte último en comparación con las muestras control.
- La resistencia a corte obtenida experimentalmente representó entre el 14 y el 28% de la resistencia a compresión, mientras que los valores teóricos calculados para hormigones convencionales en base al ACI 318-19, representaron entre el 5 y 6% de la resistencia a compresión. Estos resultados evidenciaron que la ecuación del ACI proporciona una estimación conservadora, la cual permite realizar aproximaciones rápidas de la resistencia a corte.

- La presencia de macrofibras de polipropileno aumentó la transferencia de corte residual, obteniéndose esfuerzos residuales de hasta %60%, 50% y 40% del esfuerzo máximo a un desplazamiento de 1.0mm, 1.5mm y 2.0mm respectivamente
- La energía de fractura mostró un aumento significativo, alcanzando valores que superan en 3.5 y 4.5 veces al de la muestra control con una adición de 2.50 y 4.00 kg/m^3 de PSM. Este incremento permite una mayor capacidad de disipación de energía del elemento ante fuerzas cortantes.

.

II. RECOMENDACIONES

- Respetar la relación a/c establecida en el diseño, controlando cuidadosamente la cantidad de agua utilizada. Para ello, es indispensable realizar las correcciones por humedad de los agregados , ya que se ha evidenciado que la relación a/c es el principal determinante de las propiedades físicas y mecánicas del hormigón permeable.
- Controlar la calidad de los agregados, asegurándose de que estén libres de sustancias perjudiciales para el hormigón, por lo que si es necesario deben ser lavados antes de su uso. Adicionalmente, se recomienda descartar el uso de ripio con caras redondeadas, ya que dificultan la correcta adhesión de la pasta.
- Realizar la colocación del hormigón permeable lo más rápido posible debido a que la pasta tiende a secarse rápidamente, lo que puede afectar en la adherencia entre los agregados.
- Implementar refuerzos en las probetas utilizadas para determinar la resistencia a corte mediante ensayos Push-Off/Empuje, ya que se evidencio que las muestras estuvieron afectadas por esfuerzos a flexión. Por tanto, se sugiere considerar las medidas de refuerzo propuestas en la presente investigación.
- Evaluar una relación a/c mayor en base a las recomendaciones de dosificación del ACI PRC-522-23 , con el objetivo de analizar su influencia en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón permeable, permitiendo así establecer comparaciones en torno a su comportamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ACI Committee 522, "Pervious Concrete—Report," 2023. [Online]. Available: www.concrete.org

[2] A. Setyawan, Suryoto, A. Sumarsono, and S. Widyastuti, "Open Graded Asphalt Mixture Design for Environmentally Friendly Road," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 176, no. 1, Mar. 2017, doi: 10.1088/1757-899X/176/1/012025.

[3] Francis A, "Early Concrete Buildings in Britain," *Concret and Constructional Engineering*, vol. 60, Feb. 1965.

[4] Malhotra, "No-Fines Concrete-Its Properties and Applications," *ACI Journal Proceedings*, vol. 73, Nov. 1976.

[5] Macintosh R, Bolton J, and Muir C, "No-Fines Concrete as a Structural Material," *The Institution of Civil Engineers* , vol. 5, 1956.

[6] N. Ghafoori and S. Dutta, "Building and nonpavement applications of no-fines concrete," *Journal of materials in civil engineering* , 1995.

[7] J. Sommerville, N. Craig, and A. Charles, "No-fines concrete in the UK social housing stock: 50 years on," *Structural Survey*, vol. 29, no. 4, pp. 294–302, Aug. 2011, doi: 10.1108/02630801111162369.

[8] M. Kováč and A. Sičáková, "Pervious concrete as an environmental solution for pavements: Focus on key Properties," *Environments - MDPI*, vol. 5, no. 1, pp. 3–9, Jan. 2018, doi: 10.3390/environments5010011.

[9] A. Sičáková and M. Kováč, "Relationships between functional properties of pervious concrete," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 16, Aug. 2020, doi: 10.3390/SU12166318.

[10] S. Dash and B. Kar, "Environment friendly pervious concrete for sustainable construction," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Sep. 2018. doi: 10.1088/1757-899X/410/1/012005.

[11] A. Singh, P. V. Sampath, and K. P. Biligiri, "A review of sustainable pervious concrete systems: Emphasis on clogging, material characterization, and environmental aspects," Nov. 20, 2020, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120491.

[12] V. C. Andres-Valeri, L. Juli-Gandara, D. Jato-Espino, and J. Rodriguez-Hernandez, "Characterization of the infiltration capacity of porous concrete pavements with low constant head permeability tests," *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 4, Apr. 2018, doi: 10.3390/w10040480.

[13] M. Marchioni, G. Becciu, and C. Oliveira, "Infiltration-Exfiltration System for Stormwater Control: A Full Scale Test," MDPI AG, Jan. 2020, p. 11. doi: 10.3390/ecws-4-06452.

[14] T. Fu, W. Yeih, J. Chang, and R .Huang, "The influence of aggregate size and binder material on the properties of pervious concrete," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/963971.

[15] L. Moretti, P. Di Mascio, and C. Fusco, "Porous concrete for pedestrian pavements," Oct. 01, 2019, *MDPI AG*. doi: 10.3390/w11102105.

[16] A. K. Chandrappa and K. P. Biligiri, "Pervious concrete as a sustainable pavement material-Research findings and future prospects: A state-of-the-art review," May 15, 2016, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054.

[17] B. Rehder, K. Banh, and N. Neithalath, "Fracture behavior of pervious concretes: The effects of pore structure and fibers," *Eng Fract Mech*, vol. 118, pp. 1–16, 2014, doi: 10.1016/j.engfracmech.2014.01.015.

[18] K. Ferić, V. Sathish Kumar, A. Romić, and H. Gotovac, "Effect of Aggregate Size and Compaction on the Strength and Hydraulic Properties of Pervious Concrete," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 2, Jan. 2023, doi: 10.3390/su15021146.

[19] R. Jansen, R. Pieralisi, and E. Pereira, “Influence of compaction energy on pervious concrete properties and vertical porosity distribution,” *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, vol. 17, no. 2, 2024, doi: 10.1590/s1983-41952024000200011.

[20] N. Ghafoori and S. Dutta, “Pavement thickness design for no-fines concrete parking lots,” *J Transp Eng*, vol. 121, 1995.

[21] T. Joshi and U. Dave, “Evaluation of strength, permeability and void ratio of Pervious concrete with changing W/C ratio and aggregate size,” *IJCIET_07_04_023 International Journal of Civil Engineering and Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 276–284, 2016, [Online]. Available: http://www.iaeme.com/IJCIET/index.asp276http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=7&IType=4http://www.iaeme.com/IJCIET/index.asp277http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=7&IType=4

[22] W. Ramírez, M. Mayacela, L. Contreras, A. Shambi, F. Ramírez, and J. Chacón, “Mechanical Properties of Permeable Concrete Reinforced with Polypropylene Fibers for Different Water–Cement Ratios,” *Buildings*, vol. 14, no. 9, Sep. 2024, doi: 10.3390/buildings14092935.

[23] 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.

[24] A. Bonicelli, G. M. Arguelles, and L. G. F. Pumarejo, “Improving Pervious Concrete Pavements for Achieving More Sustainable Urban Roads,” in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2016, pp. 1568–1573. doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.628.

[25] H. Zhu, C. Wen, Z. Wang, and L. Li, “Study on the permeability of recycled aggregate pervious concrete with fibers,” *Materials*, vol. 13, no. 2, Jan. 2020, doi: 10.3390/ma13020321.

[26] J. Wu, L. Hu, C. Hu, Y. Wang, J. Zhou, and X. Li, “Impact of Polypropylene Fiber on the Mechanical and Physical Properties of Pervious Concrete: An Experimental Investigation,” *Buildings*, vol. 13, no. 8, Aug. 2023, doi: 10.3390/buildings13081966.

[27] C. W. Tang, C. K. Cheng, and L. W. Ean, “Mix Design and Engineering Properties of Fiber-Reinforced Pervious Concrete Using Lightweight Aggregates,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/app12010524.

[28] S. Juradin, F. Mihanović, N. Ostojić-škomrlj, and E. Rogošić, “Pervious Concrete Reinforced with Waste Cloth Strips,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 5, Mar. 2022, doi: 10.3390/su14052723.

[29] O. Mitrosz, M. Kurpińska, M. Miśkiewicz, T. Brzozowski, and H. S. Abdelgader, “Influence of the Addition of Recycled Aggregates and Polymer Fibers on the Properties of Pervious Concrete,” *Materials*, vol. 16, no. 15, Aug. 2023, doi: 10.3390/ma16155222.

[30] A. Tamimi, S. W. Tabsh, and M. El-Emam, “Pervious Concrete Made with Recycled Coarse Aggregate and Reinforced with Date Palm Leaves Fibers,” *Materials*, vol. 16, no. 23, Dec. 2023, doi: 10.3390/ma16237496.

[31] T. Soetens and S. Matthys, “Shear-stress transfer across a crack in steel fibre-reinforced concrete,” *Cem Concr Compos*, vol. 82, pp. 1–13, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.05.010.

[32] Muhaned S and Musawi M, “Tests of residual shear transfer strength of concrete exposed to fire,” *Sciendo*, vol. LXIV, no. 2, 2018, doi: 10.2478/ace-2018-0024.

[33] B. Barragán, R. Gettu, L. Agulló, and R. Zerbino, “Shear Failure of Steel Fibre-Reinforce Concrete-based Push Off Tests,” 2008. [Online]. Available: www.concretesociety.co.za

[34] A. Picazo, J. C. Gálvez, M. G. Alberti, and A. Enfedaque, “Assessment of the shear behaviour of polyolefin fibre reinforced concrete and verification by means of digital

image correlation," *Constr Build Mater*, vol. 181, pp. 565–578, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.235.

[35] A. Picazo, J. C. Gálvez, M. G. Alberti, and A. Enfedaque, "Comportamiento del hormigón reforzado con fibras de acero conforme a la teoría de corte-fricción," *Hormigon y Acero*, vol. 75, no. 302–303, pp. 137–146, Feb. 2024, doi: 10.33586/hya.2023.3110.

[36] M. G. Alberti, Á. Picazo, J. C. Gálvez, and A. Enfedaque, "New methodological approach towards a complete characterization of structural fiber reinforced concrete by means of mechanical testing procedures," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 14, Jul. 2020, doi: 10.3390/app10144811.

[37] A. Picazo, M. G. Alberti, J. C. Gálvez, and A. Enfedaque, "Shear slip post-cracking behaviour of polyolefin and steel fibre reinforced concrete," *Constr Build Mater*, vol. 290, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123187.

[38] Picazo Á, "Estudio experimental y numérico del comportamiento a cortante de hormigones reforzados con fibras de poliolefina y acero," 2020.

[39] A. Georgiou, N. Eshghi, and S. Pantazopoulou, "Shear Strength of Strain-Hardening Cementitious Materials," *Construction Materials*, vol. 3, no. 4, pp. 509–528, Dec. 2023, doi: 10.3390/constrmater3040032.

[40] J. A. Hofbeck, I. 0 Ibrahim, and A. H. Mattock, "Shear Transfer in Reinforced Concrete," *ACI JOURNAL*, pp. 66–79, 1969.

[41] Qasim O, "Comparison between the Behaviors of Different Concrete Types in Various Shear Tests," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Mar. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/745/1/012176.

[42] Saad R and Rahal K, "Shearing strength of plain concrete based of push off tests," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Dec. 2017. doi: 10.1063/1.5010580.

[43] Grusova M, Darby A, and Evernden M, "Mechanics of Failure in FRP Strengthened Reinforced Concrete in Shear," 2014. doi: https://doi.org/10.17863/CAM.17012.

[44] R. Nesakumar, P. Sarala, and K. Muthukumar, "Experimental investigation on shear strength of high performance concrete with metakaolin under direct shearing," *International Journal of Creative Research Thoughts*, p. 303, 2018, [Online]. Available: www.ijcrt.org

[45] Chandrashekharamurthy H, Kumar P, and Kumar P, "Shear Strength, Compressive Strength and Workability Characteristics of Concretes Reinforced with Steel Fibres," *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2019, doi: 10.13140/RG.2.2.31792.20480.

[46] Soto A and Kaufmann W, "Effect of Test Setups on the Shear Transfer Capacity Across Cracks in FRC," *International Symposium on Fibre Reinforced Concret*, 2020, doi: 10.3929/ethz-b-000453091.

[47] A. Georgiou, N. Eshghi, and S. Pantazopoulou, "Shear Strength of Strain-Hardening Cementitious Materials," *Construction Materials*, vol. 3, no. 4, pp. 509–528, Dec. 2023, doi: 10.3390/constrmater3040032.

[48] Eshghi N, "Behaviour and Analysis of Strain Hardening Fiber Reinforced Cementitious Composites Under Shear and Flexure," 2018.

[49] R. Naserian, A. Hosseini, and M. S. Marefat, "Assessment of shear transfer capacity of non-cracked concrete strengthened with external GFRP strips," *Constr Build Mater*, vol. 45, pp. 224–232, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.028.

[50] B. González Fonteboa, F. Martínez, D. Carro, and J. Eiras, "Cortante-fricción de los hormigones reciclados," *Materiales de Construccion*, vol. 60, no. 299, pp. 53–67, 2010, doi: 10.3989/mc.2010.49708.

[51] Valle M and Boyokoztork O, “Behavior of Fiber Reinforced High-Strength Concrete under Direct Shear,” *ACI Mater J*, vol. 90, 1993.
[52] L. Abdul-Hafez, Y. Tawfic, O. Hammed, and A. Abdul-Zaher, “Shear Strength of Fiber Reinforced Concrete,” *The International Conference on Civil and Architecture Engineering*, vol. 11, no. 11, pp. 1–18, Apr. 2016, doi: 10.21608/iccae.2016.43432.
[53] Saad R and Rahal K, “Shearing strength of plain concrete based of push off tests,” in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Dec. 2017. doi: 10.1063/1.5010580.
[54] P. da S. P. Figueiredo, T. A. Soares, S. L. González Garcia, A. C. da S. Pereira, and J. C. Trindade, “Shear in sand-lightweight and conventional high strength concrete through the push-off test,” *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, vol. 14, no. 3, 2021, doi: 10.1590/S1983-41952021000300007.
[55] Soto G and Kaufmann W, “Effect of Test Setups on the Shear Transfer Capacity Across Cracks in FRC,” 2020. doi: 10.3929/ethz-b-000453091.
[56] N. Neithalath, J. Olek, N. Weiss, A. Marolf, E. Sell, and W. Thornton, “Development of quiet and durable porous Portland cement concrete paving materials,” 2003.
[57] NTE INEN 156, “Cemento Hidráulico. Determinación de la densidad,” 2009.
[58] ASTM C188, “Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement,” 2009. [Online]. Available: www.astm.org
[59] NTE INEN 696, “Áridos. Análisis granulométrico en los áridos fino y grueso.,” 2011.
[60] ASTM C136, “Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates,” 2006. [Online]. Available: www.astm.org,
[61] NTE INEN 872, “Áridos para Hormigón. Requisitos,” 2011.
[62] NTE INEN 694, “Hormigón y áridos para elaborar hormigón. Terminología,” 2010.
[63] NTP 400 037, “Agregados. Agregados para concreto. Requisitos,” 2018. [Online]. Available: www.inacal.gob.pe
[64] A. Ibrahim, E. Mahmoud, M. Yamin, and V. Patibandla, “Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties,” *Constr Build Mater*, vol. 50, pp. 524–529, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.022.
[65] NTE INEN 858, “Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos,” 2010.
[66] C 29/C 29M, “Standard Test Method for Bulk Density (‘Unit Weight’) and Voids in Aggregate,” 2007. [Online]. Available: www.astm.org,
[67] NTE INEN 856, “DeterminaciÓn de la densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del árido fino.,” 2010.
[68] ASTM C128, “Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate 1,” 2007. [Online]. Available: www.astm.org,
[69] NTE INEN 857, “Determinación de la densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del árido grueso.,” 2010.
[70] ASTM C127, “Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate,” 2007. [Online]. Available: www.astm.org,
[71] NTE INEN 862, “Áridos para hormigón. Determinación del contenido total de humedad.,” 2011.
[72] ASTM C566, “Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying,” 2004. [Online]. Available: www.astm.org
[73] R. Meininger, “No-Fines Pervious Concrete for Paving,” *International Concrete Abstracts*, vol. 10, no. 8, 1998.
[74] H. Z. Xie, L. G. Li, F. Liu, and A. K. H. Kwan, “Recycling Old Concrete as Waste Concrete Powder for Use in Pervious Concrete: Effects on Permeability, Strength and

Eco-Friendliness," *Buildings*, vol. 12, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.3390/buildings12122172.
[75] SIKA, "Hoja técnica Sika Plastocrete 161 HE," 2014. [Online]. Available: http://bol.sika.com
[76] NTE INEN 3124, "Hormigón. Elaboración y Curado de Especímenes de ensayo de Laboratorio," 2017.
[77] ASTM C 192/C 192M, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory," 2007. [Online]. Available: http://www.aci-int.org.
[78] ASTM C31, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field," 2019. doi: 10.1520/C0031_C0031M-19.
[79] NTE INEN 1578, "Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento.," 2010.
[80] ASTM C1688, "Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete," 2008.
[81] ACI 318-19, "Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural," 2019.
[82] A. Picazo, "Estudio experimental y numérico del comportamiento a cortante de hormigones reforzados con fibras de poliolefina y acero," 2020.
[83] NTE INEN 1576, "Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo.," 2011.
[84] ASTM C42/C 42M, "Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete," 2009. [Online]. Available: www.astm.org,
[85] I. Standard, "Hardened Concrete-Methods of Test Part 1 Testing of Strength of Hardened Concrete Section 1 Compressive, Flexural and Split Tensile Strength (First Revision) IS 516 (Part 1/Sec 1) : 2021," 2021. [Online]. Available: www.standardsbis.in
[86] ASTM C1754, "Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete," 2012, doi: 10.1520/C1754_C1754M-12.
[87] C 1542/C 1542M, "Standard Test Method for Measuring Length of Concrete Cores," 2002. [Online]. Available: www.astm.org
[88] NTE INEN 1573, "Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico," 2010.
[89] "Tests of residual shear transfer strength of concrete exposed to fire".
[90] S. Oller, *Fractura Mecánica. Un enfoque global*, Primera edición. 2001.
[91] S. Kosmatka, B. Kerkhoff, W. Panarese, and J. Tanesi, *Diseño y control de mezclas de concreto*. Portland Cement Association, 2004.
[92] NEC-SE-CG, "Cargas (No sísmicas)," 2015.
[93] ACI Committee 522, "Report on pervious concrete," American Concrete Institute, 2010.
[94] NRMCA, "Guide to Pervious Concrete Mix Design." [Online]. Available: www.nrmca.org
[95] N. Ghafoori, S. Dutta, and S. Member, "Laboratory investigation of compacted no-fines concrete for paving materials," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 7, 1995.
[96] M. Neamitha and TM Supraja, "Influence of water cement ratio and the size of aggregate on the properties of pervious concrete," 2017. [Online]. Available: www.irjes.com
[97] G. N. Mccain and G. R. Assistant, "Porous Concrete Pavements: Mechanical and Hydraulic Properties," *Transp Res Rec*, vol. 2164, no. 1, 2010, doi: 10.3141/2164-09.
[98] P. D. Tennis, M. L.Leming, and D. J. Akers, *Pervious Concrete Pavements*. Portland Cement Association, 2004.
[99] IRC:44-2017, "Guidelines for cement concrete mix design for pavements," 2017.
[100] L. G. Li, J. J. Feng, J. Zhu, S. Chu, and A. Kwan, "Pervious concrete: Effects of porosity on permeability and strength," *Magazine of Concrete Research*, vol. 73, no. 2, pp. 69–79, Jan. 2021, doi: 10.1680/jmacr.19.00194.

[101] Y. Joung and Z. Grasley, “Evaluation and Optimization of Durable Pervious Concrete for Use in Urban Areas,” 2008. [Online]. Available: http://www.ntis.gov

[102] A. A. Aliabdo, A. E. M. Abd Elmoaty, and A. M. Fawzy, “Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate,” *Constr Build Mater*, vol. 193, pp. 105–127, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.182.

[103] J. Wu, Q. Pang, Y. Lv, J. Zhang, and S. Gao, “Research on the Mechanical and Physical Properties of Basalt Fiber-Reinforced Pervious Concrete,” *Materials*, vol. 15, no. 19, Oct. 2022, doi: 10.3390/ma15196527.

[104] A. Sangthongtong, N. Semvimol, T. Rungratanaubon, K. Duangmal, and P. Joyklad, “Mechanical Properties of Pervious Recycled Aggregate Concrete Reinforced with Sackcloth Fibers (SF),” *Infrastructures (Basel)*, vol. 8, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.3390/infrastructures8020038.

[105] Y. Wu, J. Dai, B. Shi, and B. Wu, “The Strength and Elastic Modulus of Pervious Concrete Considering Pore and Fiber during Freeze–Thaw Cycles,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 23, Dec. 2022, doi: 10.3390/su142316217.

[106] ACI 211.1-22, “Selecting Proportions for Normal-Density and High-Density Concrete-Guide Inch-Pound Units Selecting Proportions for Normal-Density and High-Density Concrete-Guide,” 2022. [Online]. Available: www.concrete.org

[107] J. G. M. Van Mier *et al.*, “Upgrading the push-off test to study the mechanisms of shear transfer in FRC elements,” 2013. [Online]. Available: www.icitech.upv.es

ANEXOS

Anexo 1: Densidad del cemento hidráulico

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
INGENIERÍA CIVIL				
TESIS: "Análisis del comportamiento a compresión y corte puro de hormigón permeable para distintas relaciones agua/cemento con adición de fibras de polipropileno"				
DENSIDAD REAL DEL CEMENTO				
TIPO:	Holcim-Tipo GU			
NORMA:	NTE INEN 156			
CALCULO DE LA DENSIDAD REAL				
DATOS	**DESIGNACIÓN**	**UNIDAD**	**VALOR**	
Ma	Masa del frasco + gasolina	gr	328,00	328,00
V1	Lectura Inicial de la gasolina	cm3	0,50	0,50
Mp	Masa del frasco + gasolina + cemento	gr	392,00	391,00
V2	Lectura Final de la gasolina	cm3	21,55	21,50
V3 = V2 - V1	Volumen Desalojado de gasolina	cm3	21,05	21,00
Mc = Mp - Ma	Masa del cemento usado	gr	64,00	63,00
DRC = Mc / V3	Densidad del cemento	gr/cm3	3,040	3,000
	Densidad real promedio	gr/cm3	3,020	

Anexo 2: Análisis granulométrico del agregado fino.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO						
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA						
INGENIERÍA CIVIL						
TESIS: "Análisis del comportamiento a compresión y corte puro de hormigón permeable para distintas relaciones agua/cemento con adición de fibras de polipropileno"						
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO FINO						
ORIGEN:	MINA LAS VIÑAS AMBATO					
PESO MUESTRA:	1001,5	gr.	**PÉRDIDA DE MUESTRA:**	0,02%		
NORMA:	NTE INEN 696					
Tamiz	***Abertura (mm)***	***Retenido parcial (gr)***	***Retenido acumulado (gr)***	***% Retenido acumulado***	***% que pasa***	***Límites NTE INEN-872:2011 % que pasa***
3/8	9,5	0	0	0,00%	100,00%	100
#4	4,76	0,2	0,2	0,02%	99,98%	95 - 100
#8	2,38	92,9	93,1	9,30%	90,70%	80 - 100
#16	1,19	203,9	297	29,66%	70,34%	50 - 85
#30	0,59	247,5	544,5	54,38%	45,62%	25 - 60
#50	0,297	278,8	823,3	82,22%	17,78%	5 - 30
#100	0,149	146	969,3	96,80%	3,20%	0 - 10
#200	0,075	29,6	998,9	99,76%	0,24%	-
BANDEJA		2,4	1001,3	100,00%	0,00%	-
MÓDULO DE FINURA				2,72%		

Anexo 3: Análisis granulométrico del agregado grueso.

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

TESIS: "Análisis del comportamiento a compresión y corte puro de hormigón permeable para distintas relaciones agua/cemento con adición de fibras de polipropileno"

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO GRUESO

ORIGEN:		MINA LAS VIÑAS AMBATO				
PESO MUESTRA:		10000	gr.	**PÉRDIDA DE MUESTRA (%):**		0,00
NORMA:		NTE INEN 696				
Tamiz	***Abertura (mm)***	***Retenido parcial (gr)***	***Retenido acumulado (gr)***	***% Retenido acumulado***	***% que pasa***	***Límites NTE INEN-872:2011 % que pasa***
2"	50,8	0,00	0,00	0,00%	100,00%	-
1 ½"	38,1	0,00	0,00	0,00%	100,00%	-
1"	25,4	0,00	0,00	0,00%	100,00%	100
3/4"	19,05	975,60	975,60	9,76%	90,24%	90-100
1/2"	12,7	4100,80	5076,40	50,76%	49,24%	20-55
3/8"	9,53	3920,20	8996,60	89,97%	10,03%	0-15
#4	4,75	920,00	9916,60	99,17%	0,83%	0 -5
BANDEJA	41,008%	83,40	10000,00	100,00%	0,00%	-
TAMAÑO NOMINAL MÁXIMO:				3/4"		

Anexo 4: Peso volumétrico suelto de los agregados.

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

TESIS: "Análisis del comportamiento a compresión y corte puro de hormigón permeable para distintas relaciones agua/cemento con adición de fibras de polipropileno"

DENSIDAD APARENTE SUELTA DEL AGREGADO GRUESO Y FINO

ORIGEN:	MINA LAS VIÑAS AMBATO			
MASA RECIPIENTE 1:	9,8 Kg.			
MASA RECIPIENTE 2:	0,637 Kg.			
VOLUMEN RECIPIENTE1:	20,84 dm^3			
VOLUMEN RECIPIENTE2:	3,15 dm^3			
NORMA:	NTE INEN 858:2010			
Agregado	***Agregado + Recipiente (kg)***	***Agregado (kg)***	***Peso Unitario (kg/dm^3)***	***Peso Unitario Promedio (kg/dm^3)***
1/2"	37,560	27,760	1,332	1,329
	37,440	27,640	1,326	
FINO	5,180	4,543	1,442	1,445
	5,198	4,561	1,448	

Anexo 5: Peso volumétrico compactado de los agregados.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO ***FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA*** **INGENIERÍA CIVIL**				
TESIS: "Análisis del comportamiento a compresión y corte puro de hormigón permeable para distintas relaciones agua/cemento con adición de fibras de polipropileno"				
DENSIDAD APARENTE COMPACTADA DEL AGREGADO GRUESO Y FINO				
ORIGEN:	MINA LAS VIÑAS AMBATO			
MASA RECIPIENTE 1:	9,8 Kg.			
MASA RECIPIENTE 2:	0,637 Kg.			
ENSAYADO POR:	JOSÉ DAVID NÚÑEZ PÉREZ			
VOLUMEN RECIPIENTE1:	20,84 dm^3		**FECHA:**	00/ene/1900
VOLUMEN RECIPIENTE2:	3,15 dm^3			
NORMA:	NTE INEN 858:2010			
Agregado	***Agregado + Recipiente (kg)***	***Agregado (kg)***	***Peso Unitario (kg/dm^3)***	***Peso Unitario Promedio (kg/dm^3)***
1/2"	39,500	29,700	1,425	1,419
	39,260	29,460	1,414	
FINO	5,295	4,658	1,479	1,482
	5,315	4,678	1,485	

Anexo 6: Densidad real y capacidad de absorción del agregado fino.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO ***FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA*** **INGENIERÍA CIVIL**			
TESIS: "Análisis del comportamiento a compresión y corte puro de hormigón permeable para distintas relaciones agua/cemento con adición de fibras de polipropileno"			
DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO			
ORIGEN:	MINA LAS VIÑAS AMBATO		
NORMA:	NTE INEN 856		
CALCULO DE LA DENSIDAD REAL			
DATOS	**DESIGNACIÓN**	**UNIDAD**	**VALOR**
M1	Masa del picnómetro	gr	193,50
M2	Masa del picnómetro + muestra SSS	gr	693,50
M3	Masa del picnómetro + muestra SSS + agua	gr	1002,50
M4=M3-M2	Masa agua añadida	gr	309,00
M5	Masa picnómetro + 500cc de agua	gr	690,00
M6=M5-M1	Masa de 500cc de agua	gr	496,50
DA=M6/500cm3	Densidad del agua	gr/cm3	1,0
M7=M6-M4	Masa del agua desalojada por la muestra	gr	187,50
Msss=M2-M1	Masa del agregado	gr	500,00
Vsss=M7/DA	Volumen del agua desalojada	cm3	188,82
DRA=Msss/Vsss	Densidad real de la arena	gr/cm3	2,648

CÁLCULO DE LACAPACIDAD DE ABSORCIÓN				
DATOS	**DESIGNACIÓN**	**UNIDAD**	**VALOR**	
M7	Masa del recipiente	gr	1,93	1,99
M8	Masa del recipiente + muestra SSS	gr	88,76	106,54
M9=M8-M7	Masa de la muestra SSS	gr	86,83	104,55
M10	Masa del recipiente + muestra seca	gr	86,67	103,99
M11=M10-M7	Masa de la muestra seca	gr	84,74	102,00
CA=((M9-M11)/M11)*100	Capacidad de absorción	%	2,46%	2,50%
P2=(CA1+CA2)/2	Capacidad de absorción promedio	%	2,48%	

Anexo 7: Densidad real y capacidad de absorción del agregado grueso.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
INGENIERÍA CIVIL				
TESIS: "Análisis del comportamiento a compresión y corte puro de hormigón permeable para distintas relaciones agua/cemento con adición de fibras de polipropileno"				
DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO				
ORIGEN:	MINA LAS VIÑAS AMBATO			
NORMA:	NTE INEN 857			
CALCULO DE LA DENSIDAD REAL				
DATOS	**DESIGNACIÓN**	**UNIDAD**	**VALOR**	
M1	Masa de la canastilla en el aire	gr	1301,00	
M2	Masa de la canastilla en el agua	gr	1134,00	
M3	Masa de la canastilla + muestra SSS en el aire	gr	3317,00	
M4	Masa de la canastilla + muestra SSS en el agua	gr	2377,00	
DA	Densidad real del agua	gr/cm3	1,00	
M5 = M3-M1	Masa de la muestra SSS en el aire	gr	2016,00	
M6 = M4-M2	Masa de la muestra SSS en el agua	gr	1243,00	
VR=(M5-M6)/DA	Volumen real de la muestra	cm3	773,00	
DR=M5/VR	Densidad real	gr/cm3	2,608	
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN				
DATOS	**DESIGNACIÓN**	**UNIDAD**	**VALOR**	
M7	Masa del recipiente	gr	1,97	2,01
M8	Masa del recipiente + muestra SSS	gr	141,04	133,99
M9=M8-M7	Masa de la muestra SSS	gr	139,08	131,98
M10	Masa del recipiente + muestra seca	gr	138,15	131,63
M11=M10-M7	Masa de la muestra seca	gr	136,18	129,63
CA=((M9-M11)/M11)*100	Capacidad de absorción	%	2,13%	1,82%
P2=(CA1+CA2)/2	Capacidad de absorción promedio	%	1,973%	

Anexo 8: Cálculo de dosificaciones.

- ***PARA UNA RELACIÓN A/C=0.30***

DATOS				
Peso Unitario Compactado seco (DRUW)		1419,39	kg/m^3	INEN 858
Contiene Finos	% Finos	10%		
Alta Energía de Compactación				
Relación a/c		0,30		
Densidad real del cemento		3020,19	kg/m^3	INEN 156
Densidad especifica fibra		910,00	kg/m^3	
Densidad del agua		1000,00	kg/m^3	
Densidad del plastificante		1100,00	kg/m^3	
Densidad Relat. SSS A.Grueso		2608,02	kg/m^3	
Abs A. Grueso		1,97%		INEN 857
% Humedad A. Grueso		0,47%		
Densidad Relt (SH) A. Grueso		2557,564	kg/m^3	
Densidad Relat. SSS A.Fino		2648,00	kg/m^3	
Abs A. Fino		2,48%		INEN 856
% Humedad A. Fino		0,58%		
Densidad Relt (SH) A. Fino		2583,9	kg/m^3	

Dimensiones del cilindro		
Diámetro	100,00	mm
Altura	200,00	mm
Volúmen	0,00157	m^3
Dimensiones de la viga		
Largo	290,00	mm
Ancho	150,00	mm
Profundidad	150,00	mm
Volúmen	0,006525	m^3

Paso 1: Seleccione el agregado grueso		
DRUW	1419,39	kg/m^3

Paso 2: Determine la cantidad de agregado requerido		
M_G: Masa A. Grueso (SH)	M_G: 0.9 DRUW	
M_G: Masa A. Grueso (SH)	1277,45	kg/m^3
M_F: Masa A. Fino (SH)	M_F: 10%(M_G)	
M_F: Masa A. Fino (SH)	127,74	kg/m^3

Nota: *SH. El agregado se encuentra en condición seca.

Paso 3: Determine la cantidad de pasta requerida	
M_C: Masa Cemento	M_C: 0.21(M_G)

M_C: Masa Cemento	268,26	kg/m^3

Paso 4: Seleccione a/c y la cantidad de agua necesaria		
a/c	0,30	
M_A: Masa Agua	$M_A: 0.30(M_C)$	
M_A: Masa Agua	80,48	kg/m^3

Paso 5: Determine la cantidad de fibras de polipropileno		
M_{fib}: Masa fibras	0,00	kg/m^3
Mfib: Masa fibras	2,50	kg/m3
Mfib: Masa fibras	4,00	kg/m3

Paso 6: Determine la cantidad de aditivo plastificante		
Mp: Masa de plastificante	$M_p: 1\%(M_C)$	
Mp: Masa de plastificante	2,68	kg/m^3

Paso 7: Determine el volumen absoluto y cantidades corregidas

- **Contenido de fibras:** 0.00 kg/m^3

PESO			**VOLUMEN ABSOLUTO**		**PORCENTAJE %**		**CORRECIÓN POR HUMEDAD**	
M_C: Masa Cemento	268,26	kg/m^3	0,089	m^3/m^3	8,88	%	268,26	kg/m^3
M_G: Masa A. Grueso (SH)	1277,447	kg/m^3	0,499	m^3/m^3	49,95	%	1283,46	kg/m^3
M_F: Masa A. Fino (SH)	127,745	kg/m^3	0,049	m^3/m^3	4,94	%	128,48	kg/m^3
M_A: Masa Agua	80,48	kg/m^3	0,080	m^3/m^3	8,05	%	102,10	kg/m^3
M_{fib}: Masa fibras	0,00	kg/m^3	0,000	m^3/m^3	0,00	%	0,00	kg/m^3
Mp: Masa de plastificante	2,68	kg/m^3	0,002	m^3/m^3	0,24	%	2,68	kg/m^3
% Vacíos	-	-	0,279	m^3/m^3	27,93	%	-	-
TOTAL	1756,62	kg/m^3	1,00	m^3/m^3	100,00	%	1784,99	kg/m^3

DOSIFICACIÓN PARA 1 CILINDRO				
M_C: Masa Cemento	0.421	kg	421.39	gr
M_G: Masa A. Grueso (HN)	2.016	kg	2016.05	gr
M_F: Masa A. Fino (HN)	0.202	kg	201.82	gr
M_A: Masa Agua	0.160	kg	160.37	ml
M_{fib}: Masa fibras	0.000	kg	0.00	gr
Mp: Masa de plastificante	0.004	kg	3.83	ml

Nota: *HN. El agregado se encuentra en condición de humedad natural.

DOSIFICACIÓN PARA 1 VIGA				
M_C: Masa Cemento	1.750	kg	1750.42	gr
M_G: Masa A. Grueso (HN)	8.375	kg	8374.57	gr
M_F: Masa A. Fino (HN)	0.838	kg	838.36	gr
M_A: Masa Agua	0.666	kg	666.18	ml
M_{fib}: Masa fibras	0.000	kg	0.00	gr
Mp: Masa de plastificante	0.018	kg	15.91	ml

Nota: *HN. El agregado se encuentra en condición de humedad natural.

- **Contenido de fibras:** 2.50 kg/m^3

PESO			VOLUMEN		PORCENTAJE %		CORRECIÓN POR HUMEDAD	
M_C: Masa Cemento	268,26	kg/m^3	0,089	m^3/m^3	8,88	%	268,26	kg/m^3
M_G: Masa A. Grueso (SH)	1277,447	kg/m^3	0,499	m^3/m^3	49,95	%	1283,46	kg/m^3
M_F: Masa A. Fino (SH)	127,745	kg/m^3	0,049	m^3/m^3	4,94	%	128,48	kg/m^3
M_A: Masa Agua	80,48	kg/m^3	0,080	m^3/m^3	8,05	%	102,10	kg/m^3
M_{fib}: Masa fibras	2,50	kg/m^3	0,003	m^3/m^3	0,27	%	2,50	kg/m^3
Mp: Masa de plastificante	2,68	kg/m^3	0,002	m^3/m^3	0,24	%	2,68	kg/m^3
% Vacíos	-	-	0,277	m^3/m^3	27,66	%	-	-
TOTAL	1759,12	kg/m^3	1,000	m^3/m^3	100,00	%	1787,49	kg/m^3

DOSIFICACIÓN PARA 1 CILINDRO				
M_C: Masa Cemento	0.421	kg	421.39	gr
M_G: Masa A. Grueso (HN)	2.016	kg	2016.05	gr
M_F: Masa A. Fino (HN)	0.202	kg	201.82	gr
M_A: Masa Agua	0.160	kg	160.37	ml
M_{fib}: Masa fibras	0.004	kg	3.93	gr
Mp: Masa de plastificante	0.004	kg	3.83	ml

Nota: *HN. El agregado se encuentra en condición de humedad natural.

DOSIFICACIÓN PARA 1 VIGA				
M_C: Masa Cemento	1.750	kg	1750.42	gr
M_G: Masa A. Grueso (HN)	8.375	kg	8374.57	gr
M_F: Masa A. Fino (HN)	0.838	kg	838.36	gr
M_A: Masa Agua	0.666	kg	666.18	ml
M_{fib}: Masa fibras	0.016	kg	16.31	gr
Mp: Masa de plastificante	0.018	kg	15.91	ml

Nota: *HN. El agregado se encuentra en condición de humedad natural.

- **Contenido de fibras:** 4.00 kg/m^3

PESO			VOLUMEN		PORCENTAJE %		CORRECIÓN POR HUMEDAD	
M_C: Masa Cemento	268,26	kg/m^3	0,089	m^3/m^3	8,88	%	268,26	kg/m^3
M_G: Masa A. Grueso (SH)	1277,447	kg/m^3	0,499	m^3/m^3	49,95	%	1283,46	kg/m^3
M_F: Masa A. Fino (SH)	127,745	kg/m^3	0,049	m^3/m^3	4,94	%	128,48	kg/m^3
M_A: Masa Agua	80,48	kg/m^3	0,080	m^3/m^3	8,05	%	102,10	kg/m^3
M_{fib}: Masa fibras	4,00	kg/m^3	0,004	m^3/m^3	0,44	%	4,00	kg/m^3
Mp: Masa de plastificante	2,68	kg/m^3	0,002	m^3/m^3	0,24	%	2,68	kg/m^3
% Vacíos	-	-	0,275	m^3/m^3	27,49	%	-	-
TOTAL	1760,62	kg/m^3	1,000	m^3/m^3	100,00	%	1788,99	kg/m^3

DOSIFICACIÓN PARA 1 CILINDRO				
M_C: Masa Cemento	0.421	kg	421.39	gr
M_G: Masa A. Grueso (HN)	2.016	kg	2016.05	gr
M_F: Masa A. Fino (HN)	0.202	kg	201.82	gr
M_A: Masa Agua	0.160	kg	160.37	ml
M_{fib}: Masa fibras	0.006	kg	6.28	gr
Mp: Masa de plastificante	0.004	kg	3.83	ml

Nota: *HN. El agregado se encuentra en condición de humedad natural.

DOSIFICACIÓN PARA 1 VIGA				
M_C: Masa Cemento	1.750	kg	1750.42	gr
M_G: Masa A. Grueso (HN)	8.375	kg	8374.57	gr
M_F: Masa A. Fino (HN)	0.838	kg	838.36	gr

M_A: Masa Agua	0.666	kg	666.18	ml
M_{fib}: Masa fibras	0.026	kg	26.10	gr
Mp: Masa de plastificante	0.018	kg	15.91	ml

Nota: *HN. El agregado se encuentra en condición de humedad natural.

- **PARA UNA RELACIÓN A/C=0.35**

DATOS				
Peso Unitario Compactado seco (DRUW)		1419,39	kg/m^3	INEN 858
Contiene Finos	% Finos	10%		
Alta Energía de Compactación				
Relación a/c		0,35		
Densidad real del cemento		3020,19	kg/m^3	INEN 156
Densidad especifica fibra		910,00	kg/m^3	
Densidad del agua		1000,00	kg/m^3	
Densidad del plastificante		1100,00	kg/m^3	
Densidad Relat. SSS A.Grueso		2608,02	kg/m^3	
Abs A. Grueso		1,97%		INEN 857
% Humedad A. Grueso		0,47%		
Densidad Relt (SH) A. Grueso		2557,564	kg/m^3	
Densidad Relat. SSS A.Fino		2648,00	kg/m^3	
Abs A. Fino		2,48%		INEN 856
% Humedad A. Fino		0,58%		
Densidad Relt (SH) A. Fino		2583,9	kg/m^3	

Dimensiones del cilindro		
Diámetro	100,00	mm
Altura	200,00	mm
Volúmen	0,00157	m^3
Dimensiones de la viga		
Largo	270,00	mm
Ancho	150,00	mm
Profundidad	150,00	mm
Volúmen	0,006075	m^3

Paso 1: Selecciones el agregado grueso		
DRUW	1419,39	kg/m^3

Paso 2: Determine la cantidad de agregado requerido		
M_G: Masa A. Grueso (SH)	M_G: 0.9 DRUW	
M_G: Masa A. Grueso (SH)	1277,45	kg/m^3
M_F: Masa A. Fino (SH)	M_F: 10%(M_G)	
M_F: Masa A. Fino (SH)	127,74	kg/m^3

Nota: *SH. El agregado se encuentra en condición seca.

Paso 3: Determine la cantidad de pasta requerida		
M_C: Masa Cemento	$M_C: 0.21(M_G)$	
M_C: Masa Cemento	268,26	kg/m^3

Paso 4: Seleccione a/c y la cantidad de agua necesaria		
a/c	0,35	
M_A: Masa Agua	$M_A: 0.35(M_C)$	
M_A: Masa Agua	93,89	kg/m^3

Paso 5: Determine la cantidad de fibras de polipropileno		
M_{fib}: Masa fibras	0,00	kg/m^3
Mfib: Masa fibras	2,50	kg/m3
Mfib: Masa fibras	4,00	kg/m3

Paso 6: Determine la cantidad de aditivo plastificante		
Mp: Masa de plastificante	$M_p: 1\%(M_C)$	
Mp: Masa de plastificante	2,68	kg/m^3

Paso 7: Determine el volumen absoluto y cantidades corregidas

- **Contenido de fibras:** 0.00 kg/m^3

PESO			**VOLUMEN**		**PORCENTAJE %**		**CORRECIÓN POR HUMEDAD**	
M_C: Masa Cemento	268,26	kg/m^3	0,089	m^3/m^3	8,88	%	268,26	kg/m^3
M_G: Masa A. Grueso (SH)	1277,447	kg/m^3	0,499	m^3/m^3	49,95	%	1283,46	kg/m^3
M_F: Masa A. Fino (SH)	127,745	kg/m^3	0,049	m^3/m^3	4,94	%	128,48	kg/m^3
M_A: Masa Agua	93,89	kg/m^3	0,094	m^3/m^3	9,39	%	115,51	kg/m^3
M_{fib}: Masa fibras	0,00	kg/m^3	0,000	m^3/m^3	0,00	%	0,00	kg/m^3
Mp: Masa de plastificante	2,68	kg/m^3	0,002	m^3/m^3	0,24	%	2,68	kg/m^3
% Vacíos	-	-	0,266	m^3/m^3	26,59	%	-	-
TOTAL	1770,03	kg/m^3	1,000	m^3/m^3	100,00	%	1798,40	kg/m^3

DOSIFICACIÓN PARA 1 CILINDRO				
M_C: Masa Cemento	0.421	kg	421.39	gr
M_G: Masa A. Grueso (HN)	2.016	kg	2016.05	gr
M_F: Masa A. Fino (HN)	0.202	kg	201.82	gr
M_A: Masa Agua	0.181	kg	181.44	ml
M_{fib}: Masa fibras	0.000	kg	0.00	gr
Mp: Masa de plastificante	0.004	kg	3.83	ml

Nota: *HN. El agregado se encuentra en condición de humedad natural.

DOSIFICACIÓN PARA 1 VIGA				
M_C: Masa Cemento	1.750	kg	1750.42	gr
M_G: Masa A. Grueso (HN)	8.375	kg	8374.57	gr
M_F: Masa A. Fino (HN)	0.838	kg	838.36	gr
M_A: Masa Agua	0.754	kg	753.71	ml
M_{fib}: Masa fibras	0.000	kg	0.00	gr
Mp: Masa de plastificante	0.018	kg	15.91	ml

Nota: *HN. El agregado se encuentra en condición de humedad natural.

- **Contenido de fibras:** 2.50 kg/m^3

PESO			VOLUMEN		PORCENTAJE %		CORRECIÓN POR HUMEDAD	
M_C: Masa Cemento	268,26	kg/m^3	0,089	m^3/m^3	8,88	%	268,26	kg/m^3
M_G: Masa A. Grueso (SH)	1277,447	kg/m^3	0,499	m^3/m^3	49,95	%	1283,46	kg/m^3
M_F: Masa A. Fino (SH)	127,745	kg/m^3	0,049	m^3/m^3	4,94	%	128,48	kg/m^3
M_A: Masa Agua	93,89	kg/m^3	0,094	m^3/m^3	9,39	%	115,51	kg/m^3
M_{fib}: Masa fibras	2,50	kg/m^3	0,003	m^3/m^3	0,27	%	2,50	kg/m^3
Mp: Masa de plastificante	2,68	kg/m^3	0,002	m^3/m^3	0,24	%	2,68	kg/m^3
% Vacíos	-	-	0,263	m^3/m^3	26,32	%	-	-
TOTAL	1772,53	kg/m^3	1,000	m^3/m^3	100,00	%	1800,90	kg/m^3

DOSIFICACIÓN PARA 1 CILINDRO				
M_C: Masa Cemento	0.421	kg	421.39	gr
M_G: Masa A. Grueso (HN)	2.016	kg	2016.05	gr
M_F: Masa A. Fino (HN)	0.202	kg	201.82	gr
M_A: Masa Agua	0.181	kg	181.44	ml
M_{fib}: Masa fibras	0.004	kg	3.93	gr
Mp: Masa de plastificante	0.004	kg	3.83	ml

Nota: *HN. El agregado se encuentra en condición de humedad natural.

DOSIFICACIÓN PARA 1 VIGA				
M_C: Masa Cemento	1.750	kg	1750.42	gr
M_G: Masa A. Grueso (HN)	8.375	kg	8374.57	gr
M_F: Masa A. Fino (HN)	0.838	kg	838.36	gr
M_A: Masa Agua	0.754	kg	753.71	ml

M_{fib}: Masa fibras	0.016	kg	16.31	gr
Mp: Masa de plastificante	0.018	kg	15.91	ml

Nota: *HN. El agregado se encuentra en condición de humedad natural.

- **Contenido de fibras:** 4.00 kg/m³

PESO			VOLUMEN		PORCENTAJE %		CORRECIÓN POR HUMEDAD	
M_C: Masa Cemento	268,26	kg/m³	0,089	m³/m³	8,88	%	268,26	kg/m³
M_G: Masa A. Grueso (SH)	1277,447	kg/m³	0,499	m³/m³	49,95	%	1283,46	kg/m³
M_F: Masa A. Fino (SH)	127,745	kg/m³	0,049	m³/m³	4,94	%	128,48	kg/m³
M_A: Masa Agua	93,89	kg/m³	0,094	m³/m³	9,39	%	115,51	kg/m³
M_{fib}: Masa fibras	4,00	kg/m³	0,004	m³/m³	0,44	%	4,00	kg/m³
Mp: Masa de plastificante	2,68	kg/m³	0,002	m³/m³	0,24	%	2,68	kg/m³
% Vacíos	-	-	0,262	m³/m³	26,15	%	-	-
TOTAL	1774,03	kg/m³	1,000	m³/m³	100,00	%	1802,40	kg/m³

DOSIFICACIÓN PARA 1 CILINDRO				
M_C: Masa Cemento	0.421	kg	421.39	gr
M_G: Masa A. Grueso (HN)	2.016	kg	2016.05	gr
M_F: Masa A. Fino (HN)	0.202	kg	201.82	gr
M_A: Masa Agua	0.181	kg	181.44	ml
M_{fib}: Masa fibras	0.006	kg	6.28	gr
Mp: Masa de plastificante	0.004	kg	3.83	ml

Nota: *HN. El agregado se encuentra en condición de humedad natural.

DOSIFICACIÓN PARA 1 VIGA				
M_C: Masa Cemento	1.750	kg	1750.42	gr
M_G: Masa A. Grueso (HN)	8.375	kg	8374.57	gr
M_F: Masa A. Fino (HN)	0.838	kg	838.36	gr
M_A: Masa Agua	0.754	kg	753.71	ml
M_{fib}: Masa fibras	0.026	kg	26.10	gr
Mp: Masa de plastificante	0.018	kg	15.91	ml

Nota: *HN. El agregado se encuentra en condición de humedad natural.

Anexo 9. Densidad y porosidad en estado fresco ASTM 1688.

NORMA:	ASTM C1688								
MASA DEL MOLDE	5.765	kg	**DÍAMETRO**	150.00	mm	**ALTURA**	175.00	mm	
VOLÚMEN	0.00309	m^3							
Identificación	**M. Molde + M. Hormigón Permeable**		**Masa Hormigón P.**	**Densidad**	**Densidad Promedio**	**Densidad Teórica**	**Vol. Absoluto**	**Porosidad**	**Porosidad Promedio**
	kg		**kg**	**kg/m³**	**kg/m³**	**kg/m³**	**m³**	**%**	**%**
HP -a/c 0.30+10%F (1)	11.7840		6.02	1946.3184	1960.3847	1784.99	0.721	21.4%	20.85%
HP -a/c 0.30+10%F (2)	11.8800		6.12	1977.3612				20.2%	
HP -a/c 0.30+10%F (3)	11.8185		6.05	1957.4744				21.0%	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (1)	11.8510		6.09	1967.9837	1983.4512	1787.49	0.723	20.4%	19.73%
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (2)	11.9120		6.15	1987.7088				19.6%	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (3)	11.9335		6.17	1994.6611				19.3%	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (1)	11.7905		6.03	1948.4203	1947.019	1788.99	0.725	21.0%	21.09%
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (2)	11.7795		6.01	1944.8633				21.2%	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (3)	11.7885		6.02	1947.7736				21.1%	
HP -a/c 0.35+10%F (1)	12.0040		6.24	2017.4582	2014.4401	1798.40	0.734	17.7%	17.77%
HP -a/c 0.35+10%F (2)	11.9850		6.22	2011.3143				17.9%	
HP -a/c 0.35+10%F (3)	11.9950		6.23	2014.5479				17.8%	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (1)	11.9985		6.23	2015.6797	2024.2488	1800.90	0.737	17.5%	17.18%
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (2)	12.0450		6.28	2030.716				16.9%	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (3)	12.0315		6.27	2026.3506				17.1%	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (1)	11.9680		6.20	2005.8171	2000.6972	1802.40	0.738	17.8%	18.03%
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (2)	11.9495		6.18	1999.8349				18.1%	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (3)	11.9390		6.17	1996.4396				18.2%	

Anexo 10. Densidad y porosidad en estado fresco ASTM C1688 / ASTM C192

NORMA:	ASTM C1688 / ASTM C192									
DÍAMETRO	100.00	**ALTURA**	200.00	mm						
VOLÚMEN		0.00157	m^3							
Identificación	**M. Molde**	**M. Molde+M. Hormigón P.**		**Masa Hormigón P.**	**Densidad**	**Densidad Promedio**	**Densidad Teórica**	**Vol. Absoluto**	**Porosidad**	**Porosidad Promedio**
		kg		**kg**	**kg/m³**	**kg/m³**	**kg/m³**	**m³**	**%**	**%**
HP -a/c 0.30+10%F (1)	7.6635	10.5530		2.890	1839.513	1819.831	1784.99	0.7207	25.733%	26.53%
HP -a/c 0.30+10%F (2)	7.6720	10.4910		2.819	1794.631				27.545%	
HP -a/c 0.30+10%F (3)	7.6900	10.4970		2.807	1786.992				27.853%	
HP -a/c 0.30+10%F (4)	7.7340	10.5595		2.826	1798.769				27.378%	
HP -a/c 0.30+10%F (5)	7.6680	10.5615		2.894	1842.059				25.630%	
HP -a/c 0.30+10%F (6)	7.6780	10.5950		2.917	1857.020				25.026%	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (1)	7.7195	10.5960		2.877	1831.237	1827.311	1787.49	0.7234	25.889%	26.05%
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (2)	7.7000	10.5135		2.814	1791.130				27.512%	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (3)	7.7230	10.5475		2.825	1798.133				27.229%	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (4)	7.6725	10.5790		2.907	1850.335				25.116%	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (5)	7.7340	10.6790		2.945	1874.845				24.124%	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (6)	7.7000	10.5560		2.856	1818.186				26.417%	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (1)	7.6455	10.5010		2.856	1817.868	1804.297	1788.99	0.7251	26.324%	26.87%
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (2)	7.5750	10.3971		2.822	1796.605				27.186%	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (3)	7.6800	10.4530		2.773	1765.347				28.453%	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (4)	7.6820	10.5195		2.838	1806.409				26.789%	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (5)	7.6680	10.4695		2.802	1783.490				27.717%	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (6)	7.6770	10.5925		2.916	1856.065				24.776%	

HP -a/c 0.35+10%F (1)	7.7030	10.7075	3.005	1912.724	1890.389	1798.40	0.7341	21.926%	22.838%
HP -a/c 0.35+10%F (2)	7.7675	10.7090	2.942	1872.617				23.564%	
HP -a/c 0.35+10%F (3)	7.7010	10.6625	2.962	1885.349				23.044%	
HP -a/c 0.35+10%F (4)	7.6815	10.7250	3.044	1937.552				20.913%	
HP -a/c 0.35+10%F (5)	7.6815	10.6565	2.975	1893.944				22.693%	
HP -a/c 0.35+10%F (6)	7.7365	10.6270	2.891	1840.149				24.889%	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (1)	7.6445	10.6155	2.971	1891.397	1894.156	1800.90	0.7368	22.616%	22.503%
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (2)	7.6630	10.6205	2.958	1882.803				22.967%	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (3)	7.6450	10.6225	2.978	1895.535				22.446%	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (4)	7.7045	10.6310	2.927	1863.068				23.775%	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (5)	7.7670	10.7625	2.996	1906.995				21.977%	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (6)	7.6770	10.7010	3.024	1925.138				21.235%	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (1)	7.7030	10.6160	2.913	1854.473	1873.996	1802.40	0.7385	24.020%	23.23%
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (2)	7.7285	10.7120	2.984	1899.355				22.181%	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (3)	7.7685	10.7040	2.936	1868.797				23.433%	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (4)	7.7195	10.6015	2.882	1834.738				24.828%	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (5)	7.6725	10.6750	3.003	1911.451				21.685%	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (6)	7.703	10.6485	2.946	1875.164				23.172%	

Anexo 11. Densidad y porosidad en estado endurecido ASTM C1754

DATOS		
NORMA	ASTM C1754	
Densidad del agua (ρw)	998.5	kg/m^3
K	1273240	$(mm^3\ kg)/(m^3\ g)$

Identificación	Masa 1 g	Masa 2 g	Masa 3 g	% Variación 1	% Variación 2 (<0.5%)	Diámetro promedio (mm)	Longitud promedio (mm)	M. seca (g)	M. Canastilla. Agua (g)	M. C. Agua+M. Muestra (g)	M. Sumergida Muestra (g)	Densidad (kg/m^3)	Densidad promedio (kg/m^3)	Porosidad (%)	Porosidad Promedio (%)
HP -a/c 0.30+10%F (1)	2817.5	2795.5	2784.5	0.787%	0.395%	98.75	201.00	2784.5	1009.50	2686	1676.5	1808.78618		27.917%	
HP -a/c 0.30+10%F (2)	2779.0	2759.0	2752.5	0.725%	0.236%	98.50	200.67	2752.5	1007.50	2658	1650.5	1800.07211		27.823%	
HP -a/c 0.30+10%F (3)	2761.0	2742.0	2730.5	0.693%	0.421%	98.75	197.67	2730.5	1006.50	2649	1642.5	1803.61902	1805.046	28.025%	27.964%
HP -a/c 0.30+10%F (4)	2768.0	2743.5	2730.0	0.893%	0.495%	98.00	200.00	2730.0	1003.00	2650.5	1647.5	1809.63411		28.137%	
HP -a/c 0.30+10%F (5)	2804.5	2779.0	2766.0	0.918%	0.470%	98.75	200.00	2766.0	1002.50	2667.5	1665	1805.75259		28.014%	
HP -a/c 0.30+10%F (6)	2790.5	2764.5	2751.5	0.940%	0.472%	98.50	200.33	2751.5	1000.00	2652	1652	1802.41218		27.867%	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (1)	2831.5	2807.5	2796.5	0.855%	0.393%	98.75	201.17	2796.5	1002.00	2682.5	1680.5	1815.07623		27.457%	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (2)	2767.5	2745.5	2737.0	0.801%	0.311%	98.25	198.67	2737.0	1000.00	2641	1641	1817.16745		27.124%	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (3)	2792.5	2768.0	2756.0	0.885%	0.435%	98.50	199.67	2756.0	998.50	2648	1649.5	1811.38788	1813.239	27.166%	27.406%
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (4)	2796.5	2770.0	2757.0	0.957%	0.472%	98.50	200.00	2757.0	998.00	2653	1655	1809.02506		27.583%	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (5)	2835.0	2815.5	2806.5	0.693%	0.321%	99.00	201.00	2806.5	997.50	2685.5	1688	1813.88134		27.601%	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (6)	2806.0	2780.5	2767.5	0.917%	0.470%	98.50	200.33	2767.5	997.00	2659.5	1662.5	1812.89322		27.507%	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (1)	2760.0	2734.0	2721.5	0.951%	0.459%	98.50	200.00	2721.5	1001.00	2641.5	1640.5	1785.73148		28.963%	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (2)	2768.5	2745.5	2742.5	0.838%	0.109%	98.75	200.33	2742.5	1000.00	2654.5	1654.5	1787.43182		28.983%	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (3)	2732.0	2712.5	2701.0	0.719%	0.426%	97.75	200.67	2701.0	999.00	2629	1630	1793.60204	1791.612	28.773%	29.006%
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (4)	2772.5	2748.5	2736.5	0.873%	0.439%	98.50	200.00	2736.5	998.50	2653.5	1655	1795.57384		28.930%	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (5)	2756.5	2726.0	2713.0	1.119%	0.479%	98.00	201.00	2713.0	998.00	2634	1636	1789.41824		28.857%	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (6)	2845.5	2814.0	2800.5	1.119%	0.482%	99.25	201.33	2800.5	997.00	2701.5	1704.5	1797.91492		29.531%	

HP -a/c 0.35+10%F (1)	2904.0	2869.0	2855.0	1.220%	0.490%	98.75	200.33	2855.0	1000.50	2735	1734.5	1860.754		26.861%	
HP -a/c 0.35+10%F (2)	2871.5	2847.0	2835.0	0.861%	0.423%	98.50	200.33	2835.0	999.50	2713	1713.5	1857.11013		26.424%	
HP -a/c 0.35+10%F (3)	2836.0	2810.0	2797.0	0.925%	0.465%	97.50	200.33	2797.0	999.00	2695	1696	1869.99434	1862.949	26.280%	26.509%
HP -a/c 0.35+10%F (4)	2896.0	2864.0	2851.0	1.117%	0.456%	98.50	200.00	2851.0	998.50	2732.5	1734	1870.70383		26.597%	
HP -a/c 0.35+10%F (5)	2855.5	2825.5	2812.5	1.062%	0.462%	97.50	202.00	2812.5	998.00	2700.5	1702.5	1864.8427		26.290%	
HP -a/c 0.35+10%F (6)	2865.0	2839.0	2830.0	0.916%	0.318%	98.00	202.33	2830.0	997.50	2709	1711.5	1854.28772		26.603%	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (1)	2866.5	2838.0	2824.5	1.004%	0.478%	98.00	200.67	2824.5	1001.50	2702.5	1701	1866.05511		25.663%	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (2)	2881.0	2853.0	2840.0	0.981%	0.458%	98.50	199.33	2840.0	1000.00	2717	1717	1869.71849		25.956%	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (3)	2865.0	2837.0	2824.0	0.987%	0.460%	98.00	200.00	2824.0	999.00	2709	1710	1871.94386	1867.597	26.045%	25.910%
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (4)	2896.0	2869.5	2856.0	0.924%	0.473%	98.50	201.00	2856.0	998.00	2725	1727	1864.66131		26.178%	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (5)	2887.0	2860.0	2846.0	0.944%	0.492%	98.50	200.00	2846.0	998.50	2717	1718.5	1867.42304		25.907%	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (6)	2885.5	2857.5	2843.5	0.980%	0.492%	98.50	200.00	2843.5	997.50	2710.5	1713	1865.78265		25.710%	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (1)	2808.5	2781.5	2768.5	0.971%	0.470%	97.75	200.00	2768.5	1002.00	2676.5	1674.5	1844.55358		27.001%	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (2)	2879.0	2848.0	2834.0	1.088%	0.494%	98.75	200.33	2834.0	1001.00	2719.5	1718.5	1847.06719		27.188%	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (3)	2827.0	2797.5	2784.0	1.055%	0.485%	98.00	200.00	2784.0	1000.50	2689.5	1689	1845.42907	1845.045	27.307%	27.170%
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (4)	2820.5	2801.5	2790.5	0.678%	0.394%	98.00	200.00	2790.5	999.00	2689.5	1690.5	1849.73772		26.975%	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (5)	2868.0	2838.0	2824.0	1.057%	0.496%	98.75	200.00	2824.0	998.50	2711.5	1713	1843.61725		0.27360632	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (6)	2845.0	2817.0	2804.0	0.994%	0.464%	98.50	200.00	2804.0	998.00	2694	1696	1839.86444		0.27188579	

Anexo 12. Permeabilidad - Conductividad hidráulica.

DATOS		
Diámetro (Tubo)	10.16	cm
A2 (Área Tubo)	81.0732	cm^2
h1	29	cm
h2	7	cm

Identificación	Tiempo (s)			Tiempo Promedio (s)	Diámetro promedio (cm)	Longitud promedio (cm)	Área de la muestra (cm^2)	K cm/s	K Promedio cm/s
	t1	t2	t3						
HP -a/c 0.30+10%F (1)	27.99	28.24	27.63	27.953	9.875	20.100	76.589	0.419	0.462
HP -a/c 0.30+10%F (2)	22.27	21.89	21.48	21.880	9.850	20.067	76.201	0.532	
HP -a/c 0.30+10%F (3)	23.64	23.07	23.52	23.410	9.875	19.767	76.589	0.492	
HP -a/c 0.30+10%F (4)	28.07	27.85	28.12	28.013	9.800	20.000	75.430	0.410	
HP -a/c 0.30+10%F (5)	26.04	25.9	26.19	26.043	9.875	20.000	76.589	0.448	
HP -a/c 0.30+10%F (6)	25.83	24.25	24.17	24.750	9.850	20.033	76.201	0.470	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (1)	29.91	30.05	30.21	30.057	9.875	20.117	76.589	0.390	0.400
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (2)	30.57	30.15	29.77	30.163	9.825	19.867	75.815	0.380	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (3)	28.15	27.98	28.23	28.120	9.850	19.967	76.201	0.412	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (4)	27.68	28.01	27.57	27.753	9.850	20.000	76.201	0.418	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (5)	29.55	29.77	29.63	29.650	9.900	20.100	76.977	0.397	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (6)	28.81	29.07	28.97	28.950	9.850	20.033	76.201	0.402	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (1)	20.37	20.13	20.94	20.480	9.850	20.000	76.201	0.567	0.542
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (2)	19.2	19.98	19.62	19.600	9.875	20.033	76.589	0.596	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (3)	23.12	22.21	21.65	22.327	9.775	20.067	75.045	0.514	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (4)	22.65	22.94	22.44	22.677	9.850	20.000	76.201	0.512	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (5)	21.25	20.87	21.48	21.200	9.800	20.100	75.430	0.545	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (6)	23.64	22.72	22.23	22.863	9.925	20.133	77.366	0.519	

HP -a/c 0.35+10%F (1)	29.25	29.8	30.18	29.743	9.875	20.033	76.589	0.393	0.372
HP -a/c 0.35+10%F (2)	27.85	28.82	28.72	28.463	9.850	20.033	76.201	0.408	
HP -a/c 0.35+10%F (3)	33.02	33.73	33.14	33.297	9.750	20.033	74.662	0.342	
HP -a/c 0.35+10%F (4)	35.02	34.81	34.97	34.933	9.850	20.000	76.201	0.332	
HP -a/c 0.35+10%F (5)	33.94	32.55	32.17	32.887	9.750	20.200	74.662	0.349	
HP -a/c 0.35+10%F (6)	28.49	28.68	28.83	28.667	9.800	20.233	75.430	0.405	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (1)	33.87	34.08	34.15	34.033	9.800	20.067	75.430	0.339	0.335
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (2)	36.94	36.55	36.17	36.553	9.850	19.933	76.201	0.316	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (3)	39.24	38.22	38.28	38.580	9.800	20.000	75.430	0.298	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (4)	32.08	32.38	32.49	32.317	9.850	20.100	76.201	0.361	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (5)	33.95	33.76	33.83	33.847	9.850	20.000	76.201	0.343	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (6)	32.99	32.63	32.57	32.730	9.850	20.000	76.201	0.355	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (1)	26.47	26.34	26.29	26.367	9.775	20.000	75.045	0.433	0.411
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (2)	25.67	25.36	25.89	25.640	9.875	20.033	76.589	0.456	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (3)	30.78	30.92	30.81	30.837	9.800	20.000	75.430	0.372	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (4)	29.02	29.75	29.73	29.500	9.800	20.000	75.430	0.389	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (5)	28.93	29.06	28.99	28.993	9.875	20.000	76.589	0.402	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (6)	28.04	28.17	28.11	28.107	9.850	20.000	76.201	0.413	

Anexo 13. Resistencia a compresión.

Identificación	Diámetro Promedio (cm)	Altura Promedio (cm)	Área (cm2)	Carga Máxima(kN)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo Promedio (MPa)	Deformación (%)	Deformación promedio (%)
HP -a/c 0.30+10%F (1)	9.10	20.10	65.04	51.63	7.94		3.136	
HP -a/c 0.30+10%F (2)	9.30	19.87	67.93	53.88	7.93		4.661	
HP -a/c 0.30+10%F (3)	8.80	19.87	60.82	68.59	11.28		3.347	
HP -a/c 0.30+10%F (4)	9.10	19.80	65.04	66.89	10.28		4.073	
HP -a/c 0.30+10%F (5)	9.15	19.82	65.76	48.01	7.30	8.597	5.209	4.477
HP -a/c 0.30+10%F (6)	9.00	19.72	63.62	49.23	7.74		6.172	
HP -a/c 0.30+10%F (7)	9.20	19.82	66.48	62.96	9.47		5.562	
HP -a/c 0.30+10%F (8)	9.00	19.73	63.62	49.99	7.86		4.106	
HP -a/c 0.30+10%F (9)	9.20	19.77	66.48	50.33	7.57		4.031	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (1)	9.2	20.00	66.48	59.53	8.96		3.136	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (2)	9.45	19.93	70.14	60.38	8.61		3.669	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (3)	9.25	20.07	67.20	53.88	8.02		4.346	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (4)	9.3	19.87	67.93	55.73	8.20		3.733	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (5)	9.35	19.90	68.66	61.81	9.00	9.138	4.956	4.395
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (6)	9.35	20.07	68.66	81.13	11.82		3.988	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (7)	9.15	19.90	65.76	74.28	11.30		5.242	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (8)	9.1	19.45	65.04	53.55	8.23		4.525	
HP -a/c 0.30+10%F+2.5 PSM (9)	9.15	20.00	65.76	53.31	8.11		5.964	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (1)	9.75	19.93	74.66	65.99	8.84		3.883	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (2)	9.40	19.93	69.40	56.44	8.13		4.413	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (3)	9.55	20.03	71.63	50.58	7.06		2.754	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (4)	9.30	20.00	67.93	48.17	7.09		3.953	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (5)	9.85	20.20	76.20	80.03	10.50	8.328	4.176	4.195
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (6)	9.65	19.93	73.14	73.71	10.08		3.446	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (7)	9.40	19.90	69.40	46.96	6.77		3.652	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (8)	9.80	19.97	75.43	74.40	9.86		4.316	
HP -a/c 0.30+10%F+4.0 PSM (9)	9.25	19.60	67.20	44.47	6.62		7.166	

HP -a/c 0.35+10%F (1)	9.40	20.13	69.40	71.70	10.33		4.961	
HP -a/c 0.35+10%F (2)	8.85	20.03	61.51	69.00	11.22		4.434	
HP -a/c 0.35+10%F (3)	9.50	20.10	70.88	77.07	10.87		4.930	
HP -a/c 0.35+10%F (4)	8.50	20.27	56.75	69.05	12.17		4.757	
HP -a/c 0.35+10%F (5)	9.05	19.90	64.33	87.39	13.59	11.229	5.037	4.803
HP -a/c 0.35+10%F (6)	9.25	19.73	67.20	71.72	10.67		5.659	
HP -a/c 0.35+10%F (7)	9.45	19.80	70.14	73.47	10.47		4.548	
HP -a/c 0.35+10%F (8)	8.95	19.80	62.91	69.67	11.07		4.525	
HP -a/c 0.35+10%F (9)	8.50	19.93	56.75	60.49	10.66		4.375	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (1)	9.20	20.03	66.48	70.89	10.66		3.785	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (2)	9.05	20.13	64.33	72.19	11.22		4.067	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (3)	9.05	20.00	64.33	73.38	11.41		4.244	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (4)	9.10	20.00	65.04	70.71	10.87		4.906	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (5)	9.00	20.00	63.62	65.14	10.24	11.723	5.052	4.660
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (6)	9.15	19.87	65.76	64.56	9.82		4.000	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (7)	9.05	20.10	64.33	73.00	11.35		5.475	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (8)	8.70	19.90	59.45	86.11	14.49		5.585	
HP -a/c 0.35+10%F+2.5 PSM (9)	8.85	19.90	61.51	95.04	15.45		4.829	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (1)	9.05	20.10	64.33	59.91	9.31		4.167	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (2)	9.00	20.17	63.62	65.88	10.36		3.430	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (3)	9.20	20.10	66.48	78.67	11.83		3.959	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (4)	9.05	20.17	64.33	65.61	10.20		5.388	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (5)	8.70	19.90	59.45	68.76	11.57	10.775	3.735	4.191
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (6)	9.00	19.97	63.62	74.61	11.73		4.502	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (7)	8.7	19.97	59.45	73.35	12.34		3.412	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (8)	9.1	19.87	65.04	67.43	10.37		4.438	
HP -a/c 0.35+10%F+4.0 PSM (9)	9.05	20.03	64.33	59.65	9.27		4.691	

Anexo 14. Diagramas “Carga vs Desplazamiento” y “Esfuerzo vs Desplazamiento”

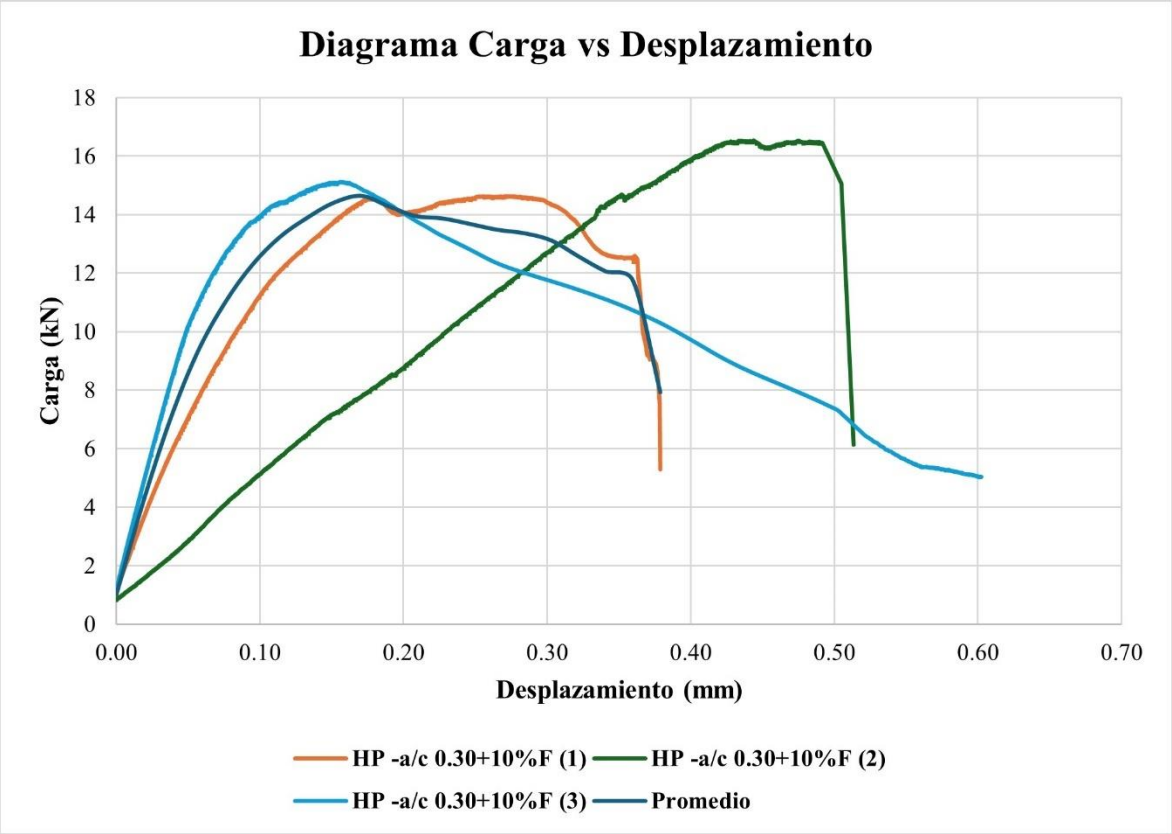


Diagrama “Carga vs Desplazamiento” HP -a/c 0.30+10%F. *Se descarta la curva (2).

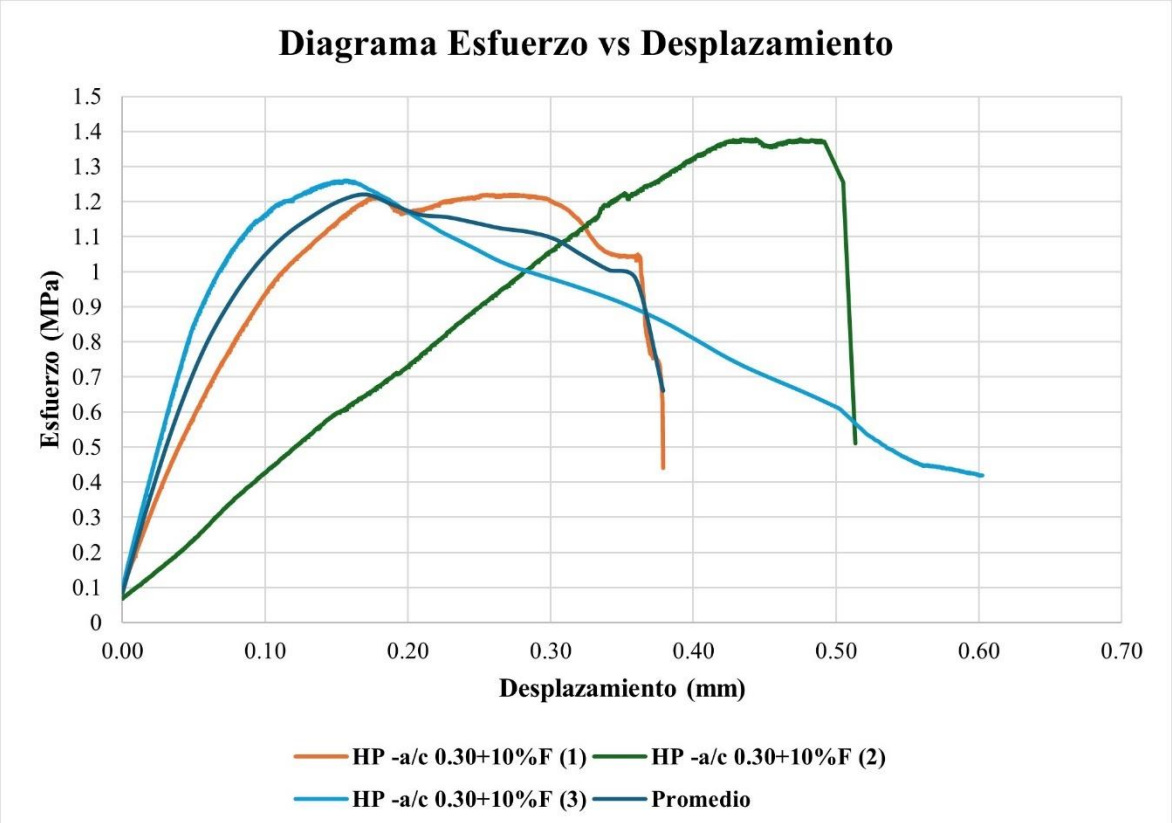


Diagrama “Esfuerzo vs Desplazamiento” HP -a/c 0.30+10%F. *Se descarta la curva (2).

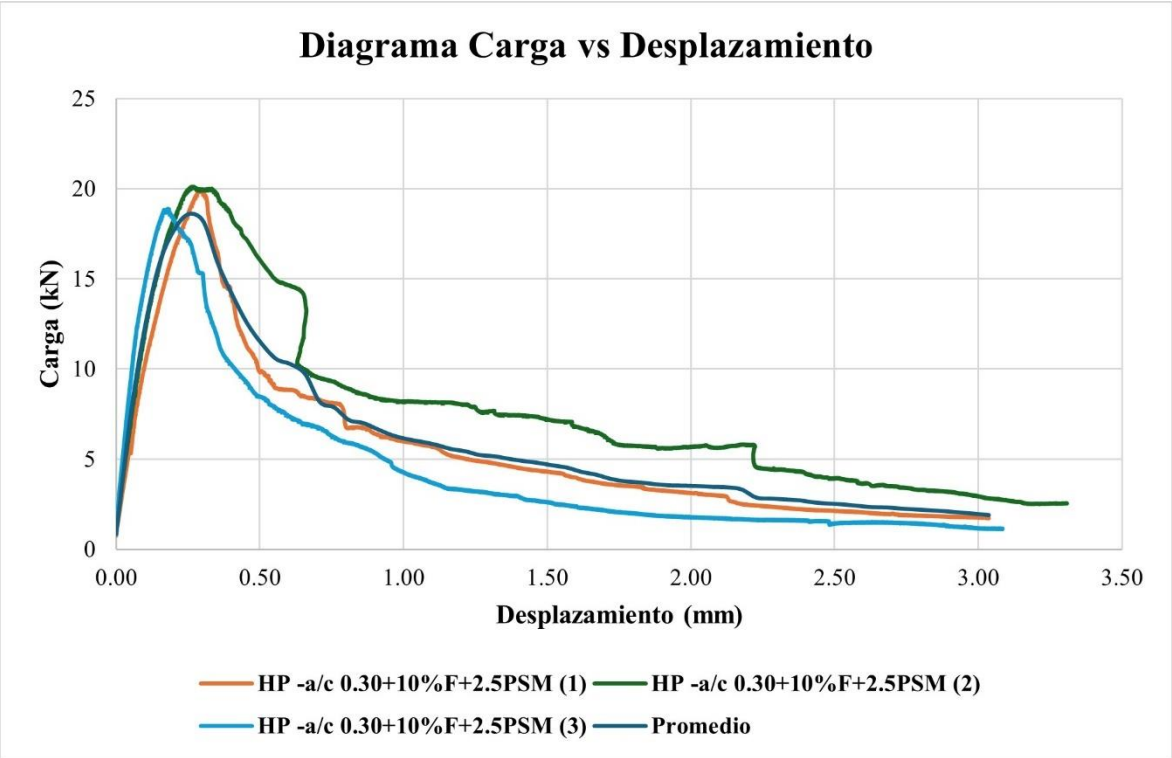


Diagrama "Carga vs Desplazamiento" HP -a/c 0.30+10%F+2.5PSM.

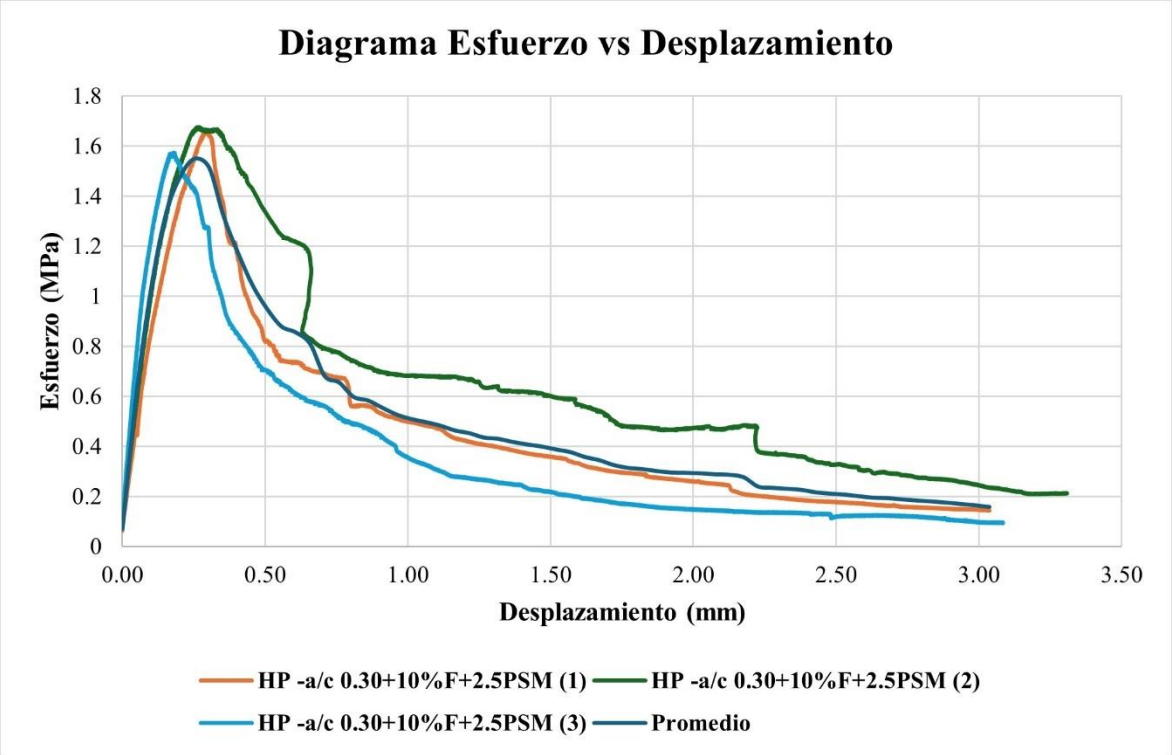


Diagrama "Esfuerzo vs Desplazamiento" HP -a/c 0.30+10%F+2.5PSM.

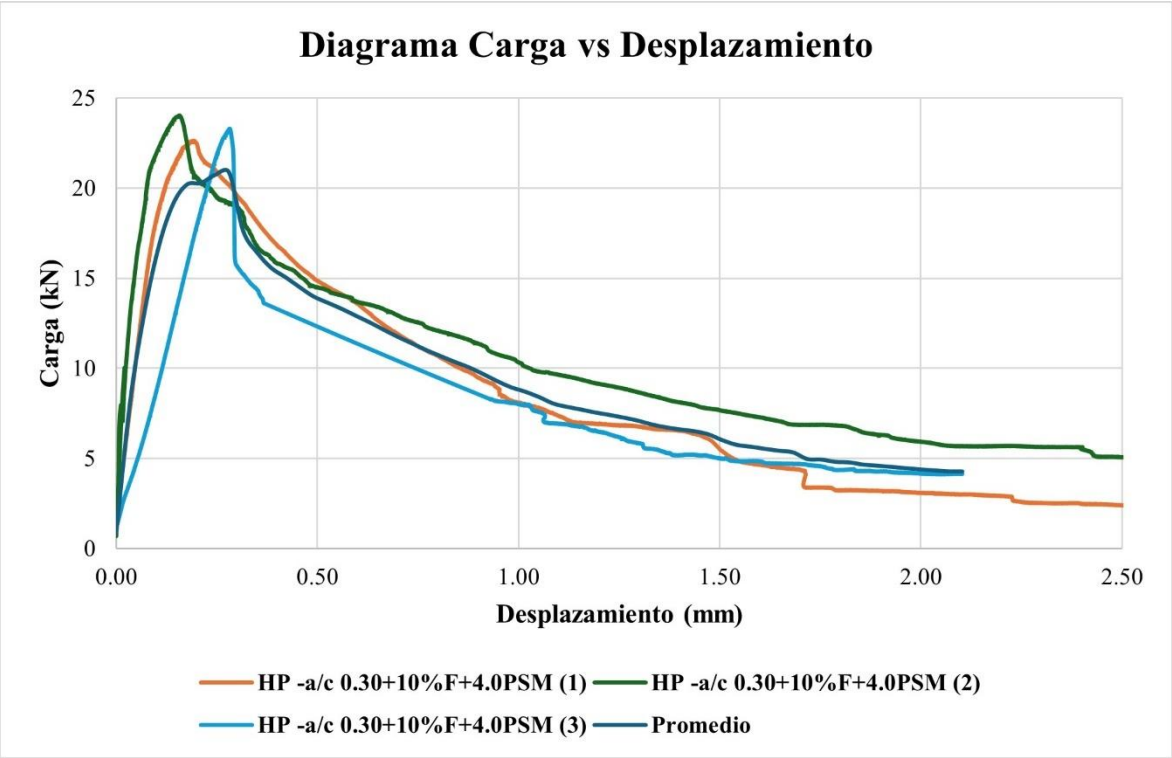


Diagrama "Carga vs Desplazamiento" HP -a/c 0.30+10%F+4.0PSM.

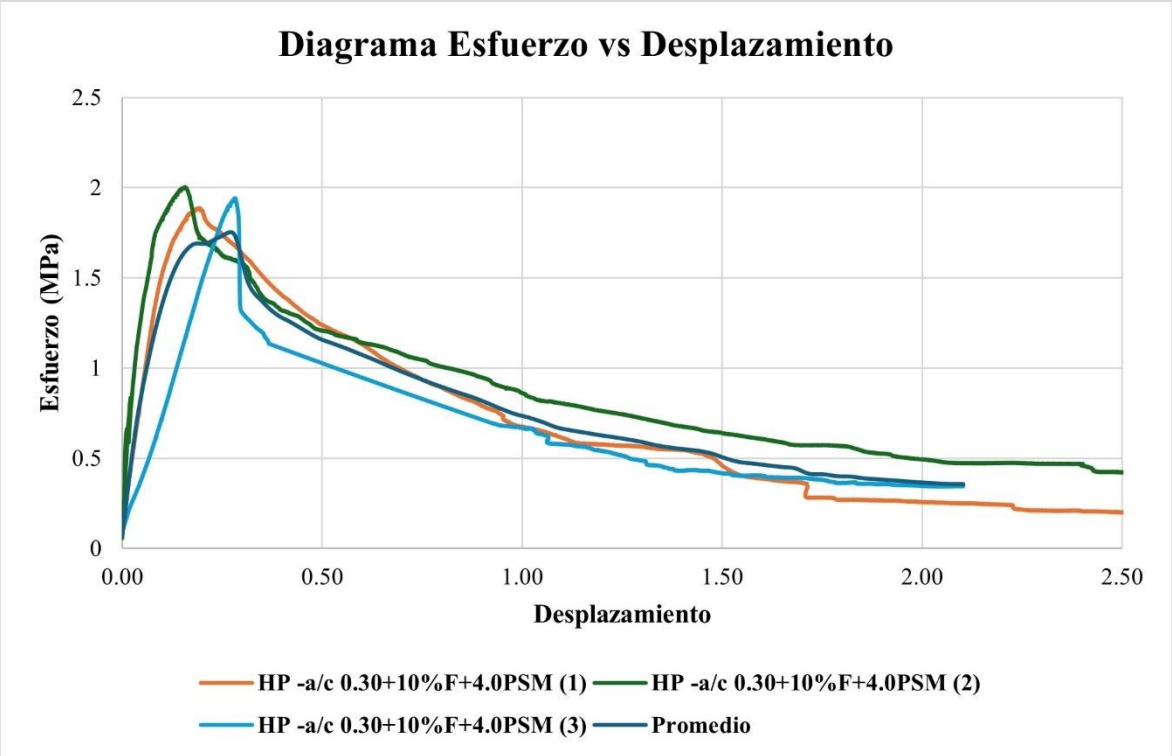


Diagrama "Esfuerzo vs Desplazamiento" HP -a/c 0.30+10%F+4.0PSM.

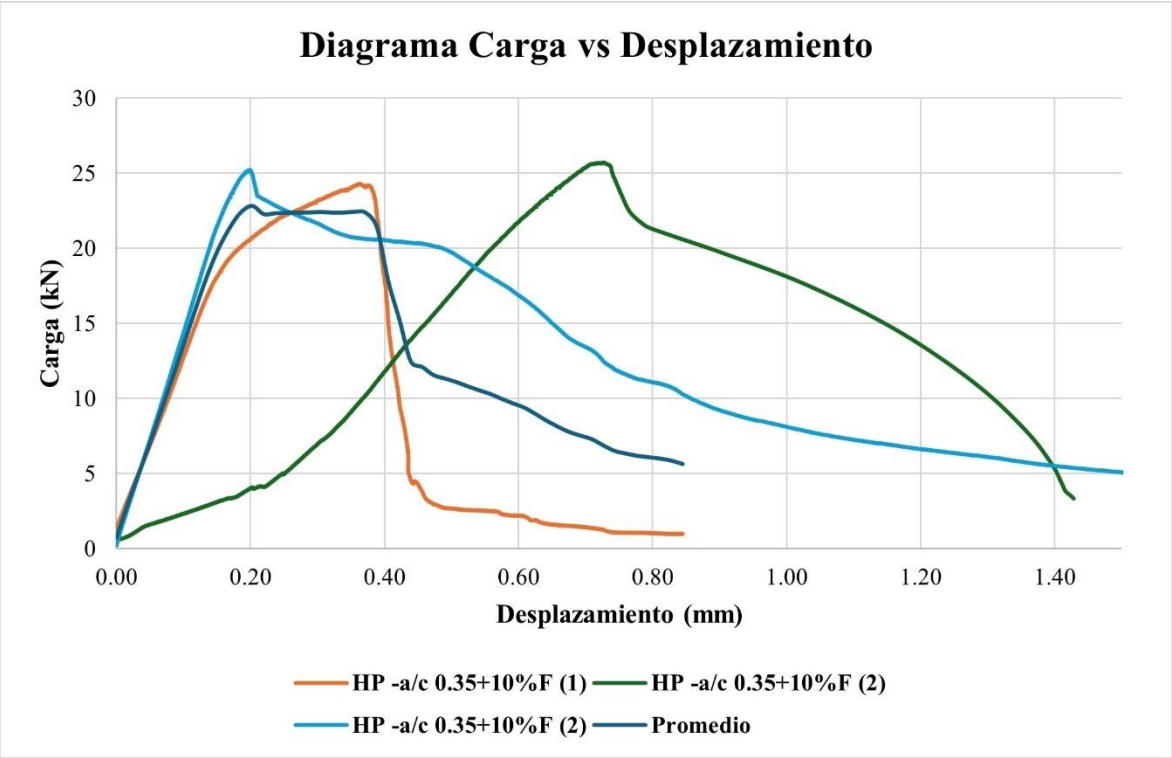


Diagrama "Carga vs Desplazamiento" HP -a/c 0.35+10%F.*Se descarta la curva (2).

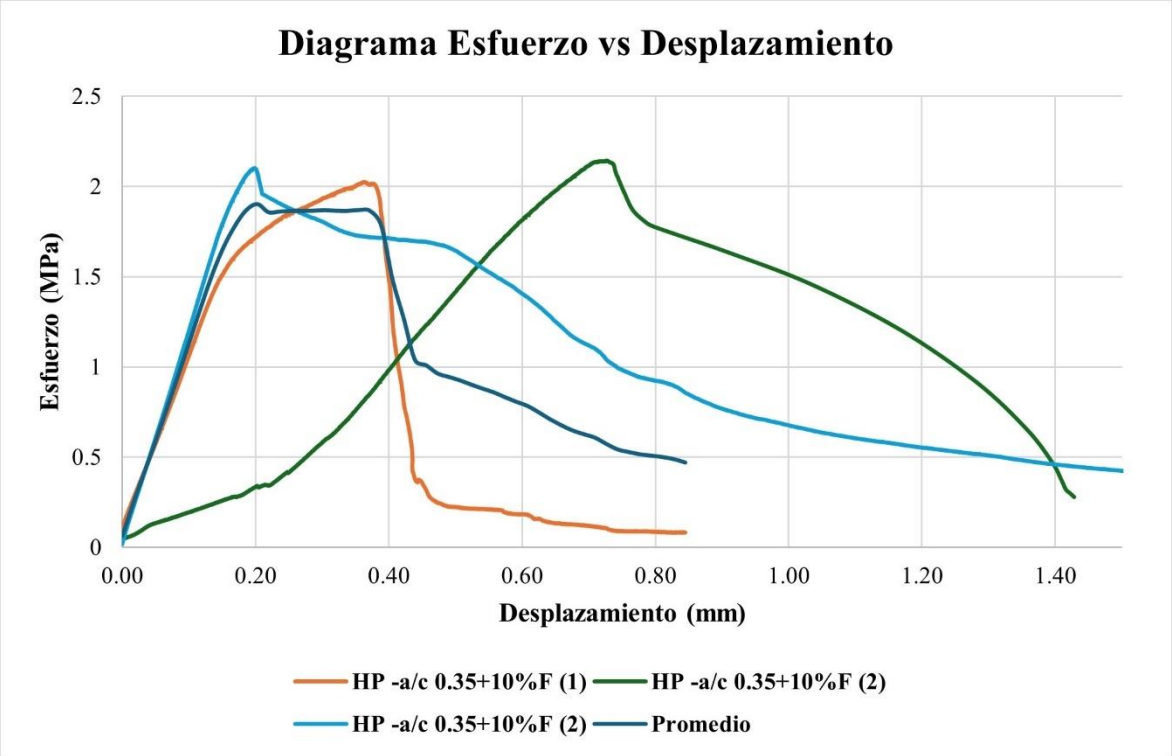


Diagrama "Esfuerzo vs Desplazamiento" HP -a/c 0.35+10%F. *Se descarta la curva (2).

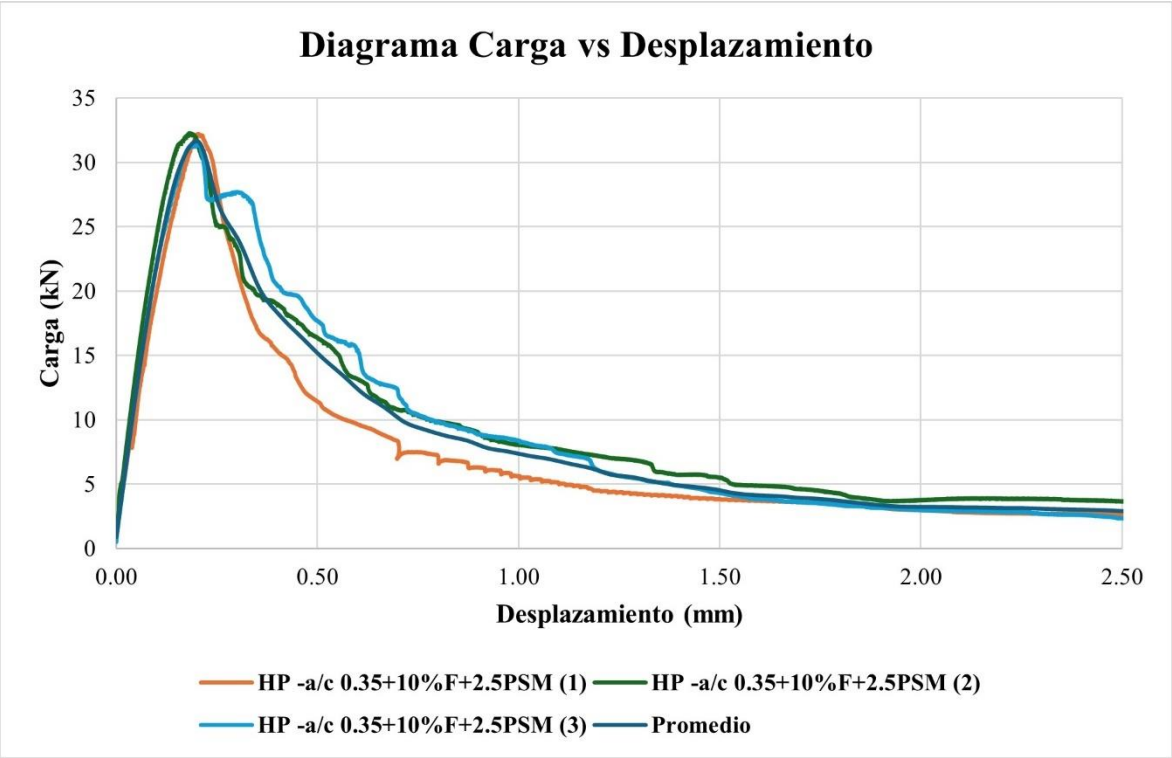


Diagrama "Carga vs Desplazamiento" HP -a/c 0.35+10%F+2.5PSM.

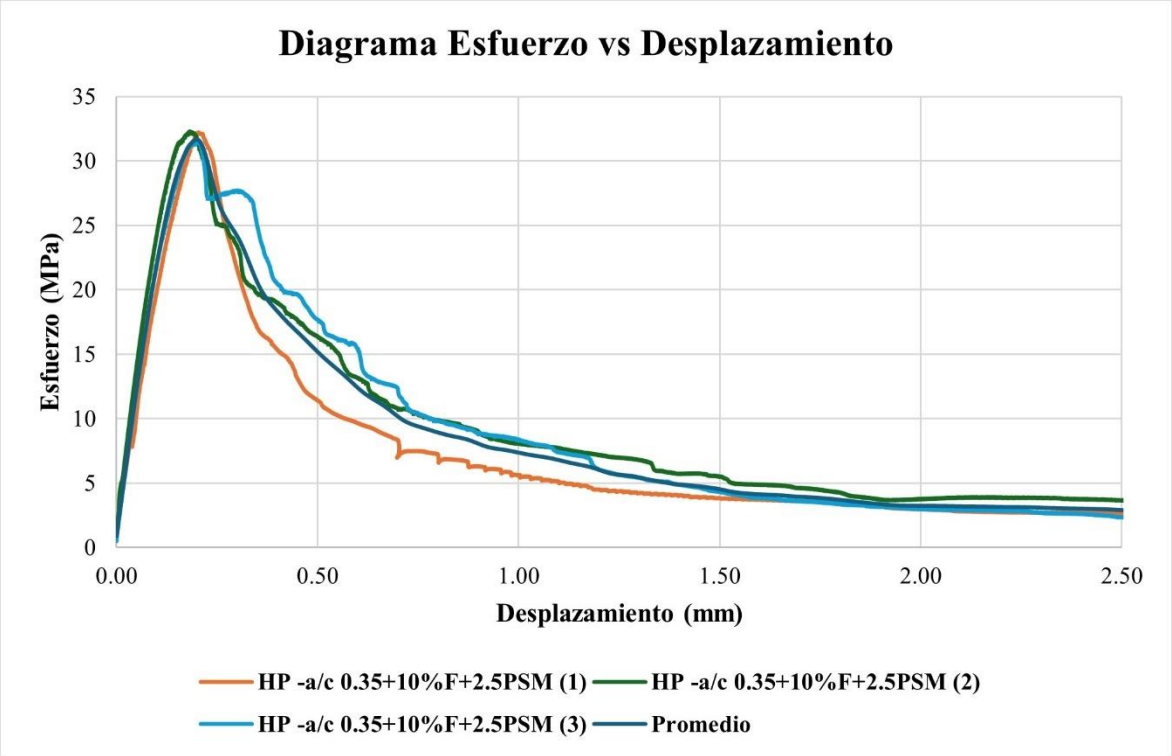


Diagrama "Esfuerzo vs Desplazamiento" HP -a/c 0.35+10%F+2.5PSM.

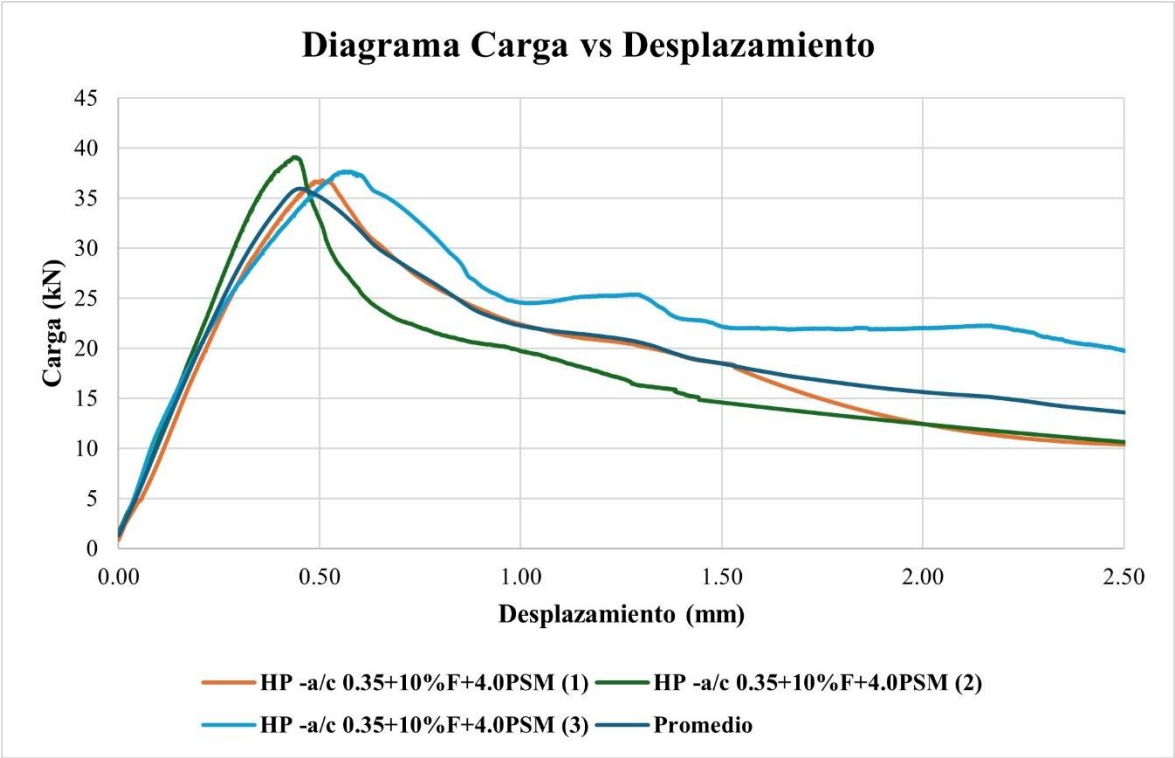


Diagrama "Carga vs Desplazamiento" HP -a/c 0.35+10%F+4.0PSM.

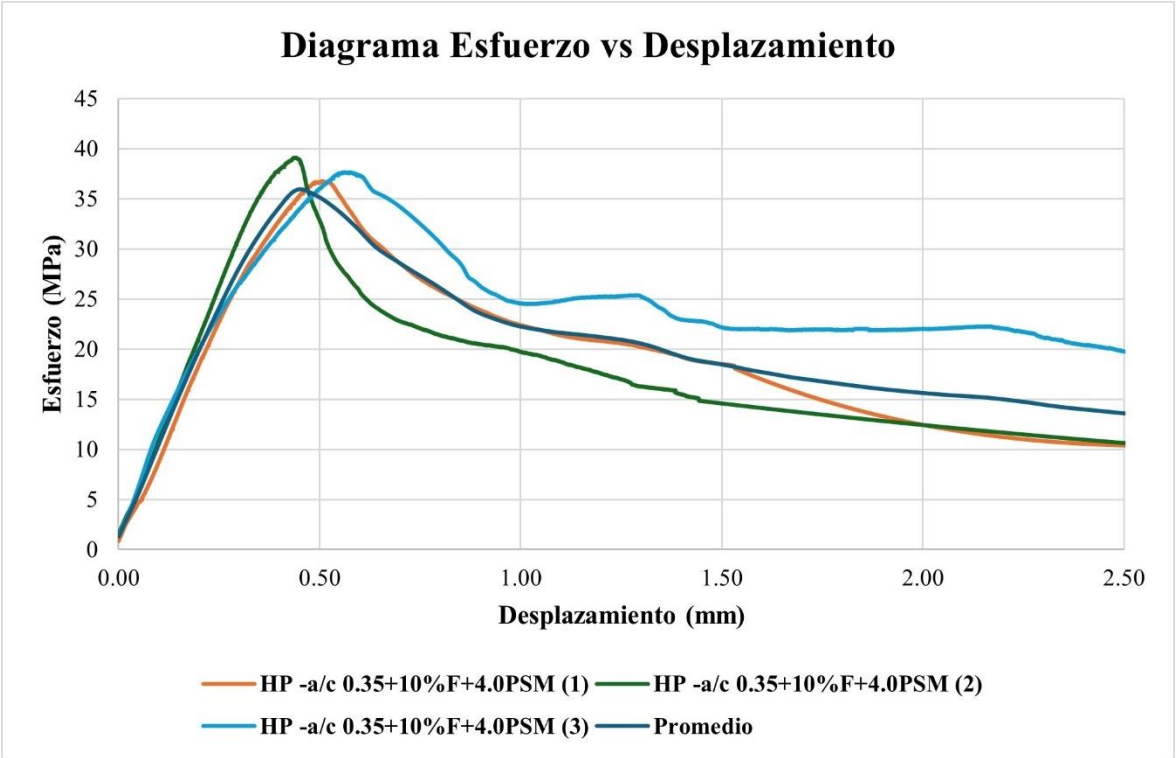


Diagrama "Esfuerzo vs Desplazamiento" HP -a/c 0.35+10%F+4.0PSM.

Anexo 15. Resistencia a corte puro.

DATOS		
Largo	150	mm
Ancho	80	mm
Área de corte	12000	mm^2

Identificación	Carga Máxima(kN)	Esfuerzo (MPa)	# Fibras Promedio
HP -a/c 0.30+10%F	14.64	1.22	0.00
HP -a/c 0.30+10%F+2.5FPL	18.60	1.55	17.00
HP -a/c 0.30+10%F+4.0FPL	20.88	1.74	24.00
HP -a/c 0.35+10%F	22.83	1.90	0.00
HP -a/c 0.35+10%F+2.5FPL	31.60	2.63	18.00
HP -a/c 0.35+10%F+4.0FPL	35.88	2.99	23.00

Anexo 16. Anexo Fotográfico

Agregado Mina	Tamizado del agregado
	

Elaboración de la mezcla





Ensayo de asentamiento	Densidad y porosidad en estado fresco ASTM C1688
	
Probetas cilíndricas	**Probetas prismáticas**
	
Elaboración cilindros	**Elaboración vigas**
	

Densidad Fresca	Curado de cilindros y vigas
	

Densidad y porosidad endurecia







Ensayo a compresión	Ensayo a corte / Push-Off
	

Preparación de especímenes – Ensayo Push-Off





Modos de falla-Ensayo Push-Off



