

CAPÍTULO I  
INTRODUCCIÓN

# CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

## 1.1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el cambio climático ha tomado gran importancia a nivel mundial, pues genera destrucción y pérdidas en la infraestructura de las ciudades, siendo más vulnerables los países con economías pequeñas como los de América Latina y entre ellos Bolivia.

A pesar de que, en el diseño y ejecución de pavimentos convencionales, se implementan sistemas de drenaje (canaletas, badenes, cunetas, alcantarillas), estos son propensos a fallar y no pueden proporcionar una solución final, debido a que el agua proveniente de precipitaciones ocasiona problemas en las salidas de descarga natural (quebradas y ríos). Formando crecidas repentinas del nivel del agua, provocando que las zonas de descargas sean incapaces de drenar el agua dando origen a inundaciones en zonas más bajas.

Por lo que en varios países como ser: Perú, Chile, Brasil, Estados Unidos optaron por buscar otras alternativas, ya que las soluciones usuales en la construcción de la infraestructura vial de grandes concentraciones urbanas están afectadas por una situación incómoda cuando se genera una película de agua estancada en la superficie del pavimento, fenómeno que se conoce como hidropneumático, mismo que genera pérdida de adherencia entre las llantas y la superficie del pavimento e inestabilidad de contacto entre estos.

Este trabajo de investigación, describe algunos antecedentes del uso del concreto u hormigón poroso como capa de rodadura para tráfico pesado, en experiencias de otros países. Se plantea la situación problemática del trabajo de investigación, y se trabaja sobre la base de los objetivos, alcance y justificación misma que conlleva y motiva a realizar la evaluación técnica de pavimento de concreto poroso de altas prestaciones como capa de rodadura para tráfico pesado. Los antecedentes bibliográficos son indispensables para poder abordar conceptos relacionados a la técnica del hormigón poroso como capa de rodadura.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN.**

En nuestro medio se ve la cantidad de poca transitabilidad por los días de lluvias siendo que algunas avenidas se convierten en ríos y conllevan a privarse de salir de los hogares, oficinas, etc.

Viendo este tipo de incidentes que se desata en la ciudad, se propone usar pavimento poroso de altas prestaciones en algunas vías de la ciudad, para así tener un mejor drenaje ayudando que las aguas puedan ser redirigidas y evitar hidroplaneo.

Un pavimento de concreto poroso de altas prestaciones, es el resultado de muchos años de investigación en el campo de los materiales y una propuesta de solución a muchos problemas que actualmente tienen los pavimentos de estructura porosa y los pavimentos en general.

En el proceso de control de calidad se debe llegar a obtener:

La absorción e irradiación de calor a la atmósfera, el ruido de rodadura del vehículo a velocidades superiores a 80 km/hr, las proyecciones de agua de los vehículos precedentes con la consiguiente disminución del riesgo de circulación de lluvia, el riesgo de accidentes por falta de resistencia al deslizamiento (hidroplaneo, placas de hielo), la distancia de frenado especialmente en condiciones ambientales adversas, la probabilidad de deslumbramiento por reflexión de la luz sobre películas de agua superficial, impacto ambiental, la seguridad pasiva de los usuarios, mejora de la calidad de vida de los habitantes de las zonas próximas a las carreteras, entre otras.

De ahí que nace la necesidad de estudiar al pavimento poroso o permeable de altas prestaciones como capa de rodadura para tráfico pesado en nuestro medio.

## **1.3. DISEÑO TEÓRICO.**

### **1.3.1. Planteamiento del problema.**

#### **1.3.1.1. Situación problemática**

En las últimas décadas se vienen presentando problemas en la evacuación de aguas pluviales y en las condiciones de escurrimiento aguas abajo (arrastre de materiales sólidos y varios contaminantes depositados en las calles), principalmente por el crecimiento

acelerado de las ciudades, asociado al amplio uso de pavimentos convencionales (impermeables). El uso indiscriminado de estas estructuras en áreas urbanas incrementa notablemente el volumen y el caudal del escurrimiento superficial, aumentando los riesgos de eventuales inundaciones en los sectores más bajos de las zonas urbanas, desfavoreciendo de esta manera las condiciones de escurrimiento de agua pluvial y disminuyendo la capacidad de recarga natural en los terrenos.

Las ciudades en Bolivia han venido experimentando un crecimiento urbano acelerado y año tras año; durante las estaciones lluviosas se dan importantes inundaciones en zonas urbanas. La ciudad de Tarija no es ajena a esta situación, pues la evacuación de aguas pluviales genera escurrimientos superficiales, generalmente este fenómeno sucede durante el periodo de lluvias (octubre – abril), afectando negativamente el desarrollo urbano, la circulación vehicular y peatonal.

Si la situación actual prevalece, año tras año durante el periodo de lluvias se seguirán presentando los problemas de circulación en las zonas céntricas y bajas de la ciudad de Tarija (escurrimiento de aguas pluviales con considerables caudales e inundaciones en zonas bajas).

### **1.3.1.2. Problema**

¿Cómo incide la incorporación de aditivos en diferentes porcentajes en las propiedades del pavimento poroso para obtener un pavimento de altas prestaciones como capa de rodadura y que sea capaz de soportar los esfuerzos requeridos por el tráfico pesado?

## **1.3.2. Objetivos.**

### **1.3.2.1. Objetivo General.**

Evaluar el pavimento de concreto poroso de altas prestaciones como capa de rodadura para tráfico pesado vs el pavimento rígido convencional utilizando la norma ACI 211 y la ACI 522, con los materiales que se hallan en la ciudad y usando aditivos sika que permitan obtener a la resistencia deseada para flujo de tráfico pesado.

### 1.3.2.2. Objetivo Específicos.

- Determinar las características físicas y mecánicas de los agregados constituyentes del concreto tanto convencional como poroso.
- Elaborar testigos con su respectiva dosificación tanto para pavimento convencional como poroso.
- Evaluar la capacidad soporte del pavimento poroso de altas prestaciones para tráfico pesado por medio de ensayos de laboratorio (resistencia compresión y permeabilidad).
- Estimar una comparación entre el pavimento poroso de altas prestaciones vs el pavimento rígido.
- Analizar los resultados de las mezclas porosas para su utilización en el pavimento.
- Realizar las conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación.

### 1.3.3. Hipótesis

La incorporación de aditivos mejora las propiedades del concreto permeable, haciendo que el mismo sea de altas prestaciones o de características mejoradas, manteniendo su porosidad, llevando al concreto a ser apto para carreteras de tráfico pesado dentro de la ciudad de Tarija.

### 1.3.4. Definición de variables operacionales.

Tabla 1. 1 Variables

Variable independiente	Variable dependiente
La variable independiente en el presente proyecto será la adición del % de aditivos dentro de la mezcla del concreto poroso para modificar sus propiedades.	Las variables dependientes serán las modificaciones de resistencia que presentara en cada subida de % de aditivos agregados y su permeabilidad en los diferentes casos.

Fuente: Elaboración propia.

## **1.4. DISEÑO METODOLOGICO.**

### **1.4.1. Componentes.**

#### **1.4.1.1. Unidad de estudio.**

Se pondrá en estudio al hormigón poroso donde se modificarán sus propiedades físicas a través de aditivos (SIKA FIBER fibra sintética, SIKA AER aditivo inclusor de aire y el PLASTIMENT - BV-40). Con ello se pretende llegar obtener un concreto poroso de altas prestaciones que sea capaz de soportar el tráfico pesado.

También se pretende analizar dos propiedades importantes, tanto para el pavimento rígido, como para el pavimento poroso, que son la permeabilidad y la resistencia a compresión de las muestras.

#### **1.4.1.2. Población.**

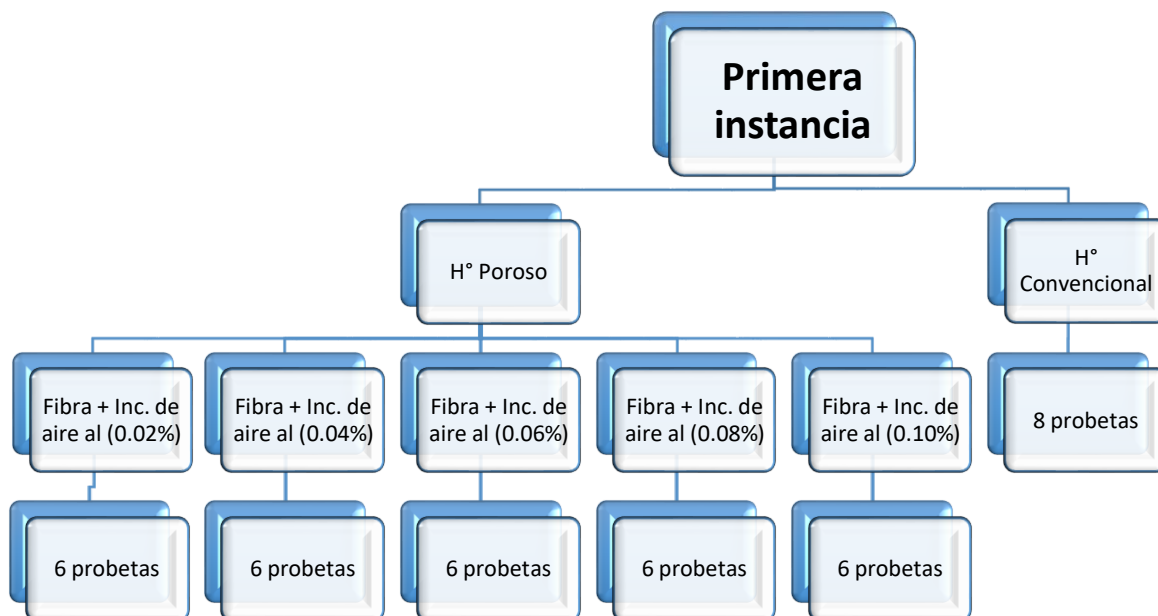
Los hormigones porosos serán la totalidad de la población de análisis sobre la cual se analizará los ensayos de laboratorio.

#### **1.4.1.3. Muestra.**

El porcentaje de aditivos en la mezcla del hormigón poroso, producirá una variación en sus propiedades y características a medir en esta investigación. Por lo que la muestra en el presente caso son los testigos o probetas con diferentes porcentajes de aditivos.

### 1.4.1.4. Muestreo.

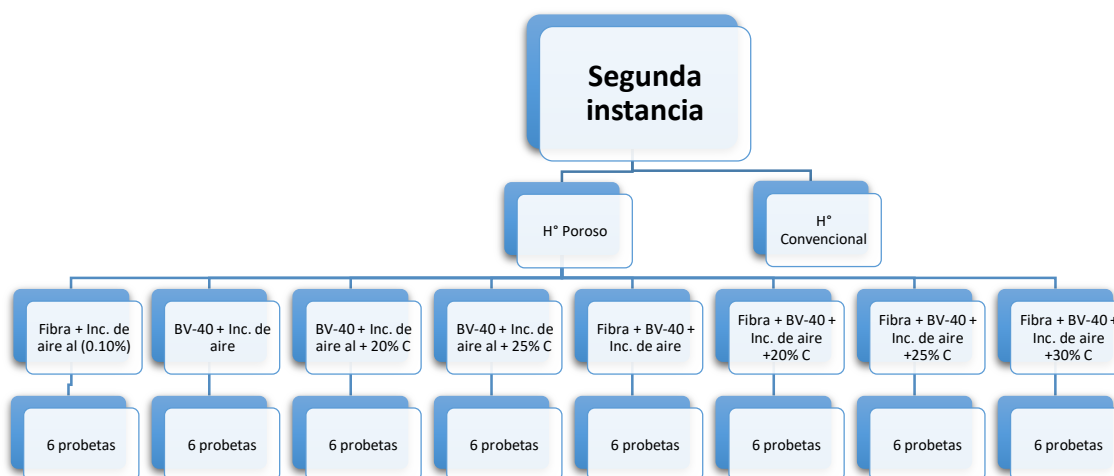
Tabla 1. 2 Muestras en la primera instancia



Fuente: Elaboración propia.

El total de muestras de la primera instancia es de 38 muestras de probetas para el ensayo de compresión y 38 probetas para el ensayo de tensión indirecta.

Tabla 1. 3 Muestras en la segunda instancia



Fuente: Elaboración propia.

El total de muestras de la segunda instancia sería de 48 probetas para el ensayo de compresión, 48 vigas para el ensayo de flexión y 32 probetas pequeñas para el ensayo de permeabilidad.

#### **1.4.2. Métodos y técnicas empleadas.**

##### **1.4.2.1. Metodología.**

Para poder estudiar las propiedades del hormigón poroso modificando el porcentaje de vacíos por dosificación, de tal manera que se obtenga valores de permeabilidad y resistencia que garanticen una buena funcionalidad vial, se seguirán los siguientes pasos:

- Determinar el material a ser utilizado en la elaboración del hormigón poroso, realizando ensayos de laboratorio.
- Efectuar la dosificación correspondiente a cada uno de los hormigones
- Elaborar especímenes para la ejecución de los ensayos
- Realizar los ensayos de permeabilidad, resistencia a compresión y resistencia a flexión.
- Analizar los resultados.

##### **1.4.2.2. Técnicas.**

Las técnicas en el siguiente trabajo de investigación son documentales y experimentales.

- Documentales por la documentación bibliográfica a utilizar para el diseño de hormigones porosos con adición de aditivos para mejorar la resistencia y ser usados como capa de rodadura para tráfico pesado.
- Experimentales por que se realizara ensayos de laboratorio para verificar lo antes mencionado.



### 1.4.2.3. Medios.

Para la realización del trabajo de investigación se utilizaron los equipos de laboratorio de suelos como se evidencia según fotografías:

Imágen 1. 1 Equipo de laboratorio



Fuente: Elaboración propia

Imágen 1. 2 Hormigonado, granulometría y rotura



Fuente: Elaboración propia

Imágen 1. 3 Desgaste y permeabilidad



Fuente: Elaboración propia

### 1.4.3. Alcance de la investigación

Este proyecto se enfoca en la realización de un pavimento poroso añadiendo aditivos para obtener un hormigón de altas prestaciones y que el mismo, posea una resistencia y permeabilidad, capaz de soportar el paso de tráfico pesado similar al pavimento rígido convencional y a la vez sea un pavimento drenante, para evitar el hidroplaneo en la calzada y aprovechar las aguas hacia reservas, con fines de reutilización en otras áreas.

Con el fin, de que este pavimento poroso mejore sus propiedades mecánicas a través de la incorporación de aditivos y soporte un tráfico pesado, nos ayudaría a usarlo en tramos de caminos o carreteras para drenar las aguas en tiempo de lluvias con mayor eficiencia.

Para lo cual el estudio se efectuará en las propiedades físico-mecánicas de ambos hormigones tanto convencional como poroso o permeable para posteriormente realizar una comparación entre ambos. Previo a esto se realizará un trabajo de investigación de antecedentes netamente bibliográfico con la finalidad de conocer más sobre el diseño, ejecución y aplicación en otros países que ya gozan de este tipo de pavimentos.

CAPÍTULO II  
MARCO TEORICO

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. DESCRIPCIÓN DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS**

Se define pavimento a la superestructura de la obra vial que hace posible la circulación expedita de los vehículos con la comodidad, seguridad y economía requeridos por el usuario. En general los pavimentos están compuestos por un conjunto de capas superpuestas, compuestas por materiales seleccionados, procesados o sometidos a algún tratamiento, el comportamiento de los pavimentos dependerá de la calidad de los materiales, del espesor y la calidad de construcción.

La clasificación de los pavimentos distingue dos tipos principales: los pavimentos flexibles o asfálticos y los rígidos o de concreto hidráulico en este trabajo de investigación nos centraremos en estos últimos, mismos que están contruidos por una losa de hormigón apoyada sobre una capa sub-base; y en ocasiones directamente sobre la subrasante, cuando esta es de muy buena calidad.

En nuestro medio el pavimento rígido, produce una buena distribución de cargas, dando como resultado tensiones muy bajas en la subrasante.

La superficie de rodamiento de un pavimento rígido es proporcionada por losas de hormigón hidráulico, las cuales distribuyen las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa y de las adyacentes, que trabajan en conjunto con la que recibe directamente las cargas. Por su rigidez distribuyen las cargas verticales sobre un área grande y con presiones muy reducidas. Salvo en bordes de losa y juntas sin pasajuntas, las deflexiones o deformaciones elásticas son casi inapreciables.

Este tipo de pavimento no puede plegarse a las deformaciones de las capas inferiores sin que se presente la falla estructural. Este punto de vista es el que influye en los sistemas de cálculos de pavimentos rígidos, sistemas que combinan el espesor y la resistencia de hormigón de las losas, para una carga y suelos dados.

Aunque en teoría las losas de hormigón hidráulico pueden colocarse en forma directa sobre la subrasante, es necesario construir una capa de sub-base para evitar que los finos sean bombeados hacia la superficie de rodamiento al pasar los vehículos, lo cual puede

provocar fallas de esquina o de orilla en la losa. La sección transversal de un pavimento rígido está constituida por la losa de hormigón hidráulico y la sub-base, que se construye sobre la capa subrasante.

## **2.2. ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS Y SUS FUNCIONES.**

### **2.2.1. Losas de concreto hidráulico**

Estas constituyen la parte fundamental del pavimento rígido, debiendo ser capaces de resistir los esfuerzos producidos por el tránsito y los efectos de la intemperie, además proporcionar una superficie de rodamiento segura, cómoda y de características permanentes bajo el efecto combinado del tránsito y de los factores ambientales durante su vida útil.

### **2.2.2. Capa Sub-base**

Tiene como función controlar los cambios volumétricos de la subrasante e incrementar su módulo de reacción. Constituye una plataforma estable de trabajo durante la construcción del pavimento y en ocasiones puede constituir una capa drenante.

Este elemento es muy importante ya que permite garantizar la uniformidad del soporte de las losas de concreto y se construye por lo general de materiales granulares no cementados. Debe mencionarse que a esta capa también se lo denomina base, ya que generalmente se posiciona inmediatamente bajo la losa; sin embargo, se lo designa como sub-base debido a que los requerimientos de calidad de los materiales no son tan exactos como los de una base en un pavimento flexible, teniendo en cuenta que la losa de concreto reduce los esfuerzos impuestos a esta capa por cargas aplicadas por los vehículos.

### **2.2.3. Capa Subrasante**

Se trata de capa superior de la terracería y puede estar formada por el propio terreno natural adecuadamente compactado y perfilado o por un material procedente de un banco en caso de que el terreno fuera inadecuado. Constituye el elemento de apoyo del pavimento, por lo que debe resistir adecuadamente los esfuerzos que son transmitidos, aun en condiciones severas de humedad.

### **2.3. TIPIFICACIÓN Y PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL PAVIMENTO RÍGIDO**

Como se mencionó anteriormente, en los pavimentos rígidos la losa de concreto es el elemento de mayor responsabilidad estructural y funcional, teniendo las capas inferiores, como la sub-base y la capa subrasante, la función de asegurar un apoyo uniforme y estable al pavimento

Normalmente, el espesor de las losas puede partir de unos 15 cm, para tránsito ligero, hasta llegar a ser del orden de los 40 cm en el caso de autopistas y carreteras con alto nivel de tránsito pesado.

Los pavimentos rígidos se dividen usualmente en los siguientes tipos:

- De concreto simple vibrado
- De concreto reforzado
- De concreto presforzado
- De concreto fibroso
- De concreto compactado con rodillo
- Sobre losas de concreto hidráulico

### **2.4. CONCRETO HIDRÁULICO PARA PAVIMENTOS RÍGIDO.**

Los hormigones para el pavimento rígido son aquellos hormigones simples de tipo A o normales, donde están compuestos por áridos, cemento y agua y dependiendo de la naturaleza y la temperatura se puede añadir aditivos para mejorar la calidad de la mezcla. Un buen hormigón es aquel que resulta satisfactorio tanto en sus estados: fresco y endurecido.

Normalmente, las especificaciones indican resistencias a los 28 días de edad y un nivel de fracción defectuosa de 20 % con tamaño de árido de 40 mm y cono de 30 cm.

## **2.5. FACTORES QUE AFECTAN EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO HIDRAULICO.**

La principal característica estructural del hormigón es que resiste de manera satisfactoria los esfuerzos de compresión, pero lamentablemente no tiene buen comportamiento frente a otros tipos de esfuerzos (tracción, flexión, cortante etc.).

Su empleo es habitual en obras de arquitectura e ingeniería. Algunos de los factores que afectan en las propiedades del concreto son:

- La calidad de los componentes (materiales)
- Amasado (diseño de mezcla, temperatura)
- Colocación
- Transporte
- Condiciones ambientales
- Curado

## **2.6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DEL PAVIMENTO RÍGIDO**

- El hormigón refleja la luz, lo que aumenta la visibilidad y puede disminuir los costos de iluminación en las calles hasta un 30 %, en cantidad de luminarias y consumo de energía.
- El hormigón no se ahueca nunca, por lo tanto, no hay acumulación de agua y, por ende, tampoco se produce hidropneumático. Por otra parte, se disminuye el efecto “spray”, que es el agua que despiden los vehículos que van adelante sobre el parabrisas del de atrás, impidiendo la visibilidad.
- Es fácil darles “rugosidad” a los pavimentos de hormigón durante su construcción, para generar una superficie que provea de mayor adherencia.
- La rigidez del hormigón favorece que la superficie de rodado mantenga la planitud.
- La lisura es el factor más importante para los usuarios. Actualmente, los pavimentos de hormigón se pueden construir más suaves que los de asfalto.

- A diferencia del asfalto, el hormigón puede soportar cargas de tráfico pesadas sin que se produzca ahuellamiento, deformaciones o lavado de áridos.
- La superficie dura del hormigón hace más fácil el rodado de los neumáticos. Estudios han demostrado que aumenta la eficiencia de combustible de los vehículos.
- El hormigón se endurece a medida que pasa el tiempo. Después del primer mes, el hormigón continúa lentamente ganando 40 % de resistencia durante su vida.
- El hormigón tiene una vida promedio de 30 años.
- Los pavimentos de hormigón frecuentemente sobrepasan la vida de diseño y las cargas de tráfico.
- Los pavimentos de hormigón se pueden diseñar para que duren desde 10 hasta 50 años.
- Las técnicas de restauración de pavimentos pueden extender su vida hasta tres veces la de diseño.
- Los pavimentos de hormigón tienen un mayor valor a largo plazo debido a su mayor expectativa de vida con los mínimos requerimientos de mantención.
- La durabilidad del hormigón disminuye la necesidad de reparación y/o mantenciones anuales, en comparación con pavimentos asfálticos.
- Los pavimentos de hormigón se pueden construir y dar al tránsito en tiempos reducidos, incluso de hasta 12 horas.

### **2.6.1. Desventajas**

- Tiene un costo inicial mucho más elevado que el pavimento flexible.
- Se deben tener cuidado en el diseño.
- Por su estructura porosa, pueden penetrar contaminantes que, de no ser retenidos, absorbidos o reducidos, continúan transportándose a través del suelo contaminando las aguas subterráneas, por lo que debe evitarse su instalación en áreas contaminadas.
- Pérdida de permeabilidad en un tiempo prolongado, debido a que se van saturando los vacíos, requiere de un mantenimiento a base de agua a presión.



Imágen 2. 1 Hormigonado rígido



Fuente: Elaboración propia

## **2.7. PAVIMENTOS POROSOS**

### **2.7.1. Antecedentes.**

Los antecedentes de los pavimentos porosos o permeables se remontan fundamentalmente a la década de 1970. Desde entonces han sido múltiples los trabajos de investigación desarrollados en varios países que han dado lugar a monografías y manuales específicos. En 1972 en Estados Unidos se llevó a cabo probablemente la primera investigación acerca de los firmes permeables (porous, pervious or permeable pavements). La utilización de pavimentos permeables tenía la intención de aliviar la contaminación debida a los vertidos de los sistemas de saneamiento unitarios en tiempos de lluvia, reduciendo además los parámetros de diseño de las infraestructuras de drenaje urbano.

En el Reino Unido, Pratt et al. (1989) recogen la experiencia de varios años en el uso de firmes permeables para la reducción de la escorrentía superficial urbana y la mejora de su calidad. Posteriormente, destaca la publicación del primer manual íntegramente dedicado a la técnica de los firmes permeables.

En Irlanda, McBride y Knapton (2006) defienden el uso de firmes permeables para cumplir con los requerimientos de las autoridades locales de que cualquier nuevo desarrollo no añada caudales adicionales al sistema de drenaje urbano, manteniendo los niveles de permeabilidad previos al desarrollo.

En Alemania, los firmes permeables han sido utilizados desde los años setenta y actualmente son un método de construcción regulado (Steffen y Meinheit, 2006). El control de la contaminación del agua es el principal aspecto estudiado hoy en día en este país.

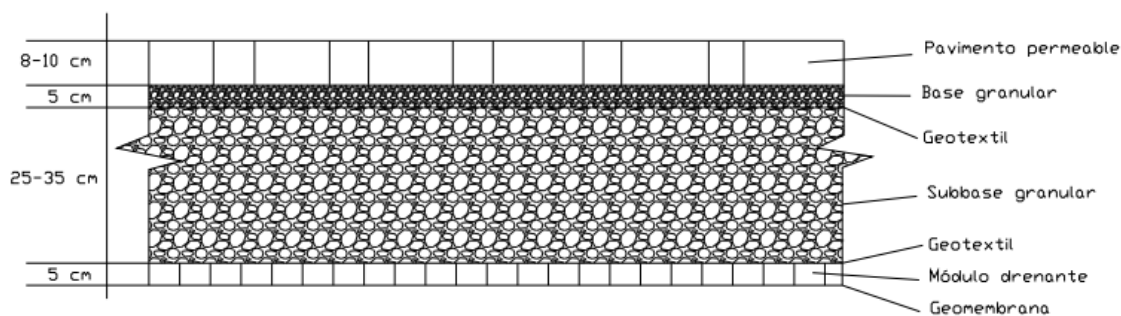
Por su parte en Perú, Vela & Cruz (2019) Trataron de encontrar una alternativa eficiente de solución de drenaje que ayude al control de las aguas pluviales. Para ello se propuso el concreto permeable como pavimento alternativo de las calles no pavimentadas de la localidad de Molinopampa; con la finalidad de que el pavimento sea capaz de drenar un

volumen de agua y proporcionar resistencia estructural adecuada para resistir un cierto nivel de tráfico, para ello se caracterizó hidrológicamente la zona del proyecto, de esta base de datos se estudió las máximas precipitaciones registradas, estableciendo requisitos de permeabilidad y un nivel de tránsito menor a 5 millones de ejes equivalentes. Para el diseño se combinaron dos aspectos, un aspecto estructural aplicando el método INTERPAVE, 2010, donde se obtuvo un espesor total del pavimento de 50cm; y un aspecto hidráulico aplicando el método establecido por MINVU-DICTUC, 1996, con lo que se calculó un espesor de sub-base de 20 cm tomando en cuenta la magnitud de volumen de agua de lluvia que debe almacenar; por otro lado el suelo sobre el cual se desarrolló la investigación se identificó como arcilla arenosa, con un índice de infiltración nula por lo que se procedió a implementar un drenaje longitudinal ejecutadas mediante tuberías perforadas de 150 mm de diámetro, ubicados al nivel de la sub-base.

### 2.7.2. Definición pavimento permeable o poroso.

Según Rodríguez (2008). Los firmes permeables se pueden definir como secciones compuestas de varias capas de materiales de construcción que permiten el paso del agua a través suyo, desde la superficie hasta la explanada, y en conjunto ofrecen la capacidad portante necesaria para resistir un tráfico determinado.

Imagen 2. 2 Sección de pavimento permeable o poroso



Fuente; Rodríguez (2008)

El pavimento permeable cuenta con revenimiento cero con alto grado de porosidad, y con una relación de vacíos alta; consiste de cemento Portland, agregado grueso, poco o nada de agregado fino, agua y aditivos. La combinación de estos ingredientes producirá un

material endurecido con poros conectados, que varían en tamaño de 2 a 8 mm, lo cual permite que el agua pase fácilmente a través de ellos. El contenido de vacíos puede variar de 15 % a 35 %, y se pueden alcanzar resistencias a la compresión entre 28 a 280 kg/cm<sup>2</sup>. La capacidad de drenaje de un pavimento de concreto permeable variará con el tamaño de agregado y la densidad de la mezcla, pero generalmente varía en el rango de 81 a 730 l/min/m<sup>2</sup>.

Por su parte (González, 2016) menciona que: Las distintas maneras de gestión del agua son drenaje subsuperficial o diferido, almacenamiento en sub-base e infiltración. Para conseguir el almacenamiento en la sub-base el agua penetra la capa de rodadura, la intermedia y la base. La infiltración consiste en la penetración de todas las capas del firme hasta llegar a la explanada y seguir su curso hasta una posible recarga de acuíferos o su dispersión en el terreno natural. Para que un firme sea considerado permeable, han de serlo todas las capas que lo forman, y además deben presentar una permeabilidad creciente con la profundidad para evitar el riesgo de colapso funcional.

### **2.7.3. Clasificación de firmes permeables.**

Los firmes permeables según bibliografía, al paso de los años fue estudiado y analizado de ahí que se lo puede catalogar desde el punto de vista de varios autores los más representativos lo realizaron de la siguiente manera:

Según Ferguson (2005) hace referencia a los siguientes tipos de pavimentos permeables:

- Áridos porosos (porous aggregate).
- Césped poroso (porous turf).
- Celdas de plástico (plastic geocells).
- Adoquines con juntas abiertas (open-jointed paving blocks).
- Entramados prefabricados de hormigón (open-celled paving grids).
- Hormigón poroso (porous concrete).
- Asfalto poroso (porous asphalt).
- Superficies permeables ligeras (soft porous surfacing)
- Caminos de madera (decks)

Mientras, el departamento de transportes de California (Caltrans, 2007) clasifica los firmes permeables en cuatro categorías, según el tipo de pavimento permeable empleado o el uso de capas drenantes subterráneas:

1. Asfalto poroso.
2. Hormigón poroso.
3. Adoquines permeables.
4. Estructuras de drenaje subterráneo (subsurface drainage structures).

Por su parte McCormack (2006), divide los pavimentos permeables en dos tipos fundamentales:

1. Pavimentos contruidos por materiales impermeables convencionales con huecos o ranuras que permiten la infiltración del agua a través de la superficie.
2. Pavimentos contruidos con elementos o materiales porosos.

En resumen, analizando los distintos tipos posibles de firmes permeables, estos se pueden clasificar en dos categorías fundamentales según su pavimento permeable. La primera categoría estaría formada por aquellos pavimentos que combinan zonas impermeables con zonas permeables, como por ejemplo los adoquines impermeables dispuestos con separadores. Mientras, la segunda categoría la constituirían los pavimentos permeables con una capacidad de infiltración homogénea en toda su superficie, como por ejemplo las superficies continuas de mezcla bituminosa porosa. Por tanto, la clasificación propuesta para los firmes permeables en función del tipo de pavimento permeable con el que están contruidos se realiza en dos categorías mismas que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2. 1 Clasificación propuesta de pavimentos permeables

Según el pavimento permeable		Según el destino final del agua
Pavimentos permeables discontinuos	A. Césped o grava con refuerzos	1. Infiltración
	B. Adoquines con ranuras	
Pavimentos permeables continuos	C. Mezcla bituminosa porosa	2. Almacenamiento
	D. Hormigón poroso	3. Drenaje diferido

Fuente: Jorge Rodríguez Hernández (2008)

Imágen 2. 3 Clasificación de pavimentos permeable



Fuente: Jorge Rodríguez Hernández (2008)

**Los pavimentos permeables discontinuos** se definen como aquellos formados por elementos o materiales impermeables que, combinados o no con materiales porosos, permiten la infiltración del agua a través de huecos, espacios o ranuras de la superficie, asegurando una adecuada capacidad portante. Se incluyen en esta primera categoría los siguientes pavimentos permeables:

- Césped poroso o grava con refuerzos:
  - Prefabricados de hormigón: retículas, parrillas o celdas de hormigón con los huecos ocupados por césped o grava.

- Prefabricados de plástico: retículas, parrillas o celdas de plástico con los huecos ocupados por césped o grava.
- Adoquines con ranuras o juntas abiertas:
  - Rellenas de material drenante: adoquines con separadores o sin ellos con las juntas ocupadas por gravilla o césped poroso.
  - Libres: adoquines con pequeñas ranuras incluidas en su geometría que no se rellenan con ningún tipo de relleno drenante.

**Los pavimentos permeables continuos** se definen como aquellos formados únicamente por materiales porosos que permiten la infiltración del agua a través de toda la superficie por igual, asegurando una adecuada capacidad portante.

En esta categoría están incluidos los pavimentos permeables contruidos con:

- Mezcla bituminosa porosa:
  - Convencional: fabricada con algún tipo de betún convencional como por ejemplo el B 60/70.
  - Modificada: fabricada con algún betún modificado con polímeros como por ejemplo el BM-3b.
- Hormigón poroso:
  - Hidráulico: fabricado con cemento hidráulico como conglomerante de los áridos.
  - Sintético: fabricado con ligante sintético a base de resinas encargado de ligar el esqueleto mineral adecuadamente.

#### **2.7.4. Ventajas del pavimento permeable o poroso**

Los pavimentos permeables ofrecen numerosas ventajas de acuerdo a los estudios realizados por la línea de investigación sobre Construcción de Sistemas de Drenaje Sostenible que fue introducida en España en el año 2003 por el Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) de la Universidad de Cantabria, con la colaboración de la Universidad de Coventry del Reino Unido, siendo algunas de estas las siguientes:

Para Grover et al. (1972) las principales ventajas de los firmes permeables son:

- Minimización de los reboses en los sistemas de saneamiento unitarios.
- Aumento de las reservas de agua.

- Mejora de la seguridad del tráfico.
- Preservación de la vegetación.
- Laminación de inundaciones.
- Obtención de beneficios estéticos.

Según Ferguson (2005) los pavimentos firmes prometen:

- Agua limpia.
- Mayor esperanza de vida para los árboles.
- Ciudades frescas.
- Menos ruido en las calles.
- Conducción segura.
- Reducción de costes.
- Cumplimiento de las normativas de desarrollo urbano.
- Preservación de los ecosistemas nativos.
- Estética.

Por su parte, Castro et al. (2005) presentan las ventajas que ofrecen las superficies permeables frente a las impermeables:

- Disminuyen las puntas de caudal en los sistemas de drenaje y en los cauces receptores.
- Pueden llegar a mejorar la calidad del agua en gran medida por filtración, absorción y biodegradación, fundamentalmente.
- Ofrecen un amplio abanico de acabados superficiales para su inserción en el diseño urbano.
- Su puesta en obra es sencilla.
- Pueden recoger y hacerse cargo de la escorrentía procedente de superficies impermeables adyacentes.
- Son una solución muy flexible que permite ajustar el coste al uso y al tiempo de
- En general, constituyen una solución más barata que la combinación de superficies impermeables y sistemas de drenaje convencionales.

Además de las ventajas mencionadas, los pavimentos permeables ofrecen también ventajas sociales, completando el triángulo de economía, medio ambiente y sociedad del desarrollo sostenible. Estas ventajas de servicio de los pavimentos permeables son, aparte



de las mejoras estéticas, el aumento de la seguridad y de la comodidad de los ciudadanos en tiempos de lluvia, reduciendo el riesgo de accidentes de tráfico.

Dentro del tema vial y netamente de los pavimentos porosos según (Pérez Jiménez et al., 1982; Gordillo, 2001): las ventajas más importantes que ofrecen las capas de rodadura son las siguientes:

- Disminuyen el riesgo de hidroplaneo.
- Absorben el ruido.
- Reducen las salpicaduras, asegurando una mejor visibilidad.
- Limitan la reverberación de los faros sobre el pavimento húmedo.
- Garantizan una elevada macrotextura, mejorando la resistencia al deslizamiento a velocidades elevadas.
- Tienen un elevado rozamiento interno, lo cual las hace poco sensibles a la deformación plástica.
- Ofrecen un buen aspecto estético.

Por su parte según el comité ACI 522 las ventajas que ofrecen la rodadura del pavimento poroso son:

- Controla la contaminación que arrastra la corriente en las aguas de lluvia.
- Incrementa las zonas de parqueo ya que disminuye el hidroplaneo.
- Controla la escorrentía de las aguas de lluvia.
- Reduce el deslizamiento sobre la superficie de los caminos o carreteras.
- Reduce el deslumbramiento sobre la superficie de rodadura en gran medida particularmente cuando esta mojada por la noche.
- Reduce la interacción del ruido entre la llanta y el pavimento.
- Permite que el aire y el agua lleguen a las raíces de los árboles, entrando en un ambiente armonioso con la parte del medioambiente.

Ventajas de carácter ambiental

las ventajas ambientales que ofrecen son:

- Permite la reutilización de las aguas pluviales para usos no potables
- Permite que el suelo retenga la humedad durante más tiempo, favoreciendo así las regiones verdes a pesar de permitir la recuperación del nivel freático.

- Permite una utilización superior del agua, que comúnmente se contamina cuando se mezcla con el agua del drenaje sanitario, además evita el transporte de los residuos del agua, lo que conlleva el peligro de una la obstrucción de alcantarillado.
- El ciclo hidrológico e hidráulico de al agua no es interrumpido por la permeabilidad que tiene.
- Realiza un control del escurrimiento de las aguas pluviales

### **2.7.5. Desventajas de los pavimentos Permeables.**

Hablando en general los firmes permeables también presentan problemas que deben ser estudiados y tenidos en cuenta. Los principales inconvenientes comunes a todos los firmes permeables son:

- Colmatación.
- Degradación.
- Desconocimiento y desconfianza.

Los principales inconvenientes de los firmes permeables, al igual que del resto de los SUDS, son el desconocimiento y la desconfianza debida a las experiencias fallidas. Un análisis realizado por Schlüter y Jefferies (2001) pone de manifiesto que los problemas que presentan los firmes permeables son fundamentalmente debidos a un inadecuado diseño y ejecución. Mientras que Ferguson (2006) señala que el buen funcionamiento de un firme permeable depende de una correcta selección, diseño, ejecución y mantenimiento de los elementos que lo componen, y los fallos de capacidad portante o de bloqueo resultan de negligencias en alguno de estos pasos.

Hablando específicamente de los pavimentos permeables o porosos, por su parte. Pérez Jiménez et al. (1982) y Gordillo (2001), señalan algunos inconvenientes y limitaciones de uso de las mezclas pavimentos porosos:

- Progresiva colmatación: no deben usarse en pavimentos con riesgo de colmatación, como por ejemplo vías agrícolas o de tráfico lento.
- Riesgo de deslizamiento en los primeros meses: hasta que desaparece la película de ligante que envuelve el árido superficial.

- Problemas en climas fríos: no deben usarse en zonas con posibilidad de heladas.
- Dificultad de regularización: no deben usarse en vías con deficiente soporte.
- Penetración por disolventes: no deben usarse en zonas con riesgo de contaminación con carburantes, como por ejemplo tramos con atascos frecuentes, zonas de peaje, estaciones de servicio o paradas de autobuses.
- Mayor cuidado y especial atención en el diseño para algunos tipos de suelos como los expansivos y susceptibles a heladas, además los suelos con una muy baja permeabilidad.
- Periodo de vida más corto que el convencional.
- Mayor atención, costo y cuidado a la ejecución de estos pavimentos porosos.
- Difícil restitución ya que tiene acabados continuos.

Una de las preocupaciones en el uso del pavimento poroso es cuando existen riesgos

#### **2.7.6. Aplicación del pavimento permeable o poroso.**

Se puede usar en una gran cantidad de casos siempre que no sea necesario el uso de refuerzo pues el riesgo de corrosión es alto por el sistema de poros en el concreto permeable.

Las aplicaciones más comunes son:

- Pavimento permeable en estacionamientos.
- Pavimentos rígidos de drenaje en áreas de locales comerciales.
- Pisos de invernaderos donde es necesario conservar el suelo libre de agua en reposo.
- En muros estructurales con requisitos de aislamiento térmico ligero.
- Paredes o pisos donde se desee mojar las propiedades de absorción acústica.
- Pavimentos de avenidas, caminos, entrada de vehículos y aeropuertos.
- Superficie para parques y canchas de tenis.
- Pisos para áreas de zoológicos y establos.
- Terraplenes de puentes.
- Cubiertas de piscinas.
- Estructuras de playas y malecones.

- Plantas para tratar aguas negras.
- Sistema de conservación de energía solar.
- Revestimientos de pared para pozos de agua.
- Arrecifes artificiales donde el concreto imita a la estructura del arrecife.

## **2.8. SECCIONES DEL PAVIMENTO PERMEABLES O POROSOS.**

El pavimento o superficie artificial permeable debe garantizar la infiltración de las aguas pluviales, tanto las mezclas asfálticas porosas como el concreto hidráulico poroso.

### **2.8.1. Mezclas Asfálticas porosas.**

Según el porcentaje de huecos (H), las mezclas bituminosas se agrupan en (Gordillo, 2001; Kraemer et al., 2004):

- Densas o cerradas:  $H < 6 \%$ .
- Semidensas o semicerradas:  $H = 6-12 \%$ .
- Abiertas:  $H > 12 \%$ .
- Porosas o drenantes:  $H > 20 \%$ .

Las mezclas bituminosas porosas fueron desarrolladas en Francia en 1968, donde la experiencia mostró que, al cabo de diez años, aún colmatadas, mantenían una buena rugosidad superficial y un aceptable drenaje superficial. A mediados de los años setenta, la utilización de betunes modificados con polímeros permitió mejorar sus características reológicas y de adherencia aumentando su cohesión y disminuyendo su susceptibilidad térmica. No obstante, debido a la confrontación entre ventajas e inconvenientes, el desarrollo de esta técnica en Francia se bloqueó hasta 1985 cuando, gracias a la acción de determinadas asociaciones de automovilistas, se retomó su aplicación e investigación (Brule et al., 1993). Así, son numerosas las aplicaciones posteriores de los pavimentos porosos urbanos (chaussées poreuses urbaines) para reducir el ruido, como por ejemplo las realizadas en la región de Rhône (Pipien et al., 1990). En España, las mezclas bituminosas porosas se utilizan en carreteras desde 1980 como capa de rodadura drenante, con espesores de 3 o 4 cm (MOPU, 1987), e incluso de 5 cm, cuando el tamaño máximo de los áridos es de 12 mm (del Val Melús, 1990).

### **2.8.2. Hormigón permeable o poroso.**

El hormigón poroso supone una alternativa a la mezcla bituminosa porosa, tanto como capa superficial drenante, como pavimento de un firme permeable. Aguado et al. (1997) destacan como características fundamentales de un pavimento de hormigón poroso:

- La estructura porosa dependiente de la granulometría y de la dosificación.
- El conglomerante y el aditivo empleado.
- El espesor de la capa.

Para que el hormigón sea considerado poroso debe tener un mínimo de 15 % de huecos, sin sobrepasar el 25 % para evitar problemas de estabilidad (de Solminihac y Castro, 2002).

Las opciones de conglomerante son fundamentalmente dos: cemento hidráulico o ligante sintético. Ambos pueden ser modificados con distintos tipos de adiciones para mejorar sus prestaciones. El hormigón poroso hidráulico ofrece resistencias medias a compresión entre 15 y 20 MPa y permeabilidades entre 0,5 y 5 cm/s.

A nivel experimental se han logrado resistencias de 50 MPa mediante la adición de humo de sílice, superplastificante y polímeros orgánicos, obteniendo un hormigón poroso apto para todo tipo de viario urbano, bien en capas superficiales o de base. A nivel más práctico, existen aditivos registrados como por ejemplo el Ecocreto que es utilizado en México y permite alcanzar resistencias de 25 MPa. En cualquier caso, es necesaria la adición de polímeros o una mayor dotación de cemento para mantener un alto índice de huecos con una adecuada resistencia a los esfuerzos tangenciales del tráfico.

Existen gran número de investigaciones sobre el hormigón poroso hidráulico. En España este material ha sido estudiado por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, por la ETSICCP de Madrid y por la ETSICCP de Barcelona. caracterizaron el comportamiento a fatiga del hormigón poroso según el tipo de polímero añadido, convirtiéndole en un material de altas prestaciones, demostrando el mejor comportamiento a fatiga de los hormigones porosos con resinas acrílicas, aún con un mayor aumento de temperatura en su interior debido a las cargas repetidas. Mientras, en Argentina, el Instituto del Cemento Portland Argentino, señala el uso de este material tanto como capa de rodadura drenante, como parte de calzadas.

### 2.8.2.1. Capas inferiores del pavimento poroso.

Según el estudio realizado por el doctor Jorge Rodríguez las capas de un pavimento permeable o poroso está constituido de la siguiente manera que se muestra en la tabla:

Tabla 2. 2 Capas de pavimento poroso

CAPA	MATERIAL
<i>Base</i>	Granular
<i>Sub-base</i>	Granular/ Estructuras de plástico/ Geosintéticos
<i>Geotextil</i>	Geosintéticos

Fuente: Rodríguez (2008)

La sub-base es una capa de material granular que se encarga de almacenar y retener el volumen de escorrentía, en sus vacíos debido al alto porcentaje que presenta. Para que de esta manera pueda infiltrarse en el terreno natural o en los laterales del pavimento. De la misma forma que ocurre en la base, también ayuda a mejorar la calidad del drenaje a través del proceso de filtración y la alta actividad biológica que se produce en su interior, además ofrece soporte estructural, necesario para soportar las cargas de tráfico.

En cuanto a los geotextiles, Rodríguez indica que, cumplen un rol muy importante en el funcionamiento del sistema. En la sección de un pavimento permeable, generalmente se coloca entre la superficie permeable y la capa base, y entre la capa sub-base y el terreno natural. Las funciones principales de un geotextil son de filtro y separación, sin embargo, aquellos colocados sobre la sub-base, otorgan además refuerzo estructural al sistema frente a las tensiones horizontales producidas por el tráfico de vehículos. Dadas las propiedades de este geosintético, Es el principal responsable de depurar el agua, retener y biodegradar contaminantes como los hidrocarburos y el aceite.

### 2.8.2.2. Diseño de espesores del pavimento permeable.

Países pioneros en la implementación de sistemas de pavimentos porosos, como España, E.E.U.U, Japón, Francia, Holanda y Australia, han generado distintas metodologías y guías de diseño basadas en la hidráulica de la estructura. Las metodologías presentadas en la tabla tienen como objetivo llegar a un dimensionamiento, basado en un balance de masa

simple, que garantice un drenaje y funcionamiento adecuado del sistema, de manera que se cumplan con las distintas restricciones y recomendaciones para la implementación de pavimentos porosos.

▪ **Metodología Chile**

La metodología Chile fue desarrollada inicialmente por la Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas -DICTUC- (1996). La aplicación de la presente metodología inicia con la selección de una lluvia de diseño. Una vez obtenida esta, el volumen de almacenamiento se estima como la máxima diferencia entre el volumen acumulado de aguas de lluvias que reciben la sub-base y el volumen acumulado infiltrado.

Se recomienda determinar el volumen a infiltrar acumulado para una lluvia de periodo de retorno de T años como el generado por las intensidades medias, de acuerdo a la curva IDF correspondiente. Es decir, el volumen acumulado de agua de lluvia,  $V_{afl}$ , en metros cúbicos, para un tiempo  $d$ , en horas, se calcula como:

$$V_{afl} = 1.25 * 0.001 * C * I * A * \frac{d}{60}$$

Donde:

C: coeficiente de escorrentía superficial correspondiente al área total aportante

A: área total aportante (metros cuadrados)

Id: intensidad de la lluvia de periodo de retorno T y duración d (mm/h)

d: tiempo acumulado de lluvia (horas)

Se recomienda multiplicar por un factor de seguridad de 1.25 el volumen acumulado para considerar la porción de lluvia que cae antes y después de la porción más intensa de la tormenta, no incluida en las curvas IDF.

Para calcular el volumen de almacenamiento,  $V_{alm}$  del pavimento poroso rígido se estima el volumen acumulado que puede ser drenado, utilizando la tasa de infiltración estimada en función del tiempo. Se puede determinar gráficamente como la máxima diferencia entre el volumen afluente acumulado de agua lluvia o volumen de recarga  $V_{afl}(d)$  y el volumen acumulado infiltrado  $V_{inf}(d)$ , ambos en función del tiempo. Este último, en metros cúbicos, está dado por:

$$V_{inf}(d) = 0.001 * f * 0.33 * A_{pav} * \frac{d}{60}$$

Donde:

f: capacidad de infiltración del suelo, que corresponde al suelo que subyace al pavimento (mm/h)

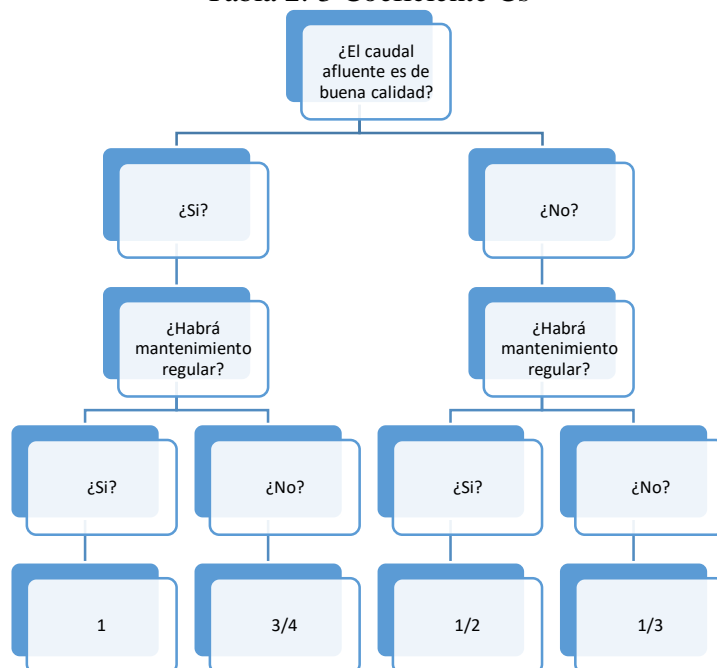
A pav: área del pavimento poroso (m<sup>2</sup>)

d: tiempo acumulado de lluvia (h)

Cs: coeficiente de seguridad que afecta la capacidad de infiltración dependiendo de las propiedades del agua y las condiciones de mantenimiento que toma en cuenta los efectos de la colmatación en el tiempo que experimenta el suelo.

Se recomienda calcular el coeficiente Cs según el siguiente procedimiento

Tabla 2. 3 Coeficiente Cs



Fuente: Dirección de Investigaciones científicas y tecnológicas -DICTUC-, 1996

El volumen de almacenamiento necesario se calcula como:

$$V_{max} = \text{máx}(V_{afl} - V_{inf})$$

Si la tasa de infiltración del terreno es siempre mayor que la intensidad de la lluvia, incluso que la de menor duración, entonces no se requiere un volumen de acumulación en la sub-base, sino que bastara con la superficie de contacto con la subrasante para la infiltración.

El espesor necesario de la sub-base es:

$$e = V_{alm} / (\eta * A_{pav})$$



Donde  $\eta$  es la porosidad del material de la sub-base.

Se recomienda que el tiempo máximo de vaciado del volumen almacenado en la sub-base sea inferior a 48 horas. Este tiempo máximo (en horas) se puede estimar como:

$$t_m = \frac{\eta * e}{Cs * f}$$

Donde:

e= espesor definitivo asignado a la sub-base (mm)

f= tasa de infiltración del suelo o de la subrasante (mm/h)

Cs= coeficiente de seguridad adoptado

$\eta$ = porosidad del relleno de la sub-base

#### ▪ Método manual SUDS

The SUDS manual es un método que fue experimentado por Woods-Ballard et al. (2007), en el cual el diseño de sistemas de infiltración, una de las mayores incertidumbres es determinar el coeficiente de infiltración del suelo, ya que este varía con el tiempo. Por esta razón se debe introducir un factor de seguridad en el procedimiento del diseño y así se podrá reducir el valor del coeficiente de infiltración.

Para un evento de lluvia, dado que descarga a un sistema de infiltración de un tamaño particular, las ecuaciones hidráulicas pueden ser resueltas para encontrar la máxima profundidad  $H_{max}$ .

En el procedimiento establecido a continuación, se asegura que las aguas lluvias serán infiltradas a través de la superficie inferior del sistema en el suelo a la velocidad requerida. Para los sistemas tales como pavimentos porosos que tienen una superficie hecha de asfalto poroso o bloques de concreto, la velocidad a la que el agua puede infiltrarse a través de la superficie, la falla puede ocurrir debido a una infiltración superficial pobre, mas no debido a la baja infiltración en el suelo circundante. El diseñador debe asegurar la capacidad de infiltración de la superficie del material seleccionado.

La máxima profundidad de agua que debe ser almacenada por un pavimento poroso rígido puede ser calculada mediante la ecuación siguiente:

$$H_{in} = d * I * \frac{A}{A_{pav}}$$

$$H_{out} = \frac{f * d}{FS}$$

Donde:

$f$ = coeficiente de infiltración, obtenido por el ensayo de percolación (m/h) y ajustado con el factor de seguridad adecuado.

$d, I$ = duración e intensidad de lluvias con el periodo de retorno requerido en la ubicación del sitio (h, m/h)

$A_{pav}$ = área del sistema de infiltración (m<sup>2</sup>)

$A$ = área a ser drenada o área total de la cuenca (m<sup>2</sup>)

$\eta$ = porosidad del material de relleno (volumen de vacíos / volumen total)

A continuación, se describe el procedimiento que se deberá seguir para el diseño de sistemas de infiltración: (i) inicialmente se debe obtener el coeficiente de infiltración  $f$  (m/h) dividiendo la tasa de infiltración obtenida mediante ensayos de campo por un factor de seguridad apropiado; (ii) obtener la porosidad del material granular empleado para el relleno; (iii) decidir el área a ser drenada  $A$  (m<sup>2</sup>) y el área superficial de infiltración  $A_{pav}$  (m<sup>2</sup>) y calcular la relación de drenaje,  $R$ , donde  $R=A/A_{pav}$ ; (iv) seleccionar la duración de la lluvia,  $d$  (h) y determinar la intensidad de lluvia correspondiente  $I$  (m/h); (v) comprobar si  $f$  supera  $R$ . si es así, la tasa de infiltración excede la tasa potencial de escorrentía, en cuyo caso  $H_{max}=0$ , de lo contrario calcular el valor de  $H_{max}$  (m); (vi) Repetir los pasos (iv) y (v) para un rango de duración de las precipitaciones y construir una hoja de cálculo o una tabla de resultados. Por último, seleccionar el mayor valor de  $H_{max}$ .

Para un pavimento de infiltración se asume  $R=1$ ; por lo tanto, el paso (iii) es omitido y la máxima profundidad de agua está dada por:

$$H_{max} = \frac{d}{\eta}(1 - f)$$

#### ▪ Método de lluvias

A partir de las relaciones Altura-duración-frecuencia de las lluvias en la zona de estudio, la elección del periodo de retorno, la porosidad del material de la capa de almacenamiento y el caudal de salida, es posible determinar el espesor del pavimento.

En este método, además de los supuestos anteriores, se tiene en cuenta que no hay continuidad pluviométrica: las estadísticas correspondientes al cálculo de volúmenes de

almacenamiento de agua se basan en a la independencia de los eventos de lluvia. Esto significa que durante los recuentos los periodos de tiempo seco no se consideran.

Este método se basa en el recuento de lluvias idénticas a las usadas para la construcción de las curvas IDF. En un conjunto de episodios lluviosos medidos para N años. Se calculan las N intensidades máximas anuales para diferentes intervalos de tiempo d a partir de lo cual es posible construir una clasificación de los valores de frecuencia de I y determinar las diferentes curvas de intensidad máxima y duración del análisis de frecuencias F o periodos de retorno T.

Para dimensionar la retención es necesario transformar estas intensidades I(d,T) en alturas H(d,T), mediante la siguiente expresión:

$$H_{in} = I * \frac{d}{60}$$

Estas curvas determinadas estadísticamente representan la evolución de las alturas de precipitación para diferentes duraciones. Cabe aclarar que no se trata de curvas que describen la evolución de aportes acumulados en función del tiempo para un conjunto de lluvias.

El caudal de salida constante Qs se puede expresar como un caudal específico en mm/h a partir de la ecuación siguiente:

$$H_{out} = \frac{Qs}{Sa} * \frac{d}{60}$$

Donde:

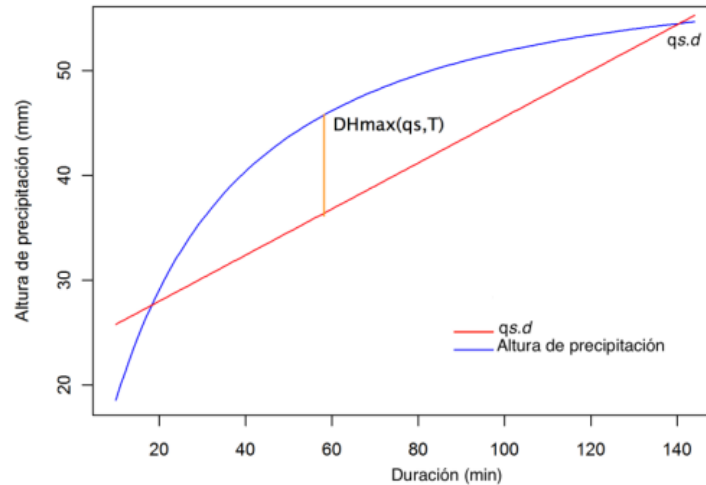
Qs= caudal de salida, en m<sup>3</sup>/s

Sa= área activa de escorrentía que alimenta la estructura de almacenamiento, en ha

Con base en lo anterior, es posible extraer conjuntamente la altura de precipitación a un periodo de retorno dado H (d,T) y la curva que describe la evolución temporal de la altura de descarga de agua qs.d en función de la duración de la evacuación d. Esto se evidencia a continuación

Imagen: Superposición de la curva Altura-Duración para una frecuencia elegida y la curva de evacuación

Gráfica 2. 1 Relación entre el contenido de aire y la tasa de percolación



Fuente: Polanco Andrade & Sánchez Vega, 2012

En la imagen se evidencia que las diferentes  $DH(qs, T, d)$  entre la curva  $qs,d$  y  $H(d,T)$ , corresponden a las alturas a almacenar para diferentes duraciones  $d$ . La diferencia máxima  $DH_{max}(qs, T)$  corresponde a la altura total de almacenamiento necesaria para evitar desbordamientos. El volumen de agua almacenada se determina por:

$$V = 10DH_{max}(qs, T) \cdot Sa$$

Donde

$Sa$  = área activa en ha

$DH_{max}(qs,T)$ : máxima altura específica de almacenamiento en función del caudal específico y el periodo de retorno en mm

#### ▪ Método de Virginia

Este método fue preparado para el Departamento de Transporte de Virginia por Virginia Tech bajo contrato para el Virginia Center for Transportation Innovation & Research. Brinda orientación en el diseño de mejores prácticas de gestión de aguas pluviales como se define en el instructivo general

$$H_{in} = (R + 1) * I * \frac{d}{60}$$

$$H_{out} = \frac{f * d}{2 * 60}$$

Donde:

R= razón A/A<sub>pav</sub>

I= intensidad de lluvia mm/h

d= duración del evento de precipitación en min

f= capacidad de infiltración del suelo mm/h

Tabla 2. 4 Métodos para el cálculo de espesor del pavimento poroso

Método	Volumen o altura del afluente	Volumen o altura del efluente
Método Chile	$V_{afl} = 1.25 * 0.001 * C * I * A * \frac{d}{60}$	$V_{inf} = 0.001 * f * 0.33 * A_{pav} * \frac{d}{60}$
Método de lluvias	$H_{in} = I * \frac{d}{60}$	$H_{out} = \frac{Q_s}{S_a} * \frac{d}{60}$
		$Q_s = 0.1 * f * 0.27 * A_{pav}$
		$S_a = C * A$
Método de Virginia	$H_{in} = (R + 1) * I * \frac{d}{60}$	$H_{out} = \frac{f * d}{2 * 60}$
Método manual de SUDS	$H_{in} = d * I * \frac{A}{A_{pav}}$	$H_{out} = \frac{f * d}{FS}$
<b>Volumen Máximo</b>		
$V_{max} = \frac{\text{máx}(H_{in} - H_{out}) * A_{pav}}{1000}$		
<b>Espesor de capa</b>		
$e = \frac{V_{atm}}{\eta}$		
<b>Variables</b>		
Hin / out=	Lámina de agua de entrada y salida (mm)	
V=	Volumen de almacenamiento	
d=	Duración del evento de precipitación (min)	
I=	Intensidad de lluvia como función del periodo de retorno (mm/h)	
A/A <sub>pav</sub> =	Área de drenaje y del pavimento poroso (m <sup>2</sup> )	
C=	Coeficiente de aporte	
Q <sub>s</sub> =	Caudal de salida de la estructura (m <sup>3</sup> /s)	
f=	Capacidad de infiltración del suelo (mm/h)	
S <sub>a</sub> =	Superficie activa (m <sup>2</sup> )	
R=	Razón (A/A <sub>pav</sub> )	
FS=	Factor de seguridad	
e=	Espesor de la capa (m)	
η=	Porosidad del suelo	
<b>Fuentes</b>		
Ministerio de vivienda y urbanismo, 1996		
Ramos, Ragúa, 2015		
Virginia, 2013		
Wuguang, In Tai, Hyunwook, & Yoon-ho, 2013		

Para la implementación de los métodos presentados, es necesario mostrar dentro de la metodología que se quiera emplear, las herramientas de análisis de precipitación que pueden emplearse. Para el caso de estudio de cuenca se emplearía las curvas de Intensidad Duración y Frecuencia, en la estimación de las variables de intensidad y duración solicitadas, por otro lado, también se podría emplear el método de bloque alterno para la generación de un hietograma de referencia.

▪ **Metodología de diseño estructural AASHTO (AROCUTIPA, 2000)**

El diseño para el pavimento flexible según la AASHTO está basado en la determinación del Número Estructural “SN” que debe soportar el nivel de carga exigido por el proyecto (AROCUTIPA, 2000).

El método de diseño AASHTO, está basado en el cálculo del Número Estructural “SN” sobre la capa subrasante o cuerpo del terraplen. Para esto se dispone de la siguiente ecuación:

$$\log W_{18} = Z_r * S_o + 9.36 + \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log(\Delta PSI)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32$$

$$* \log Mr - 8.07$$

Donde:

W18= Tráfico equivalente o ESAL'S

Zr= Factor de desviación normal para un nivel de confiabilidad R

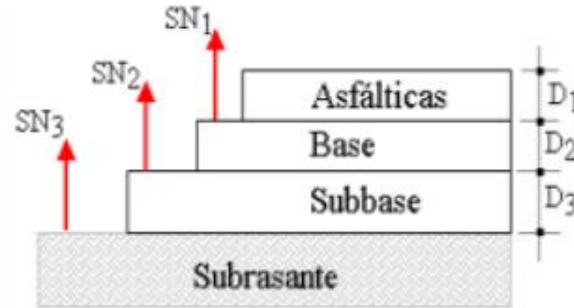
So= Desviación estándar

ΔPSI= Diferencia entre los índices de servicio inicial y el final deseado

Mr= Módulo de resiliencia efectivo de la capa

SN= Número estructural

Gráfica 2. 2 Espesores del paquete estructural



$$D_1^* \geq \frac{SN1}{a_1}$$

$$SN1^* = a_1 * D_1^* \geq SN1$$

$$D_2^* = (SN2 - SN1^*)/a_2m_2$$

$$SN1^* + SN2^* \geq SN2$$

$$D_3^* = [SN3 - (SN1^* + SN2^*)]/a_3m_3$$

Donde:

SN= Número estructural de la capa

D= Espesor de la capa

a= coeficiente estructural de la capa

m= coeficiente de la capa modificada

\*indica el valor realmente usado, el cual debe ser igual o mayor que el valor requerido según el algoritmo (Escuela de ingeniería, s.f.)

Como ya los antes mencionados, existen programas que también se encargan del cálculo de los espesores para el pavimento poroso, como ser: Programa PAVP, AASHTO 93, SWMM, entre otros.

## 2.9. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES COMPONENTES DEL HORMIGÓN POROSO.

El hormigón permeable o poroso, principalmente consiste de cemento portland normal, agregado grueso de tamaño uniforme y agua, esta combinación forma un aglomerado de agregado grueso rodeado de una delgada paca de pasta de cemento endurecida en sus

puntos de contacto. Esta configuración produce vacíos entre el agregado grueso, el cual permite que el agua se infiltre a una tasa mucho mayor que el hormigón convencional.

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

La granulometría utilizada resulta fundamental en las propiedades que tendrá el hormigón permeable o poroso. Es más aconsejable la utilización de agregados que presenten como mínimo dos caras fracturadas con ausencia casi total de finos, pues estos pueden impermeabilizar o sellar la mezcla.

### **2.9.1. Agregados.**

Los agregados deberán cumplir con los requisitos de la norma ASTM C33-07 y ASTM D448-07. Los agregados que no cumplan con las especificaciones de las normas, pero que hayan demostrado, mediante ensayos especiales o en uso, que producen concreto permeable con resistencias y permeabilidad adecuadas, pueden ser utilizadas cuando así sean autorizadas por un supervisor.

Los agregados se deben almacenar en depósitos o compartimientos adecuados y separados según el tamaño de agregado. Los controles de operación deben permitir la interrupción de la descarga de material a la báscula en el momento deseado de manera que el material se pueda medir con precisión (aplica a máquinas dosificadoras).

Existen dos características en los agregados que tienen una importante influencia sobre el comportamiento de las mezclas de concreto poroso y son:

La granulometría (tamaño de partícula y distribución)

Importante para:

- Trabajabilidad.
- Proporcionamiento de la mezcla.
- Contenido de cemento y por ende el contenido de agua.
- Compactabilidad de la mezcla.
- Estética de pavimento.

La naturaleza de las partículas (forma, porosidad, textura superficial)



La calidad del agregado en el concreto permeable es igualmente importante como en el concreto convencional. Deben ser evitadas las partículas largas o escamosas. La gradación estrecha del agregado grueso debe ser dura y limpia, libres de recubrimiento, o sustancias químicas absorbida que pueda ser perjudicial a la adherencia pasta/agregado o a la hidratación del cemento.

El peso unitario de los agregados deberá ser determinado de acuerdo a ASTM C29/C29M – 07. Para fuentes desconocidas y/o nuevos agregados, los resultados de los ensayos se llevarán a cabo por la norma ASTM C33/C33M -07 y ASTM D448-08.

### **2.9.1.1. Agregado Grueso.**

La estructura interna de un hormigón permeable puede describirse como un conjunto de partículas de agregado grueso, en contacto y unidas entre sí por puentes constituidos por la pasta de (cemento y agua) o el mortero que forma la arena (cuando hay presencia de finos en la mezcla) y la pasta; estos puentes son los que movilizan la resistencia del hormigón. Esto se puede observar en la compresión de las probetas donde se produce la ruptura de estos puentes, siendo menor el evento de fractura del agregado grueso.

El número de puentes que se forman por unidad de volumen es función principalmente del tamaño y la graduación del agregado grueso. La diferencia que presenta el concreto poroso, dependiendo del tipo de agregado grueso, es notable, con un agregado uniforme se consigue menos resistencia que con un graduado y mucho menos cuanto mayor sea el diámetro del agregado.

Ya que prácticamente existe contacto entre las partículas del agregado grueso, los esfuerzos mecánicos, se concentran, por lo que es más conveniente ser más restrictivo en lo que respecta al desgaste de los ángeles. Como valor de referencia puede emplearse el adoptado por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, que indica utilizar agregados con un desgaste de Los Ángeles menor del 22 %, absorción menor al 1 % y un coeficiente de forma superior a 0.18.

La humedad del agregado al tiempo de la mezcla es importante. La absorción del agregado deberá satisfacer la condición para lograr la condición saturada superficialmente seca (SSS). De otra manera, con un agregado seco resultara en una mezcla que le falte adecuada trabajabilidad para su colocación y compactación.

Agregado excesivamente húmedo puede contribuir a que la pasta fluya, causando obstrucción intermitente en la estructura de vacíos deseada.

### 2.9.1.2. Agregado Fino.

El agregado fino si es que es utilizado, debe cumplir con la norma ASTM C33 de “especificación Estándar para agregado de concreto”

Tabla 2. 5 Características de los agregados

Características de los agregados	Aspectos influidos en el concreto	
	Hormigón fresco	Hormigón endurecido
<b>Granulometría</b>	Manejabilidad Requerimiento de agua.	Resistencia económica Economía
<b>Limpieza (materia, orgánica, arcilla, y otros finos indeseables)</b>	Requerimiento de agua.	Durabilidad resistencia económica
<b>Densidad (gravedad específica)</b>	Peso Unitario	Peso unitario
<b>Absorción de partícula</b>	Perdida de agua en la mezcla	Resistencia mecánica permeabilidad
<b>Forma de partículas</b>	Trabajabilidad Requerimiento de agua	Resistencia económica Economía
<b>Textura superficial</b>	Trabajabilidad Requerimiento de agua	Resistencia económica Resistencia al desgaste Economía
<b>Tamaño máximo</b>	Segregación Peso unitario Requerimiento de agua.	Resistencia mecánica Peso unitario Permeabilidad Economía
<b>Resistencia a la abrasión</b>	Ninguno	Resistencia a la abrasión durabilidad
<b>Coefficiente de expansión térmica</b>	Ninguno	Propiedades térmicas.

Fuente: Normas ASTM C33-07

### 2.9.2. Cemento.

Para el concreto permeable el cemento Portland debe cumplir con las normas ASTM C150/C150M, C595/C595M y C1157/C1157M. Se recomienda verificar mediante pruebas la compatibilidad cemento-mezcla para no tener problemas con el período de

fraguado, la velocidad de aumento de la resistencia, la porosidad y la permeabilidad logrando proporcionar las propiedades idóneas para la colocación y los estados de servicio anticipados.

Una mayor dosis de cemento genera un hormigón más resistente, pero también demasiado cemento disminuirá el porcentaje de vacíos interconectados en el hormigón, perdiendo este su capacidad de infiltración. es recomendable usar una dosis que fluctuó entre los 300 Kg/m<sup>3</sup> y los 400 Kg/m<sup>3</sup>, según requisitos de resistencia y permeabilidad.

### **2.9.3. Agua.**

La calidad del agua para el hormigón poroso debe cumplir los mismos requisitos que gobiernan para los concretos convencionales. El concreto permeable deberá ser proporcionado con una relativa baja relación agua/material cementante (a/mc) (típicamente 0.26 a 0.40) por que una cantidad de agua en exceso producirá que la pasta fluya y selle el sistema de poros. La adición del agua, por lo tanto, deberá ser monitoreada constantemente en el campo. Información adicional de la calidad del agua se encuentra en el comité ACI 301.

La dosis del agua utilizada para el hormigón poroso tiene una gran repercusión en las propiedades de la mezcla. Una cantidad insuficiente de agua resultara una mezcla sin consistencia disminuyendo la trabajabilidad y con una muy baja resistencia. Una cantidad excesiva de agua, generara una pasta que selle los vacíos de la mezcla y además, lavara el cemento de la superficie del agregado, produciendo una baja resistencia al desgaste superficial.

### **2.9.4. Aditivos**

Los aditivos químicos como ser reductores de agua, retardantes y acelerantes deben cumplir las especificaciones de la norma ASTM C494 – 08; los aditivos incorporadores de aire, la norma ASTM C260 – 08 y los superfluidificantes, la norma ASTM C1017 – 08. Acelerantes pueden ser utilizados cuando el concreto poroso es colocado en climas fríos. Estudios reportan que el uso de estabilizadores de hidratación es una ayuda en el tiempo de trabajo con la mezcla y en los modificadores de viscosidad para mejorar la

trabajabilidad. Con el uso de múltiples aditivos, es recomendable llevar a cabo la colocación de pruebas para identificar cualquier problema de incompatibilidad de aditivos y verificar que las propiedades en estado fresco y endurecido son sistemáticamente alcanzables.

Se puede utilizar estabilizadores de hidratación su uso es recomendable en este tipo de hormigón poroso. La función primaria del material deberá ser como estabilizador de la hidratación, debido a que demora la hidratación del cemento. También deben cumplir con los requisitos de ASTM C494 – 08.

Hoy en día, los aditivos son considerados un ingrediente más del concreto y son empleados para modificar las propiedades de este, de tal modo que se hagan más adecuados para las condiciones de trabajo o por economía. (Sanchez De Guzman, 2001)

#### **2.9.4.1. Fibra sintética**

Las fibras sintéticas son las que se fabrican por el hombre y son el resultado de la investigación y el desarrollo de las industrias petroquímicas y textiles. Los tipos de fibras usadas en concreto son: acrílicas, aramida, carbón, nylon, poliéster, polietileno y polipropileno.

Las fibras sintéticas pueden reducir la contracción plástica y, consecuentemente, la fisuración; además pueden ayudar al concreto después que se fisura. Se producen como monofilamentos cilíndricos continuos que se pueden cortar en longitudes específicas o como filmes y cintas. Estas fibras se componen de finas fibrillas de sección transversal rectangular.

Las fibras sintéticas son generalmente utilizadas en: tabloncillos de cemento, la producción de tejas, mortero, concreto pretensado, entre otros. Una aplicación importante de las fibras sintéticas es, además, el Whitetopping ultradelgado, para retardar el desarrollo de baches en esta estructura de pavimento.

#### **2.9.4.2. Incorporador de aire**

Los aditivos inclusores de aire son usados con el objetivo de retener intencionalmente burbujas microscópicas de aire en el concreto.

El inclusor de aire es un líquido que se adiciona al concreto durante el mezclado, se agrega el agua de la mezcla y se agita para lograr una incorporación homogénea, formando así, un sistema de micro burbujas de aire que actúan como lubricante entre las partículas componentes del concreto aumentando notablemente su trabajabilidad.

La inclusión de aire optimiza eficientemente la durabilidad de los concretos que se encuentren expuestos a la humedad durante los ciclos de congelación y de hielo. Además, el aire incluido mejora la resistencia del concreto contra el descascaramiento de la superficie causado por los productos químicos deshelantes.

La inclusión de aire en el concreto, se puede producir usando un cemento inclusor de aire, o con la introducción de un aditivo inclusor de aire, o con una combinación de ambos.

#### **2.9.4.3. BV-40**

Plastiment BV-40 es un aditivo líquido para hormigón. Cumple con las especificaciones ASTM C – 494 Tipo A; aditivo químico plastificante reductor de agua. No contiene cloruros, no es toxico, no es inflamable.

Como productor de resistencia, la adición del aditivo permite reducciones de agua hasta un 15 %, manteniendo el mismo asentamiento de la mezcla original.

(esto se traducirá a un notable crecimiento de las resistencias a todas las edades dada la relación agua/cemento.

Puesto que la pasta (agua + cemento) del hormigón tiene como parte de sus funciones la de dar manejabilidad a la mezcla, podemos reducir su cuantía y el aditivo adicionado realizara esta función.

Permite una reducción de 10 – 15 % del cemento, por metro cubico de hormigón sin sacrificar resistencias

Las mezclas producidas son más fáciles de colocar, sin necesidad de aumentar ni el contenido de cemento ni el contenido de agua, no incorpora aire, no altera el tiempo de fraguado inicial de la mezcla, disminuye los inconvenientes de mezclas con alto contenido

de cemento, produce resistencias mayores a temprana edad sin contener cloruro de calcio y disminuye los riesgos de colocar mezclas poco manejables en elementos densantes armados o en encofrados esbeltos.

La dosificación varía entre 0.2 % y 0.8 % del peso del cemento de la mezcla, según el aumento de manejabilidad que desee o la reducción de agua que se proponga obtener. En otros términos, la dosificación varía entre: 100 g o 90 cc y 400 g o 223 cc. por saco de cemento de 50 kg.

## **2.10. PROPIEDADES DE PAVIMENTOS POROSOS.**

Las propiedades del hormigón poroso según Carlos Aire del instituto mexicano del cemento y del concreto son las siguientes:

### **2.10.1. Propiedades en estado fresco.**

#### **2.10.1.1. Revenimiento**

en general es cero, sin embargo, se usan valores en rango de 20 mm a 50 mm. La prueba de revenimiento no es una prueba que se considera para fines de control de calidad, como es en el caso del concreto convencional, solo se considera como un valor de referencia, debido principalmente a que la mezcla es demasiado rígida y la medición del revenimiento en la mayoría de los casos no es aplicable.

#### **2.10.1.2. Peso unitario.**

El peso unitario del hormigón permeable es del orden del 70 % del concreto convencional.

#### **2.10.1.3. Tiempo de fraguado.**

El tiempo de fraguado se reduce en el hormigón permeable, por lo que en algunos casos se debe usar aditivos químicos para permitir la adecuada colocación.

## **2.10.2. Propiedades en el estado endurecido.**

### **2.10.2.1. Porosidad.**

la porosidad es una medida de los espacios vacíos entre los agregados. La condición para que un hormigón o concreto sea poroso es que el contenido de vacíos sea mayor al 15 %. La porosidad es la propiedad física que le permite a un material traspasarlo con un fluido, aire o luz. La porosidad en un material se identifica como la relación que existe entre el porcentaje de vacíos y el volumen unitario del material al cual se le hace el estudio de porosidad, esta es muy importante en el comportamiento de los agregados dentro del concreto. Una partícula porosa es mucho menos dura que una partícula compacta o maciza, lo cual afecta no solo las propiedades mecánicas como la adherencia y la resistencia a la compresión y flexión sino también propiedades de durabilidad como la resistencia al congelamiento y deshielo, estabilidad química y resistencia a la abrasión (Sanchez De Guzman, 2001).

### **2.10.2.2. Permeabilidad.**

la permeabilidad al igual que la porosidad depende de las propiedades de los materiales, de la proporción de la mezcla y de los métodos de colocación y compactación.

La permeabilidad en el concreto se refiere a la cantidad de migración de agua u otras sustancias líquidas por los poros del material en un determinado tiempo, y así ser el resultado de; la composición de la porosidad en la pasta de concreto, la hidratación o la asociación con la liberación de calor o calor de hidratación y evaporación del agua de mezcla, la temperatura del concreto, y la formación de cavidades y grietas por contracción plástica en el concreto durante el tiempo de fraguado (Vélez, 2010)

Una de las características más importantes del concreto permeable es su capacidad para filtrar agua a través de su matriz, y su magnitud es medida por la tasa de filtración. La tasa de filtración del concreto permeable está directamente relacionada con el contenido de vacíos. Las pruebas han demostrado (Meininger 1988) que se requiere un mínimo contenido de vacíos y la tasa de filtración de una mezcla de concreto permeable. Debido a que la tasa de filtración aumenta a medida que el contenido de vacíos aumenta, y, en consecuencia, la resistencia a la compresión disminuye, el reto en la dosificación de

mezcla de concreto permeable es lograr un equilibrio entre una tasa de percolación y una resistencia a la compresión aceptables.

Gráfica 2. 3 Relación entre el contenido de aire y la tasa de percolación

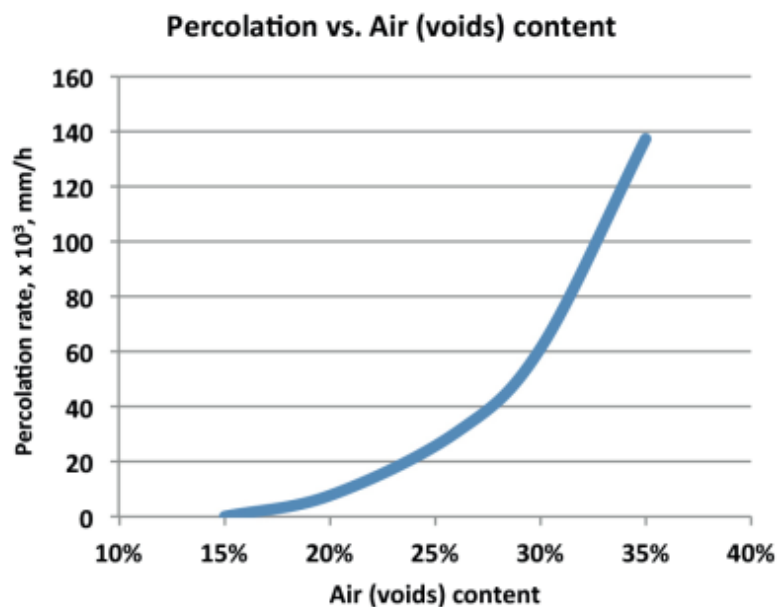


Figura 2.1 (Adaptado de Meininger 1988)

Los poros de mayor tamaño reducen la obstrucción del sistema de poros y se obtienen usando agregado de mayor tamaño. Así pues, se aumenta el tamaño del poro y por tanto la permeabilidad al reemplazar agregado de menor tamaño con un porcentaje creciente del agregado de mayor tamaño, debido a que las partículas gruesas al no encajar en el vacío generado por las partículas finas no terminan obstruyendo el sistema de poros.

Además del tamaño del agregado, la proporción cemento/agregado influyen de forma significativa en la porosidad y la conectividad de los poros. Por otra parte, se necesita una porosidad mínima del 15% para lograr una infiltración significativa.

### **Determinación de la permeabilidad.**

El concreto permeable es un material homogéneo compuesto por partículas sólidas (agregado grueso) y vacíos interconectados a través de un sistema de poros, donde los vacíos pueden estar ocupados por agua o aire.



Al ser un medio poroso el flujo de agua se mueve a través de poros muy pequeños y bastantes irregulares por lo que su velocidad es muy pequeña, pudiendo despreocuparse las pérdidas por fricción en el concreto permeable pues estas dependen directamente de la velocidad de flujo a través del medio por el cual circulan.

#### Permeámetros

Son instrumentos de laboratorio utilizados para medir la permeabilidad de materiales porosos como el concreto permeable o los suelos gravosos. Su funcionamiento está basado en la Ley de Darcy y para el caso de concretos permeables; la norma ACI 522-R brinda las dimensiones y consideraciones para determinar la conductividad hidráulica o capacidad de filtración de los concretos permeables mediante la utilización de estos aparatos.

Existen dos tipos de permeámetros, el permeámetro de carga constante empleado para determinar la conductividad en materiales donde el tiempo de evacuación del fluido es relativamente rápido, pues este no presenta mayor dificultad para permitir el paso del agua a través de su estructura como en el caso de los suelos gravosos.

$$k = \frac{V \times L}{h \times A \times t}$$

V = volumen del medio poroso (cm<sup>3</sup>)

L = longitud del medio poroso (cm)

H = carga hidráulica (cm)

A = área del medio poroso (cm<sup>2</sup>)

t = tiempo que tarda el fluido en atravesar el medio poroso (s)

Por otro lado, para medir la permeabilidad en medios densos el flujo presenta mayor dificultad para atravesar el sistema de poros como es el caso del concreto permeable y los suelos arcillosos se emplea un permeámetro de carga variable.

$$k = \frac{a \times L}{A \times t} \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right)$$

a = área del tubo de alimentación del permeámetro (cm<sup>2</sup>)

A = área del medio poroso (cm<sup>2</sup>)

L = longitud del medio poroso (m)

h1 = carga hidráulica inicial (cm)

h2 = carga hidráulica final (cm)

$t_T$  = tiempo que tarda el fluido en atravesar el medio poroso (s)

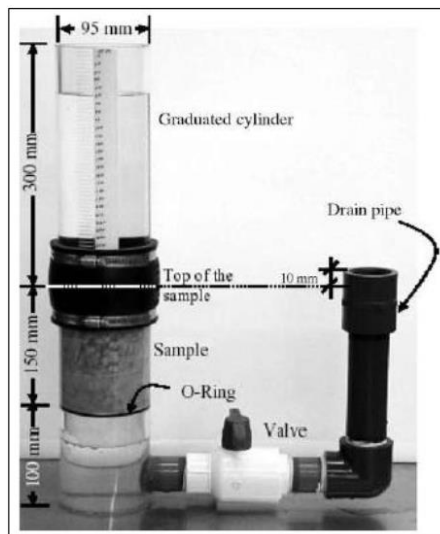
Características del permeámetro de carga variable según la norma ACI-522R

Dado que el concreto permeable tiene gran red de poros interconectados, los métodos convencionales empleados para evaluar la conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad de un concreto normal no son aplicables al concreto permeable.

Para determinar la conductividad hidráulica de concreto permeable se emplea un permeámetro descendente de carga variable, tomando como referencia las medidas dadas en la norma ACI-522R.

El permeámetro consiste en tubo de PVC de 34 cm de largo y 4" de diámetro interior en la parte superior del permeámetro sobre el cual se medirá la carga hidráulica  $h_1$ .

Imágen 2. 4 Permeámetro



Fuente: Norma ACI 522R

En la parte inferior del tubo de 34 cm va la muestra de concreto permeable a ser ensayada, esta tiene 4" de diámetro y 8" de altura para simular el espesor típico de un pavimento de 20 cm. la muestra está cubierta de celofán dentro de un tubo del mismo espesor para asegurar que el flujo del agua sea unidireccional y descendente; impidiendo que el agua se desplace por los costados de la muestra.

En la parte inferior de ensayo descansa sobre una tee sanitaria de 4" con reducción a 2" la cual sirve como base a la muestra de ensayo y permite la evacuación del flujo de agua a través un sistema de tuberías y accesorios.

En el otro extremo, el permeámetro cuenta con una reducción de 2" a 1 ½", seguida de una tubería de 1 ½" que se conecta una válvula tipo globo la cual nos permitirá controlar el flujo del agua de un extremo a otro del permeámetro.

Al otro extremo de la válvula se una a un niple 1 ½" x 6" el cual se conecta a su vez a un codo de 90° x 1 ½". Sobre el codo se monta el otro extremo del permeámetro de carga variable el cual consiste en una tubería de PVC con diámetro de 1 ½" que llega 1 cm por encima del nivel referencia de la parte superior de la muestra de concreto permeable.

Se coloca una tubería que llegue 1 cm por encima del nivel de referencia con el fin de evitar la generación de un flujo insaturado durante la realización de la prueba de permeabilidad.

La condición de flujo insaturado se origina por un gradiente hidráulico negativo en la cual el flujo se mueve en sentido contrario provocando un error en la medición de la conductividad hidráulica del concreto permeable.

Imágen 2. 5 Permeámetro



Fuente: Elaboración propia

Imágen 2. 6 Accesorios para el permeámetro



Fuente: elaboración propia

### 2.10.3. Propiedades mecánicas.

#### 2.10.3.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión puede ser definida como la máxima medida de resistencia que ofrece un espécimen de concreto a una carga axial. Esta se determina de acuerdo a lo estipulado en la norma ASTM C39.

La resistencia a la compresión es la característica mecánica principal del concreto, y se ha establecido una relación directa entre el módulo de elasticidad del concreto y su resistencia a la compresión, donde, a mayor resistencia del concreto, mayor es el módulo de elasticidad del mismo. La resistencia es del orden de 7 MPa, sin embargo, se pueden desarrollar resistencias hasta de 28 MPa. Esta se ve influenciada directamente por los materiales, componentes, el esfuerzo de compactación y por el contenido de vacíos.

Esta propiedad está influenciada por los distintos porcentajes de componentes en la mezcla y la energía usada en la compactación durante el vaciado del concreto permeable. En relación a ello, es posible obtener altas resistencias a la compresión, pero ello solo se consigue con una reducción en el contenido de vacíos afectando el fin del concreto. Por otra parte, la resistencia a la compresión aumenta con la disminución del tamaño de agregado y la incorporación de aditivos o polímeros para una misma gradación de agregado.

Una cantidad de pasta excesiva puede generar una estructura de vacíos llena. Un contenido de pasta escaso puede generar una capa de pasta reducida alrededor del agregado y una resistencia a la compresión reducida. El contenido más adecuado de material cementoso depende en gran medida del tamaño y la gradación del agregado. Otro factor que influye es el espesor de la pasta alrededor del agregado el cual depende del tamaño del agregado, la cantidad de cemento y la proporción agua/cemento.

#### **2.10.3.2. Resistencia a la flexión.**

La resistencia a la flexión puede variar entre 1 y 3.8 MPa. Su determinación puede estar sujeta a una importante variabilidad, por lo que es común medir la resistencia a compresión y usar relaciones empíricas para estimar su valor.

El esfuerzo máximo de flexión se denomina módulo de rotura (MR). La resistencia a la flexión se puede definir como la resistencia a tracción del concreto, para el caso del concreto el valor de la resistencia a la flexión es menor que el valor de la resistencia a compresión.

Para la realización del cálculo del módulo de rotura se debe identificar qué tipo de falla se produjo y en qué parte se produjo. Sin embargo, obtener el dato real por medio de las diferentes fórmulas es difícil, esto se debe como primera medida a que supone un comportamiento elástico del concreto hasta que ocurre la falla. El módulo de rotura del concreto es una medida útil para el diseño de pavimentos realizados en este material, puesto que las placas de pavimento trabajan principalmente a flexión; de ahí que en estos casos la calidad del concreto se especifique indicando su módulo de rotura (Sanchez De Guzman, 2001).

### 2.10.3.3. Contracción.

La contracción por secado en el concreto permeable se presenta más pronto, sin embargo, es menor, del orden de la mitad de lo esperado en el concreto convencional. La menor contracción permite eliminar el número de juntas, o en todo caso, respecto a los pavimentos construidos con concretos convencionales, colocar más espaciadas.

En resumen, en cuanto a las propiedades del hormigón poroso, se reflejan en la siguiente tabla.

Tabla 2. 6 Propiedades típicas del hormigón poroso

<b>PROPIEDAD</b>	<b>RANGO</b>
Revenimiento (mm)	0-20
Peso unitario ( $\frac{Kg}{m^3}$ )	1600 - 2000
Tiempo de fraguado, (hora)	1
Porosidad (%) (en volumen)	15 - 25
Resistencia a compresión (MPa)	7-28
Resistencia a Flexión (MPa)	1 – 3.8

Fuente: Instituto Mexicano del cemento y del concreto

## 2.11. SISTEMA DE INFILTRACIÓN EN LAS CAPAS DEL PAVIMENTO POROSO.

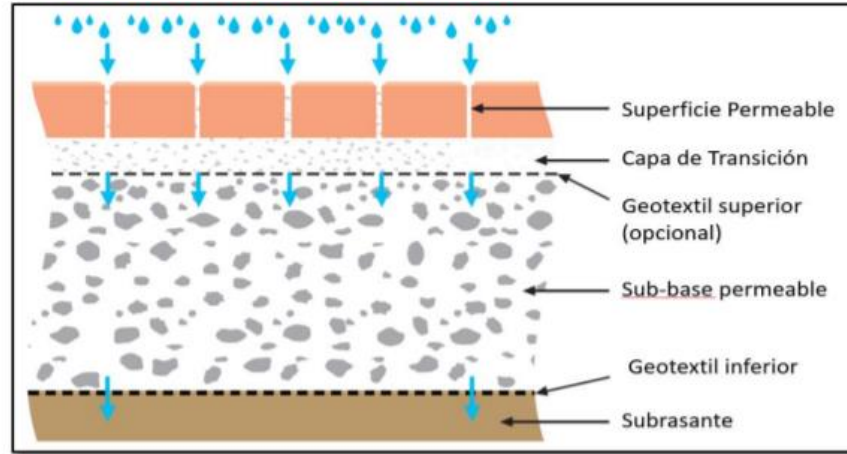
Interpave (2020) menciona 3 sistemas de infiltración de los pavimentos permeables, cada uno de estos sistemas posee características únicas para ser aplicados de acuerdo a las condiciones específicas de la zona.

### 2.11.1. Sistema de infiltración total.

Apropiado para la subrasante que presente una elevada permeabilidad, ya que el agua se filtrará por todas las capas del pavimento incluyendo la subrasante.

Es en la sub-base permeable donde el agua es retenida y almacenada temporalmente para posteriormente infiltrarse en la subrasante.

Imágen 2. 7 Sistema de infiltración total

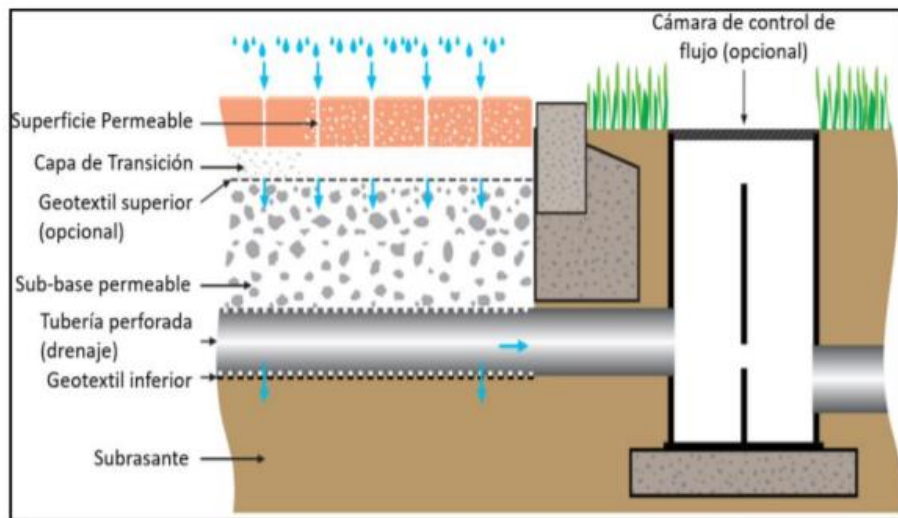


Fuente: Adaptado por Interpave (2020)

### 2.11.2. Sistema de infiltración parcial.

Es utilizado cuando la subrasante no es capaz de infiltrar toda el agua que le llega por lo que un porcentaje de esta debe ser drenada por unas tuberías de salida que se encuentran conectadas a la sub-base permeable, los cuales conducirán el agua a otros dispositivos de drenaje, como cunetas o alcantarillas.

Imágen 2. 8 Sistema de infiltración Parcial.

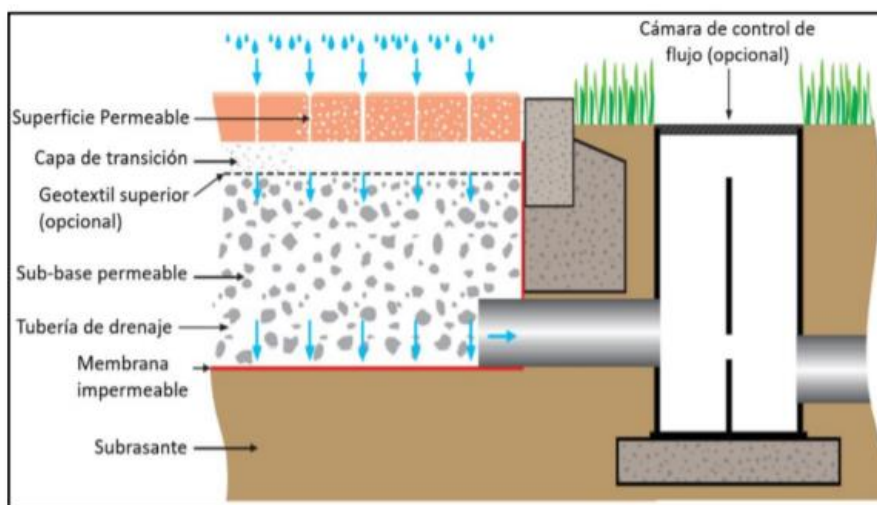


Fuente: Adaptado por Interpave (2020)

### 2.11.3. Sistema sin infiltración.

Sistemas adecuados para cuando la permeabilidad de la subrasante es baja o se pretenda recolectar en su totalidad el agua infiltrada, para su reutilización o riego. Es por ello que será necesario la aplicación de una membrana impermeable y flexible, colocada en la parte superior de la subrasante y en los laterales de la sub-base permeable. Sobre la membrana impermeable se colocan las tuberías de drenaje conectada a la sub-base permeable, que derivarán el agua hacia otros dispositivos de drenaje como cunetas o alcantarillas.

Imágen 2. 9 Sistema sin infiltración



Fuente: Adaptado por Interpave (2020)



CAPÍTULO III  
METODOLOGÍA Y DESARROLLO DE  
LA INVESTIGACIÓN

## CAPÍTULO III METODOLOGÍA Y DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

### 3.1. SELECCIÓN DE LOS MATERIALES

Los materiales empleados en la construcción de carreteras, deben cumplir con requisitos y especificaciones técnicas, que garanticen un buen comportamiento durante su periodo de vida.

Para el presente trabajo de investigación se utilizó materiales existentes en la ciudad de Tarija que se ajustan dentro de las normativas. Además de tenerlos a disponibilidad.

Los agregados necesarios, se extrajeron según el manual de carreteras (ASTM C75 AASHTO T2-91). del acopio o almacenamiento de la planta de agregados lado del margen derecho del Río Guadalquivir como se muestra en la imagen.

Imagen 3. 1 Croquis general del lugar de la chancadora



Fuente: Programa Google Earth

Imagen 3. 2 Croquis específico del lugar de la chancadora



Fuente: Programa Google Earth

Imagen 3. 3 Acopio del material



Fuente: Elaboración propia

## 3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

### 3.2.1. Granulometría

La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado tal como se determina por análisis de tamices. El tamaño de partícula del agregado se determina por medio de tamices de malla de alambre.

La granulometría se determina de acuerdo con la norma ASTM C136. Los tamaños de agregados que se utilizaron para la realización de las mezclas fueron de N° 67 (3/4”) y de forma natural para el concreto convencional.

Imagen 3. 4 Granulometría



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3. 5 Uso del ROP-TAP



Fuente: Elaboración propia

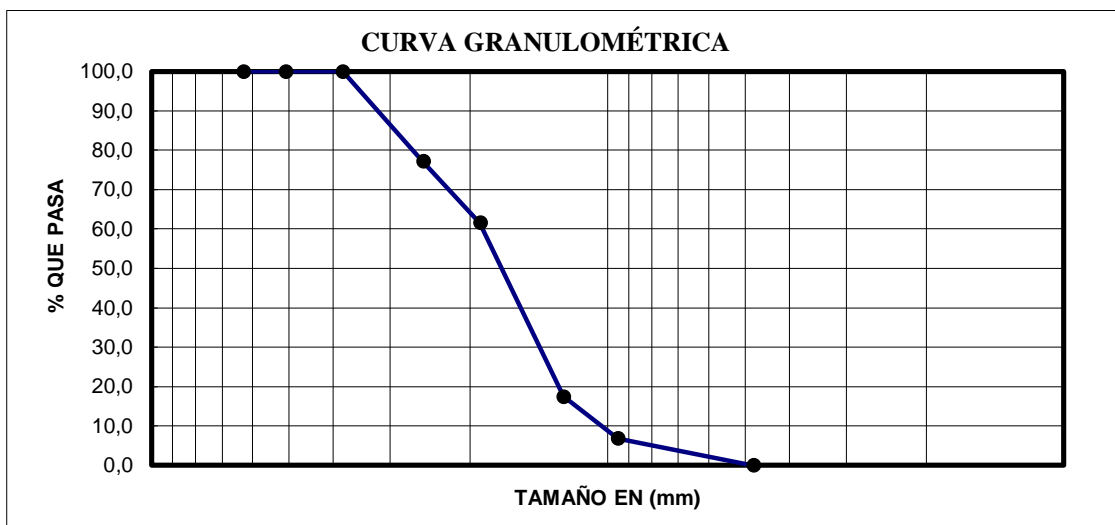
### RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3. 1 Granulometría del agregado grueso

Peso total (gr.) =		15450					
Tamiz	Tamaño (mm)	Peso ret.	Retenido acumulado		% que pasa del total	% que pasa s/g Especific. ASTM	
			(gr)	(%)			
2 1/2"	63	0.00	0.00	0.00	<b>100.0</b>	100	100
2"	50.8	0.00	0.00	0.00	<b>100.0</b>	100	100
1 1/2"	38.10	0.00	0.00	0.00	<b>100.0</b>	95	100
1"	25.40	3525.00	3525.00	22.82	<b>77.2</b>		
3/4"	19.05	2410.00	5935.00	38.41	<b>61.6</b>	35	75
1/2"	12.50	6815.00	12750.00	82.52	<b>17.5</b>		
3/8"	9.50	1645.00	14395.00	93.17	<b>6.8</b>	10	30
Nº4	4.80	1054.00	15449.00	99.99	<b>0.0</b>	0	5
BASE	0	0.45	15449.45	100.00	<b>0.0</b>		
<b>Suma =</b>		15449.45	<b>Tamaño max = 1 1/2"</b>				
<b>Pérdidas =</b>		5					
<b>MF =</b>		7.32					

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.1 Curva granulométrica del agregado grueso



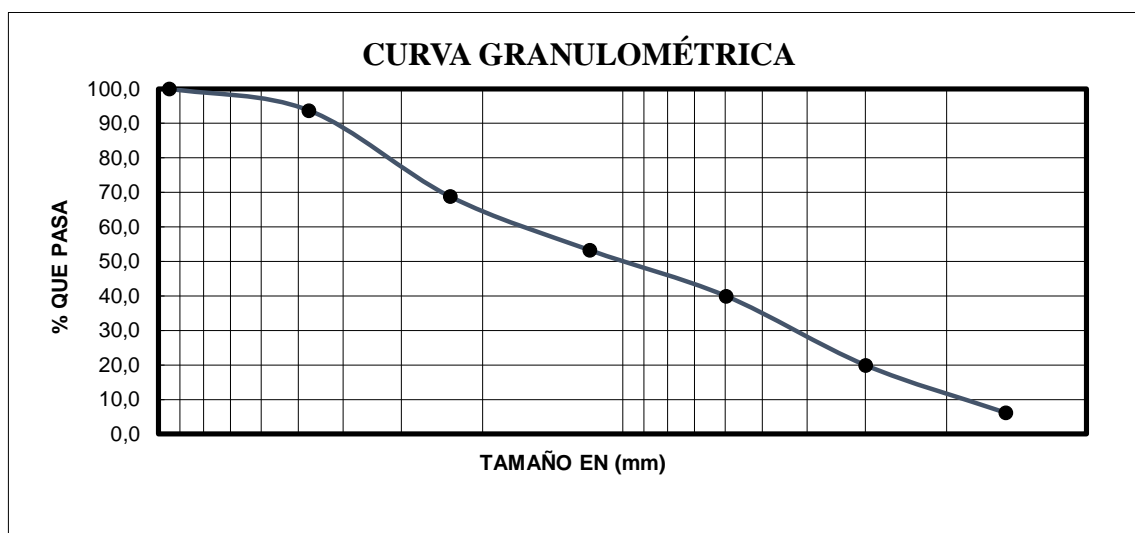
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 2 Granulometría del agregado fino

Peso total (gr.)			883.2				
Tamices	Tamaño (mm)	Peso ret.	Ret. acum	% Ret	% que pasa del total	Especificación ASTM C-33	
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
Nº4	4.75	55.50	55.50	6.28	93.7	95	100
Nº8	2.36	220.00	275.50	31.19	68.8	80	100
Nº16	1.18	137.30	412.80	46.74	53.3	50	85
Nº30	0.60	117.40	530.20	60.03	40.0	25	60
Nº50	0.30	177.00	707.20	80.07	19.9	5	30
Nº100	0.15	121.40	828.60	93.82	6.2	0	10
BASE		52.30	880.90	99.74	0.3		
	<b>Suma</b>	880.9					
	<b>Pérdidas</b>	2.3					
	<b>MF =</b>	<b>3.18</b>					

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 2 Curva granulométrica del agregado fino



### 3.2.2. Desgaste mediante la máquina de los ángeles (ASTM E 131; AASHTO T96-99)

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento.

Para garantizar la resistencia de los agregados se los somete al ensayo de desgaste de Los Ángeles, ASTM E 131, mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o abrasión.

La cantidad de material a ensayar y el número de esferas a incluir dependen de la granulometría del agregado grueso en la tabla a continuación, se muestra el método a emplear; así como la cantidad de material, número de esferas, número de revoluciones y tiempo de rotación, para cada uno de ellos. La gradación que deberá ser representativa de la gradación original suministrado.

Tabla 3. 3 Tabla de pesos del agregado grueso y N° de esferas para el Desgaste de los Ángeles.

Gradación		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (gr)			
Pasa	Retenido				
1 1/2"	1"	1250±25			
1" 3/4"	3/4"	1250±25			
3/4" 1/2"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2" 3/8"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8" 1/4"	1/4"			2500±10	
1/4" N°4	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
<b>Peso total</b>		<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>
Número de muestras		12	11	8	6
N°de revoluciones		500	500	500	500
Tiempo de rotación		30	15	15	15

Fuente: Norma ASTM, C131.

## PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Imagen 3. 6 Lavar y secar en el horno a una temperatura de 105-110 °C el material antes de introducir en la Máquina de Los Ángeles



Fuente: Elaboración propia



Imagen 3. 7 Pesar los materiales retenidos en las cantidades del método que corresponden



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3. 8 Gravilla deshecha en la máquina de los ángeles



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3. 9 Sacar material y las cargas abrasivas



Fuente: Elaboración propia

Tamizar la muestra por los tamices N° 8 y N° 12, para luego lavar y dejar al horno a secar y pesar

### RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.4 Tabla de datos del Desgaste de Los Ángeles (grava)

Gradación A		Gradación B		Gradación C		Gradación D	
Tamiz	Peso ret.	Tamiz	Peso ret.	Tamiz	Peso ret.	Tamiz	Peso ret.
1"	-	1/2"	2500	1/4"	-	N° 8	-
3/4"	-	3/8"	2500	N°4	-		
1/2"	-						

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 5 Tabla de resultados del Desgaste de Los Ángeles (grava)

Material	Peso inicial	Peso final	% De desgaste	Especificación ASTM
A				35 % máx
<b>B</b>	<b>5000</b>	<b>3865</b>	<b>22,70</b>	<b>35 % máx</b>
C	-	-	-	35 % máx
D	-	-	-	35 % máx

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.3. Peso específico del agregado grueso ASTM C-127 (grava, gravilla)

El cálculo del peso específico de la muestra seca de agregado establece un punto de referencia para medir los pesos específicos necesarios en la determinación de las proporciones agregadas, asfalto, y vacíos que van a usarse en los métodos de diseño.

Para ello se realizó el ensayo con tres muestras, cada una de 5 Kg, tanto de grava como de gravilla, se siguieron los pasos como se muestra a continuación:

#### PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

Imagen 3. 10 Lavar y dejar saturar con agua por 24 horas

El agregado retenido en el tamiz N°4



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3. 11 Material para el ensayo



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3. 12 Secado de la muestra en el horno.



Fuente: Elaboración propia

**RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:**

Tabla 3. 6 Tabla de resultados del peso específico (grava)

Muestra N°	Peso muestra secada "A" (gr)	Peso muestra saturada sup. seca "B" (gr)	Peso muestra sat.dentro del agua "C" (gr)	Peso específico a granel (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico S.S.S. (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico aparente (gr/cm <sup>3</sup> )
1	5420.00	5479.00	3455.00	2.68	2.71	2.76
2	5410.00	5473.00	3420.00	2.64	2.67	2.72
3	5430.00	5488.00	3432.00	2.64	2.67	2.72
<b>Promedio</b>				<b>2.66</b>	<b>2.69</b>	<b>2.74</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.4. Peso específico del agregado fino (ASTM C 128)

Se realizó el ensayo según la norma, con tres muestras y se siguieron los pasos como se muestran a continuación:

#### PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Imagen 3. 13 Se obtiene el material necesario



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3. 14 Lavar y dejar saturar en agua por 24 horas

El material que pasa por el tamiz N° 4



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3. 15 Colocar en un matraz 500 gr de material, llenar agua y pesar



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3. 16 Sacar la muestra del matraz y dejar secar en el horno para posteriormente pesar



Fuente: Elaboración propia

## RESULTADOS DE LA PRÁCTICA

Tabla 3. 7 Tabla de resultados del peso específico (arena)

MU N°	Peso muestra (gr)	Peso matríz (gr)	Muestra + matríz + agua (gr)	Peso agua agregado al matríz "W" (ml) ó (gr)	Peso muestra secada "A" (gr)	Vol. del matríz "V" (ml)	P. E. granel (gr/cm <sup>3</sup> )	P. E. S.S.S. (gr/cm <sup>3</sup> )	P. E. aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	% de ABS
1	500	216.7	996.7	280.00	493.1	500.00	2.24	2.27	2.31	1.38
1	500	216.7	999.8	283.10	493	500.00	2.27	2.31	2.35	1.40
1	500	216.7	999.5	282.80	493.00	500.00	2.27	2.30	2.35	1.40
<b>Promedio</b>							<b>2.26</b>	<b>2.29</b>	<b>2.34</b>	<b>1.39</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.5. Peso unitario de los agregados

Este ensayo tiene como objeto describir cómo se puede obtener el peso unitario de los agregados y de las mezclas de agregados a la temperatura ambiente.

## RESULTADOS DE LA PRÁCTICA

Tabla 3. 8 Peso unitario

<b>Peso unitario suelto</b>					
Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipient (cm <sup>3</sup> )	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> )
1	5725.00	8902.33	19525.00	13800.00	1.550
2	5725.00	8902.33	19380.00	13655.00	1.534
3	5725.00	8902.33	19425.00	13700.00	1.539
<b>Promedio</b>					<b>1.541</b>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 9 Peso compactado

<b>Peso unitario compactado</b>					
Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm <sup>3</sup> )	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)	Peso unitario suelto (gr/cm <sup>3</sup> )
1	5725.00	8902.33	20785.00	15060.00	1.692
2	5725.00	8902.33	20895.00	15170.00	1.704
3	5725.00	8902.33	20940.00	15215.00	1.709
<b>Promedio</b>					<b>1.702</b>

Fuente: Elaboración propia



Tabla 3. 10 Peso unitario suelto

<b>Peso unitario suelto</b>					
<b>Muestra N°</b>	<b>Peso recipiente (gr)</b>	<b>Volumen recipiente (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso recip. + muestra suelta (gr)</b>	<b>Peso Muestra suelta (gr)</b>	<b>Peso unitario suelto (gr/cm<sup>3</sup>)</b>
1	5660.00	10000.00	21750.00	16090.00	1.609
2	5660.00	10000.00	21987.00	16327.00	1.633
3	5660.00	10000.00	22090.00	16430.00	1.643
<b>Promedio</b>					<b>1.628</b>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 11 Peso unitario compactado

<b>Peso unitario compactado</b>					
<b>Muestra N°</b>	<b>Peso recipiente (gr)</b>	<b>Volumen recipiente (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso recip. + muestra suelta (gr)</b>	<b>Peso muestra suelta (gr)</b>	<b>Peso unitario suelto (gr/cm<sup>3</sup>)</b>
1	5660.00	10000.00	22580.00	16920.00	1.692
2	5660.00	10000.00	22990.00	17330.00	1.733
3	5660.00	10000.00	22960.00	17300.00	1.730
<b>Promedio</b>					<b>1.718</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.3. DOSIFICACIÓN

#### 3.3.1. Dosificación para el hormigón convencional

##### Cálculo para la dosificación

El cálculo de la dosificación se hizo de acuerdo a la norma ACI 522R-06 de hormigón permeable

Tabla 3. 12 Características de los agregados por la ACI

##### Características de los agregados

Ensayo	Unidad	Valor
1.- Módulo de finura de la arena (MF)	s/u	2.99
2.- Peso unitario compactado de la grava ( PUC )	kg/m <sup>3</sup>	1702
3.- Peso específico de la arena ( $\gamma_f$ )	gr/cm <sup>3</sup>	2.61
4.- Peso específico de la grava ( $\gamma_g$ )	gr/cm <sup>3</sup>	2.69
5.- Absorción de la arena ( Aa )	%	1.22
6.- Absorción de la grava ( Ag )	%	1.79
7.- Humedad de la arena ( Ha )	%	0.00
8.- Humedad de la grava ( Hg )	%	0.00
9.- Tamaño máximo nominal ( TMN )	pulg	1 1 /2
10.- Tamaño máximo ( TM )	pulg	1 1 /2
11.- Peso específico del cemento	gr/cm <sup>3</sup>	3.15

Tabla 3. 13 Características de diseño

**Características del diseño**

Resistencia de diseño ( fck´)	<b>310</b>	kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia característica ( fck ) (Tabla 11.12)	395	kg/cm <sup>2</sup>
Asentamiento ( S ) (Tabla 11.4)	3	pulg
Relación agua / cemento ( a/c ) (Tabla 11,13)	0.44	s/u

**Datos de tablas**

Vol. agr. grueso / Vol. unitario concreto ( b/bo ) (Tabla 11.15)	0.7	s/u
Requerimiento de agua ( A ) (Tabla 11.6)	163	kg/m <sup>3</sup>

**Cálculos**

Peso Agregado grueso ( Pag )	<b>1191.130112</b>	kg/m <sup>3</sup>
Peso cemento ( Pc )	<b>370.45</b>	kg/m <sup>3</sup>
Volumen de agregado grueso (Vag)	<b>443.26</b>	lt/m <sup>3</sup>
Volumen del cemento ( Vc )	<b>117.60</b>	lt/m <sup>3</sup>
Volumen de arena ( Vaf )	<b>276.13</b>	lt/m <sup>3</sup>
Peso del agregado fino ( Paf )	<b>721.99</b>	kg/m <sup>3</sup>

Tabla 3. 14 Pesos de los ingredientes

**Pesos secos de los ingredientes por (m<sup>3</sup>) de concreto**

Ingredientes	Peso seco kg/m <sup>3</sup>	Volumen absoluto lt/m <sup>3</sup>	Peso específico gr/cm <sup>3</sup>
Cemento	370.45	117.60	3.15
Agua	163	163	1
Grava	1191.130112	443.26	2.69
Arena	721.99	276.13	2.61

**TOTAL 2446.57 1000.00**

**Pesos húmedos de los materiales**

Peso húmedo de la arena ( Pha )	721.99	kg/m <sup>3</sup>
Peso húmedo de la grava ( Phg )	1191.13	kg/m <sup>3</sup>

**Corrección de agua**

Agua corregida a la grava ( Acg )	21.36	lt/m <sup>3</sup>
Agua corregida a la arena ( Acf )	8.81	lt/m <sup>3</sup>
Total agua corregida ( Atc )	30.17	lt/m <sup>3</sup>

Tabla 3. 15 Peso húmedo de los ingredientes y proporción de la mezcla

**Pesos húmedos de los ingredientes por (m<sup>3</sup>) de hormigón**

<b>Ingrediente</b>	<b>Peso seco kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Peso húmedo kg/m<sup>3</sup></b>
<b>Cemento</b>	370.45	370.45
<b>Agua</b>	163.00	193.17
<b>Grava</b>	1191.13	1191.13
<b>Arena</b>	721.99	721.99
Total	2446.57	2476.74

**Proporciones de mezcla**

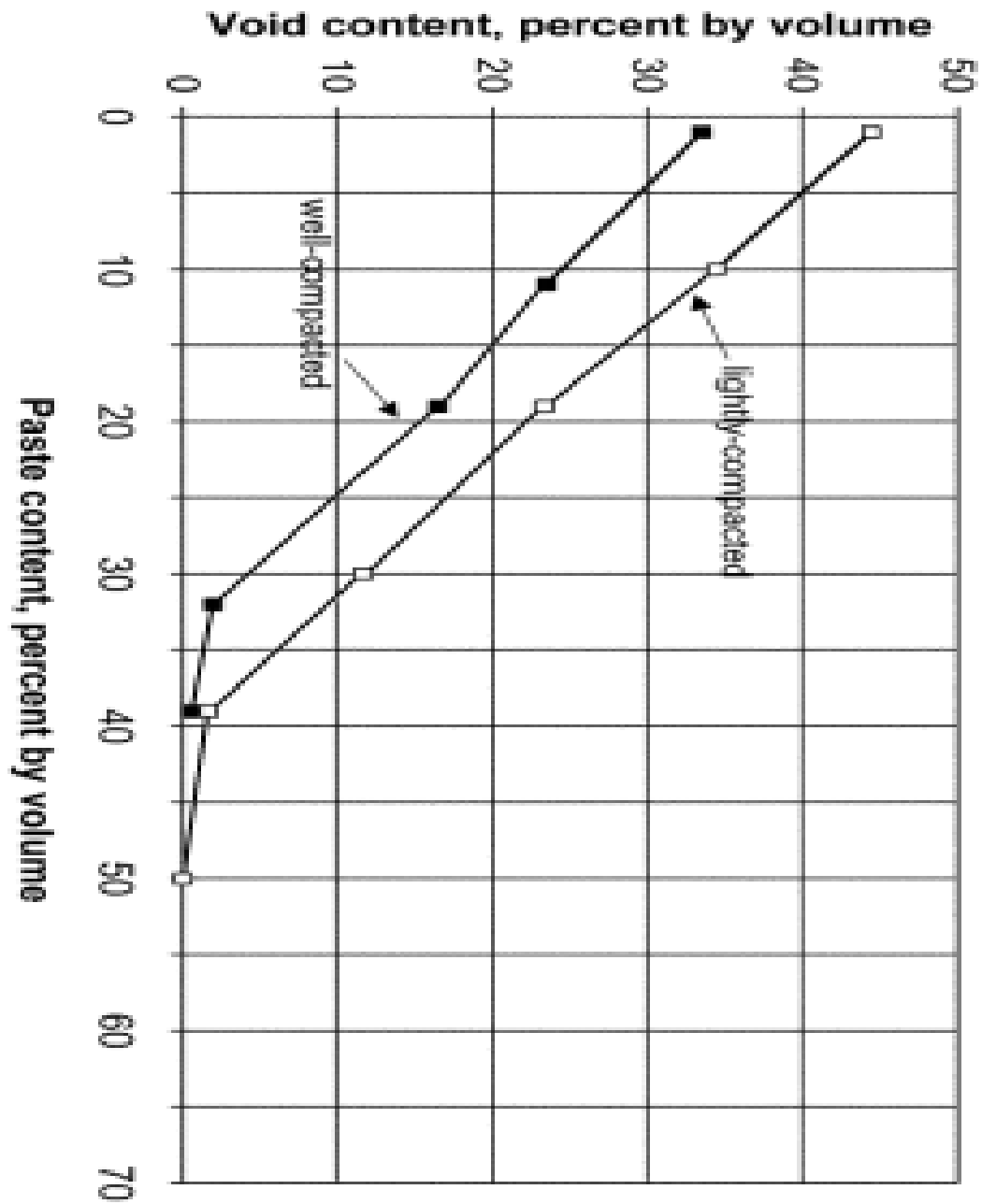
<b>Cemento</b>	<b>Arena</b>	<b>Grava</b>
<b>1.0</b>	<b>1.95</b>	<b>3.22</b>

Fuente: Elaboración propia

**3.3.2. Dosificación para el hormigón poroso**

El procedimiento de dosificación para el concreto permeable está basado en el volumen de pasta necesaria para ligar las partículas de agregado en conjunto, manteniendo el contenido de vacíos necesario.

Gráfica 3. 3 Relación entre pasta y contenido de vacíos para agregados de Tamaño N° 8 según designación de la norma ASTM C-33



Fuente: Comité ACI 211.3. Apéndice 6

La cantidad de agregado depende de la densidad seca varillada y los valores  $b/b_o$  seleccionados del cuadro 3.16

Tabla 3. 16 Relación b/bo

Porcentaje de agregado fino	b/bo	
	ASTM C33 tamaño N° 8	ASTM C33 tamaño N° 67
0	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

Fuente: Comité ACI 211.3. Apéndice 6

Una vez que el volumen de pasta se determina de la Gráfica 2.10 y seleccionada la relación Agua/Material cementante deseada, el cemento y las cantidades de agua pueden determinarse a partir de la relación:

$$Vp = \frac{C}{3150} + \frac{W}{1000}$$

Donde C es la masa de cemento y W es la masa de agua. Si la relación agua/cemento es W/C, entonces:

$$W = \left(\frac{W}{C}\right) * C$$

Entonces:

$$W = \frac{C}{3150} + \frac{W * C}{C * 1000}$$

Cuando el agregado fino se utiliza, el volumen de pasta se debe reducir un 2 % por cada 10 % de agregado fino, del total del agregado para hormigón poroso bien compactado y un 1 % por cada 10 % de agregado fino del total del agregado para hormigón poroso ligeramente compactado. Estas reducciones son necesarias para mantener el mismo porcentaje de vacíos por volumen.

La dosificación de la mezcla calculada debe ser revisada en el laboratorio por una muestra de prueba y ajustes según sea necesario.

Además, se recomienda que las muestras o bachadas de prueba incluyan dos mezclas adicionales con 30 kg/m<sup>3</sup> más y 30 kg/m<sup>3</sup> de cemento menos. Estas mezclas deben también incluir los ajustes apropiados en:

- Agua para producir la relación necesaria de agua/material cementante
- Agregados para mantener el porcentaje de vacíos requerido. En general, el contenido de vacíos requerido y la tasa de percolación con una pasta estable, es más importante, que la resistencia a la compresión de la mezcla.

Tabla 3. 17 Cantidades para dosificar

Material	Cantidad	Unidad	1 Probeta	3 Probetas	8 Probetas
Cemento	360,82	kg/m <sup>3</sup>	1,91	5,74	15,30
Agua	144,33	l/m <sup>3</sup>	0,76	2,29	6,12
Grava	1328,98	kg/m <sup>3</sup>	7,04	21,13	56,35
Arena	158,88	kg/m <sup>3</sup>	0,84	2,53	6,74

Fuente: Elaboración propia

El aditivo incorporador de aire será el que vaya cambiando desde 0.0 2% - 0.10 %.

Tabla 3. 18 Cantidad de aditivo incorporador de aire y BV-40

Aditivo incorporador de aire	0.02 %	1.577	gr
Aditivo incorporador de aire	0.04 %	3.154	gr
Aditivo incorporador de aire	0.06 %	4.731	gr
Aditivo incorporador de aire	0.08 %	6.308	gr
Aditivo incorporador de aire	0.10 %	7.884	gr

BV-40	0,50%	gramos	9,56173	28,68519	76,49384
-------	-------	--------	---------	----------	----------

Fuente: Elaboración propia

Para obtener resistencia aceptable con la fibra sintética se usó una cantidad constante de 550 gr para toda la prueba.

El límite de acuerdo a las especificaciones técnicas de la fibra es de 600 gr por m<sup>3</sup>.

Usando la granulometría que se detalla a continuación, se procedió a combinar los materiales para su ensayo correspondiente

De acuerdo a la búsqueda realizada no se encontró un método de dosificación patrón para la producción de concreto permeable. Dentro de las metodologías que ya ha sido ensayadas se destacan las desarrolladas por: National Ready Mixed Concrete Association

– NRMCA, ACI 522R, Nguyen et al., Yahia e Kabagire, Jimma y Rangaraju, Costa y Gentil.

El aditivo BV-40 fue usado de acuerdo a sus especificaciones, las cuales dicen usar entre 0.2 – 0.5 % del peso del cemento. El mismo que hace bajar la cantidad usada de cemento en un 15%.

Tabla 3. 19 Granulometría N° 8

Peso total (gr.)			25360				
Tamices	Tamaño	Peso	Peso retenido	% que pasa		Limite	Limite
	(mm)	retenido	acumulado	(%)	del total	inferior	superior
		(g)	(g)				
1 1/2"							
1"							
3/4"	19	0.00	0.00	0.0	100.0	100.00	<b>100</b>
1/2"	12.7	3550.00	3550.00	14.0	86.0	85.00	<b>100</b>
3/8"	9.52	19000.00	22550.00	88.9	11.1	10.00	30
N°4	4.75	1400.00	23950.00	94.4	5.6	0	10
N°10	2.38	800.00	24750.00	97.6	2.4	0	5
		24750.00					

Fuente: Elaboración propia

Imagen 3. 17 Dosificación en la mezcladora



Fuente: Elaboración propia



Imagen 3. 18 Muestra de agregados y aditivos

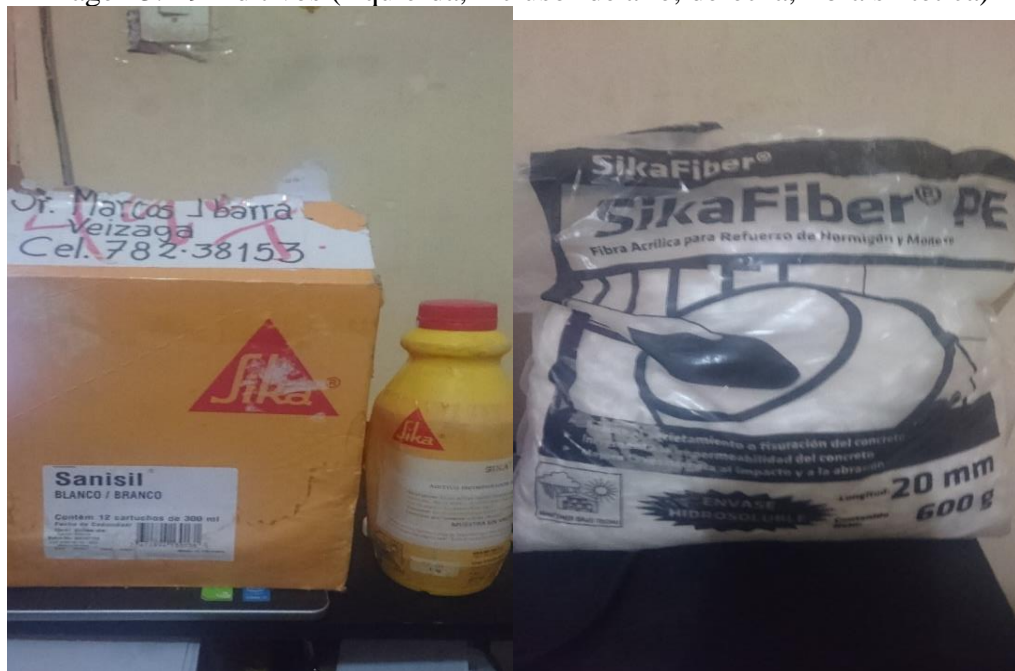


Fuente: Elaboración propia

### 3.4. ADITIVOS

En las imágenes adyacentes se muestran los aditivos usados en la realización del hormigón poroso

Imagen 3. 19 Aditivos (izquierda, inclusor de aire; derecha, fibra sintética)



Fuente: Elaboración propia

### **3.5. CURADO DEL CONCRETO PERMEABLE**

Los diferentes tipos de concreto necesitan de diferentes durabilidades, dependiendo de la exposición del ambiente y de las propiedades deseables. Los componentes del concreto, la proporción de éstos, la interacción entre los mismos y los métodos de colocación y curado determinan la durabilidad final y la vida útil del concreto.

El curado del concreto permeable se lo hizo en la piscina del laboratorio de hormigón que simula las condiciones óptimas en obra.

Imagen 3. 20 Curado de probetas



Fuente: Elaboración propia

### **3.6. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL HORMIGÓN**

#### **3.6.1. Ensayos en estado endurecido del concreto permeable**

##### **3.6.1.1. Resistencia a compresión**

La resistencia a la compresión del concreto ha sido tradicionalmente la propiedad más identificada con su comportamiento como material de construcción, lo cual se debe a tres principales razones:

- En la mayoría de casos, la resistencia a la compresión tiene influencia directa en la capacidad de carga de las estructuras.
- Es la propiedad más fácil de determinar en el concreto endurecido.
- Los resultados de su determinación pueden ser utilizados como datos índices de otras propiedades del concreto.

Al igual que el concreto convencional esta propiedad en el concreto permeable no debe ser relacionada exclusivamente con la calidad del concreto, más bien debe ser vista como una de las diversas propiedades que el concreto permeable endurecido requiere para ser durable. La resistencia a compresión del concreto poroso no es una propiedad definida al igual que el concreto convencional como pudiera suponerse debido a varios factores y condiciones cambiantes que intervienen en su determinación. Debido a que en la actualidad se viene trabajando métodos de prueba para este ensayo (ACI 522), en el presente trabajo de investigación se tomó como referencia trabajos anteriores tanto como para la elaboración de especímenes como para el ensayo a compresión donde detallamos a continuación.

#### **EQUIPO UTILIZADO**

Moldes estándar de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, con placa de soporte, varilla para apisonar el hormigón de 5/8", collar para los moldes, aceite para untar en los moldes, molde de metal galvanizado en forma de tronco de cono, cintra métrica y mezclador de concreto

#### **ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES**

Una vez obtenido la trabajabilidad requerida mediante el cono invertido y obtenido el contenido de vacíos mediante el peso unitario, procedemos a la elaboración de especímenes.

Imagen 3. 21 Muestra de mezclado del concreto permeable



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a norma se podría trabajar en el Huso granulométrico N° 67 o N° 8 debido a que en estas franjas se consigue una mejor resistencia a la compresión. La teoría también afirma que franjas mayores presentan fallas evidentes en las muestras.

Con la teoría de investigación se realizó pruebas utilizando 4 capas, con 10 golpes/capa mejorando los resultados, lo más importante se solucionó el problema de fallas locales.

Imagen 3. 22 Muestra de concreto permeable



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los ensayos de compresión simple, se cumplió lo establecido en la norma ASTM C 39/39M.

Imagen 3. 23 Ensayo de compresión



Fuente: Elaboración propia

### 3.6.1.2. Resistencia a tensión indirecta por compresión diametral

En todo caso la resistencia a flexión se cambió al cálculo de la tensión indirecta por compresión diametral basada en la norma ASTM C496.

Por cada mezcla de concreto se realizaron 4 especímenes para ensayar. La velocidad de carga aplicada para las mezclas permeables fue de 7 ton/min y para la mezcla convencional fue de 2.5 ton/min. En la figura se muestra un ensayo de resistencia de tensión indirecta por compresión diametral de un espécimen de concreto permeable.

Imagen 3. 24 Tensión indirecta



Fuente: Elaboración propia

### 3.6.1.3. Resistencia a flexión en vigas

La prueba de flexión es muy útil especialmente en relación con el diseño de losas para carreteras y pistas de aeropuertos porque en ellas la tensión por flexión es un factor crítico. El valor del módulo de ruptura depende de las dimensiones de la viga, y sobre todo de la distribución de la carga. Se emplean dos sistemas: la carga en un punto central, que produce una distribución triangular del momento de flexión, de manera que el esfuerzo máximo tiene lugar solo en una sección de la viga; y la carga simétrica en dos puntos, que produce un momento constante de flexión entre los puntos de carga es de esperarse que la carga en dos puntos rendirá un valor de modulo menor que cuando se aplica una carga en un solo punto.

Para reflejar esta resistencia a la flexión se trabaja en vigas de 15\*15\*53 cm donde por medio del equipo para la rotura a flexión y se utilizara el equipo de dos puntos de carga.

Imagen 3. 25 Ensayo de flexión de vigas



Fuente: Elaboración propia

La resistencia a flexión se calcula mediante la fórmula clásica:

$$R = \frac{3Pa}{bd^2}$$

Donde:

R = Modulo de rotura kg/cm<sup>2</sup>

P = Máxima carga aplicada por la máquina de ensayo

L = Longitud libre entre apoyos en metros

B = Ancho promedio de la muestra en metros

D = Espesor de la muestra

a = Distancia promedio entre la línea de fractura más cercana, medida sobre la zona de tensión en metros.

#### 3.6.1.4. Permeabilidad

Las características más importantes del concreto permeable es su capacidad de filtrar agua a través de su estructura. La permeabilidad del concreto se mide con un permeámetro de caída variable.

La teoría e implementación del ensayo se encuentra en la norma ACI-522R y fue desarrollada en el capítulo 2.2.4.1. permeámetros donde se detalla el funcionamiento, elaboración y procedimiento del ensayo para determinar el coeficiente de permeabilidad del concreto permeable.

Imagen 3. 26 Ensayo de flexión de vigas



Fuente: Elaboración propia

### **Equipo y materiales**

Permeámetro de carga variable, probeta y cronometro

### **Procedimiento**

Se envuelve el espécimen con latex u otro material impermeable para evitar la pérdida de agua por las caras laterales.

Se agrega agua al cilindro graduado para llenar la celda del espécimen y la tuerca de drenaje.

La muestra se acondiciona permitiendo que el agua drene a través de la tubería hasta que el nivel en el cilindro graduado sea el mismo que la parte superior de la tubería de drenaje. Esto minimiza cualquier bolsa de aire en la muestra y asegura que la muestra esté completamente saturada.

Con la válvula abierta se llena el permeámetro hasta lograr que salga agua por el tubo de 1 ½”.

Se cierra la válvula y se llena el tubo graduado hasta la altura inicial del ensayo.



Luego se abre la valvula y se mide el tiempo en segundos  $t$  requerido para que el agua caiga desde un cabezal inicial  $h_1$  a un cabezal final  $h_2$ .

Se calcula la permeabilidad con la ecuacion de Darcy para permeámetro de carga variable.

$$k = \frac{a \times L}{A \times t} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

$a$  = área del tubo de alimentación del permeámetro (cm<sup>2</sup>)

$A$  = área del medio poroso (cm<sup>2</sup>)

$L$  = longitud del medio poroso (m)

$h_1$  = carga hidráulica inicial (cm)

$h_2$  = carga hidráulica inicial (cm)

$t_T$  = tiempo que tarda el fluido en atravesar el medio poroso (s)

Imagen 3. 27 Losas de hormigón poroso



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3. 28 Prueba de permeabilidad



Fuente: Elaboración propia

### 3.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

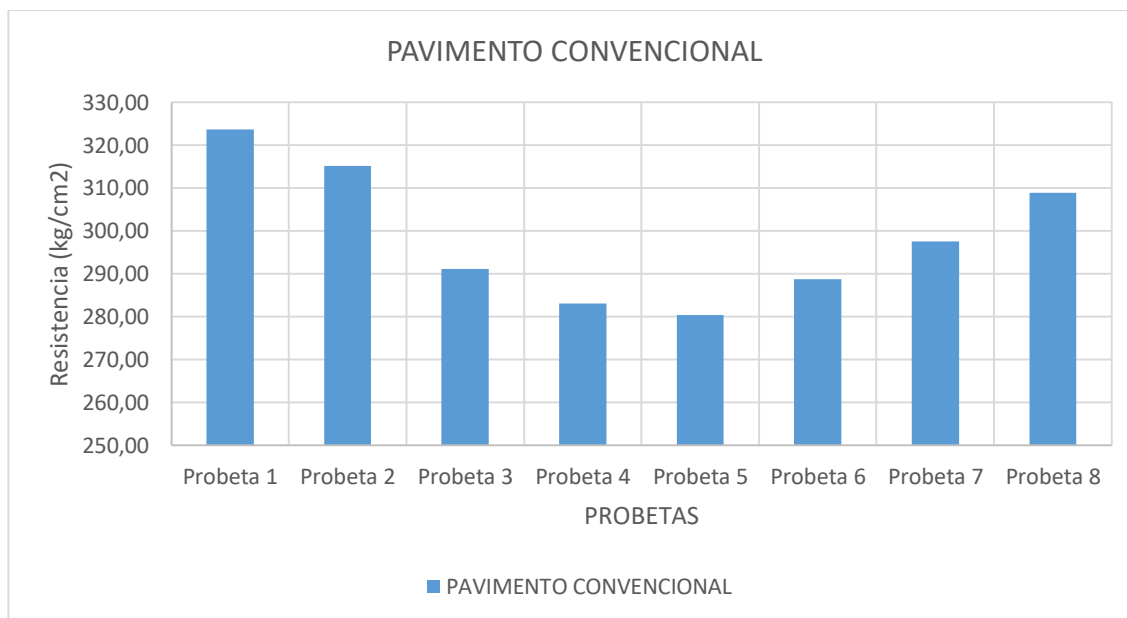
#### 3.7.1. Resultados de las probetas de hormigón convencional sometidas a compresión

Tabla 3. 20 Resistencia a compresión del hormigón convencional

Probeta Nº	Elemento	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
1	Probeta 1	30/09/2019	15/11/2019	46	178.99	568	57946.20	323.74	<b>323.74</b>
2	Probeta 2	30/09/2019	15/11/2019	46	178.99	553.00	56406.00	315.14	<b>315.14</b>
3	Probeta 3	30/09/2019	15/11/2019	46	176.63	504.20	51428.40	291.17	<b>291.17</b>
4	Probeta 4	30/09/2019	15/11/2019	46	176.63	490.30	50010.60	283.15	<b>283.15</b>
5	Probeta 5	30/09/2019	15/11/2019	46	176.63	485.50	49521.00	280.37	<b>280.37</b>
6	Probeta 6	30/09/2019	15/11/2019	46	176.63	500.10	51010.20	288.81	<b>288.81</b>
7	Probeta 7	30/09/2019	15/11/2019	46	176.63	515.20	52550.40	297.53	<b>297.53</b>
8	Probeta 8	30/09/2019	15/11/2019	46	176.63	535.00	54570.00	308.96	<b>308.96</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 4 Resistencia a compresión de cada probeta de hormigón convencional



Fuente: Elaboración propia

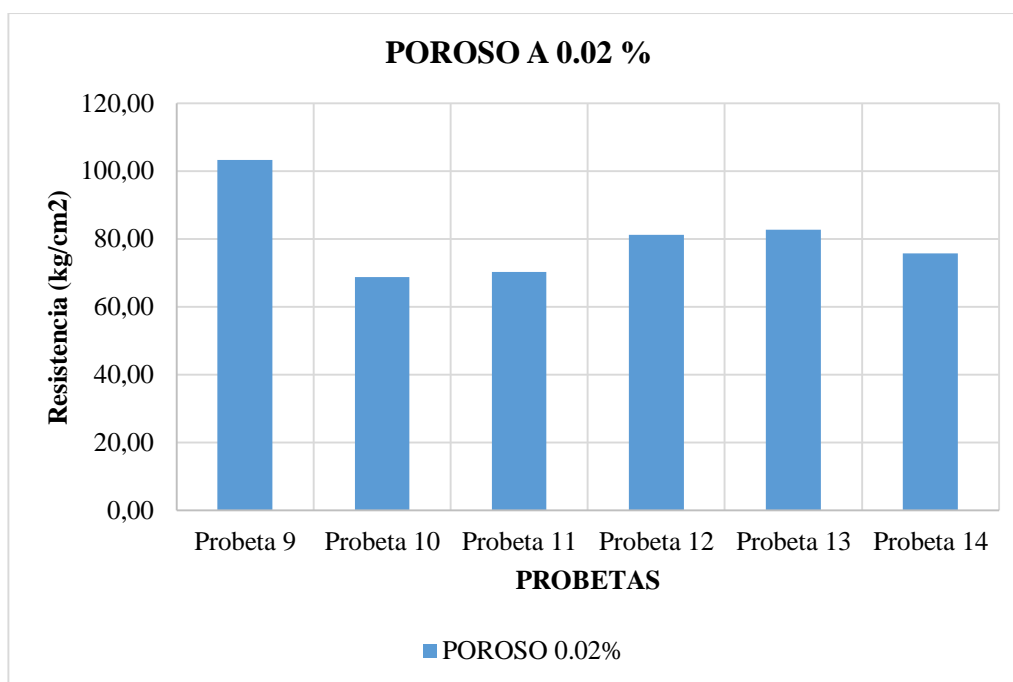
### 3.7.2. Resultados de las probetas de hormigón poroso sometidas a compresión

Tabla 3. 21 Resistencia a compresión del hormigón poroso con fibra sintética y 0.02 % de Incorporador de aire.

Probeta N°	Elemento	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
1	Probeta 9	08/10/2019	15/11/2019	38	176.63	189	19257.60	109.03	<b>103.30</b>
2	Probeta 10	08/10/2019	15/11/2019	38	176.63	126	12831.60	72.65	<b>68.83</b>
3	Probeta 11	08/10/2019	15/11/2019	38	176.63	128	13096.80	74.15	<b>70.26</b>
4	Probeta 12	08/10/2019	15/11/2019	38	176.63	149	15147.00	85.76	<b>81.25</b>
5	Probeta 13	08/10/2019	15/11/2019	38	176.63	151	15432.60	87.37	<b>82.79</b>
6	Probeta 14	08/10/2019	15/11/2019	38	176.63	139	14127.00	79.98	<b>75.78</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 5 Resistencia a compresión de cada probeta de hormigón poroso con fibra sintética y 0.02 % de aditivo



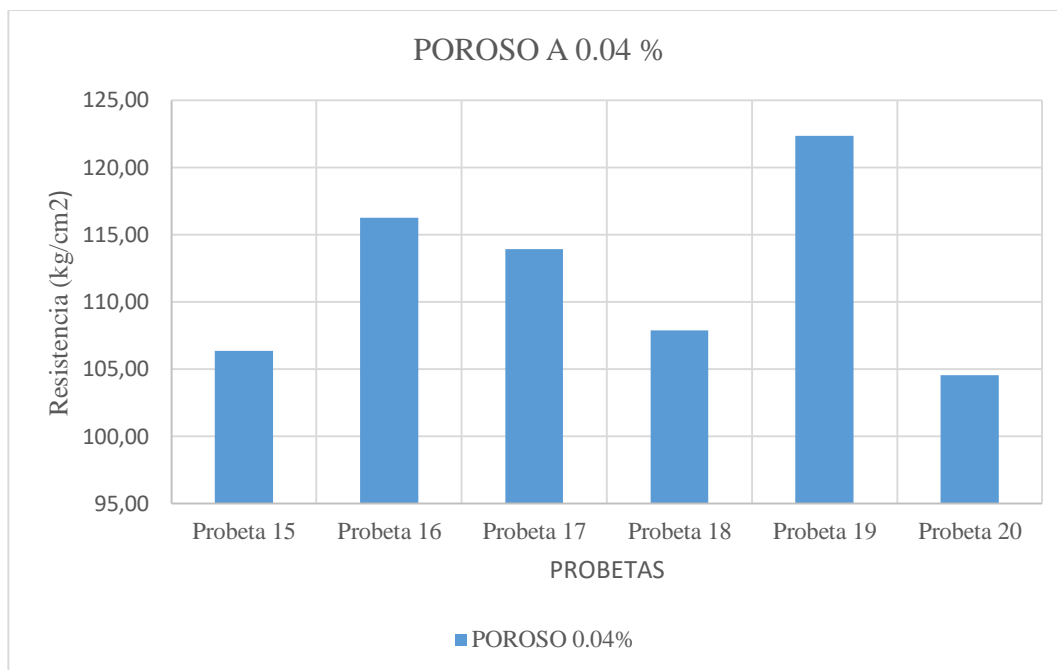
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 22 Resistencia a compresión del hormigón poroso con fibra sintética y 0.04 % de incorporador de aire.

Probeta N°	Elemento	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
7	Probeta 15	22/10/2019	15/11/2019	24	176.63	178	18105.00	102.51	<b>106.37</b>
8	Probeta 16	22/10/2019	15/11/2019	24	176.63	194	19788.00	112.03	<b>116.26</b>
9	Probeta 17	22/10/2019	15/11/2019	24	176.63	190	19390.20	109.78	<b>113.92</b>
10	Probeta 18	22/10/2019	15/11/2019	24	176.63	180	18360.00	103.95	<b>107.87</b>
11	Probeta 19	22/10/2019	15/11/2019	24	176.63	204	20828.40	117.92	<b>122.37</b>
12	Probeta 20	22/10/2019	15/11/2019	24	176.63	175	17799.00	100.77	<b>104.58</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 6 Resistencia a compresión del hormigón poroso con fibra sintética y 0.04 % de incorporador de aire



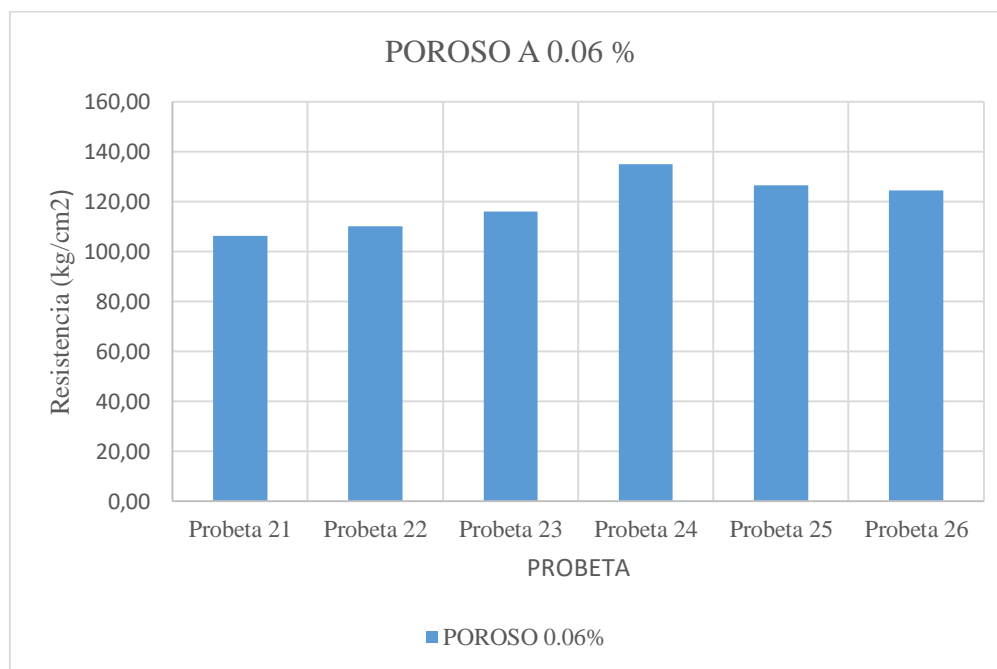
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 23 Resistencia a compresión del hormigón poroso con fibra sintética y 0.06 % de incorporador de aire.

Probeta N°	Elemento	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
13	Probeta 21	27/10/2019	15/11/2019	19	176.63	184	18757.80	106.20	<b>116.18</b>
14	Probeta 22	27/10/2019	15/11/2019	19	176.63	191	19431.00	110.01	<b>120.35</b>
15	Probeta 23	27/10/2019	15/11/2019	19	176.63	201	20502.00	116.08	<b>126.98</b>
16	Probeta 24	27/10/2019	15/11/2019	19	176.63	233	23806.80	134.79	<b>147.45</b>
17	Probeta 25	27/10/2019	15/11/2019	19	176.63	219	22327.80	126.41	<b>138.29</b>
18	Probeta 26	27/10/2019	15/11/2019	19	176.63	216	21981.00	124.45	<b>136.14</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 7 Resistencia a compresión del hormigón poroso con fibra sintética y 0.06 % de incorporador de aire.



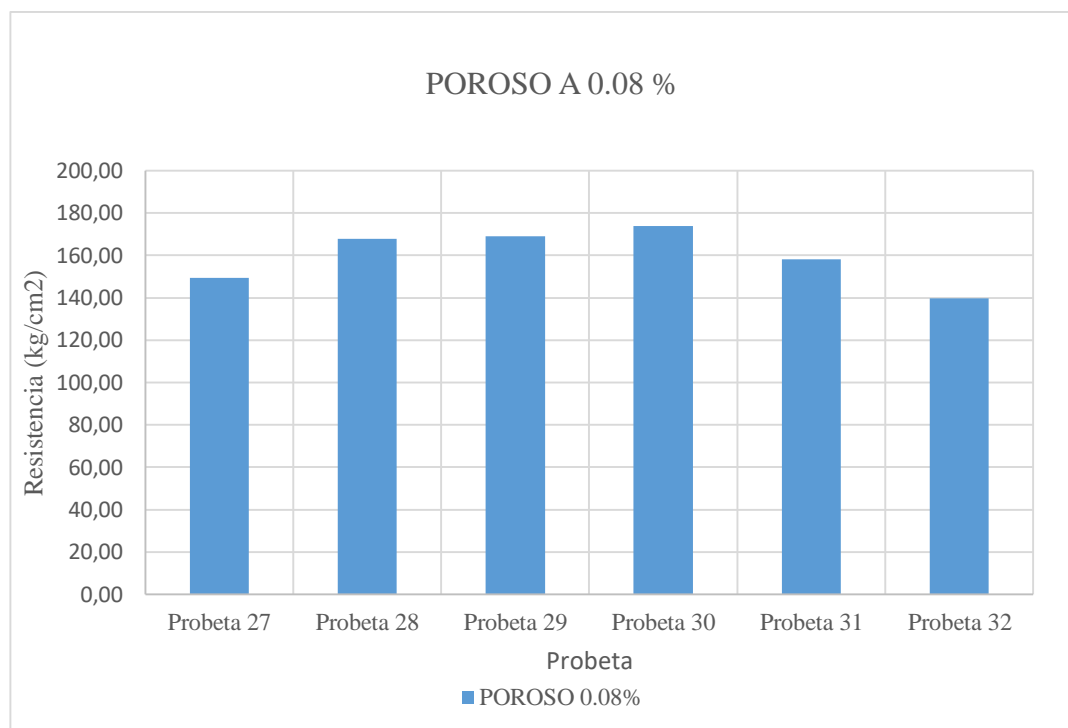
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 24 Resistencia a compresión del hormigón poroso con fibra sintética y 0.08 % de incorporador de aire.

Probeta N°	Elemento	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
19	Probeta 27	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	231	23511.00	133.11	<b>149.47</b>
20	Probeta 28	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	259	26407.80	149.51	<b>167.89</b>
21	Probeta 29	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	261	26591.40	150.55	<b>169.06</b>
22	Probeta 30	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	268	27336.00	154.77	<b>173.79</b>
23	Probeta 31	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	244	24888.00	140.91	<b>158.23</b>
24	Probeta 32	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	216	21981.00	124.45	<b>139.75</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 8 Resistencia a compresión del hormigón poroso con fibra sintética y 0.08 % de incorporador de aire.



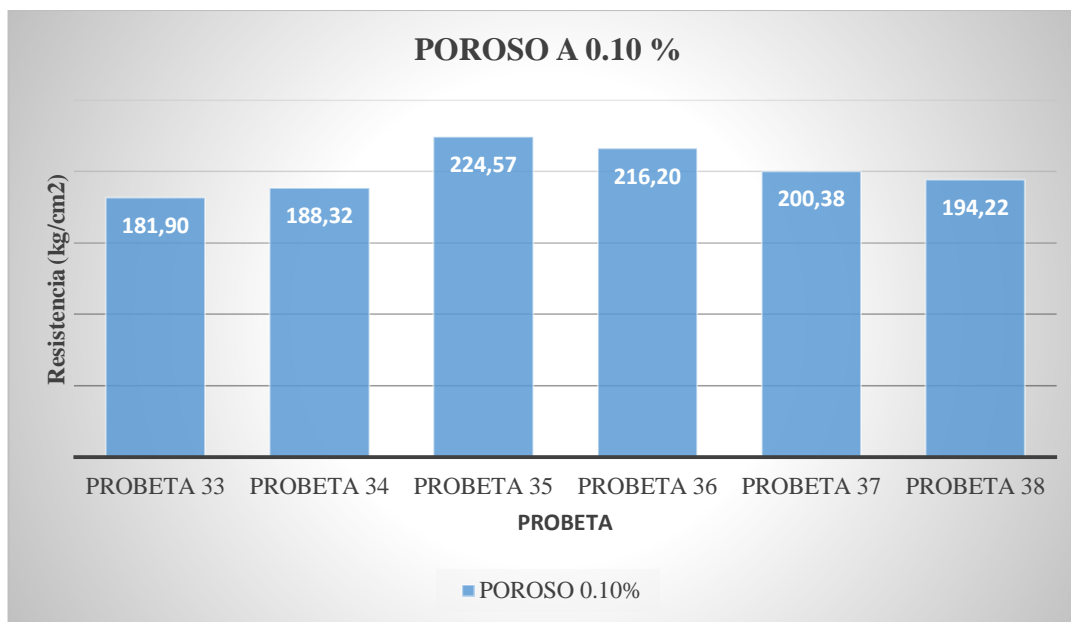
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 25 Resistencia a compresión del hormigón poroso con fibra sintética y 0.10 % de incorporador de aire.

Probeta N°	Elemento	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
25	Probeta 33	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	281	28611.00	161.99	<b>181.90</b>
26	Probeta 34	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	290	29620.80	167.70	<b>188.32</b>
27	Probeta 35	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	346	35322.60	199.99	<b>224.57</b>
28	Probeta 36	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	333	34006.80	192.54	<b>216.20</b>
29	Probeta 37	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	309	31518.00	178.45	<b>200.38</b>
30	Probeta 38	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	300	30549.00	172.96	<b>194.22</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 9 Resistencia a compresión del hormigón poroso con fibra sintética y 0.10 % de incorporador de aire.



Fuente: Elaboración propia

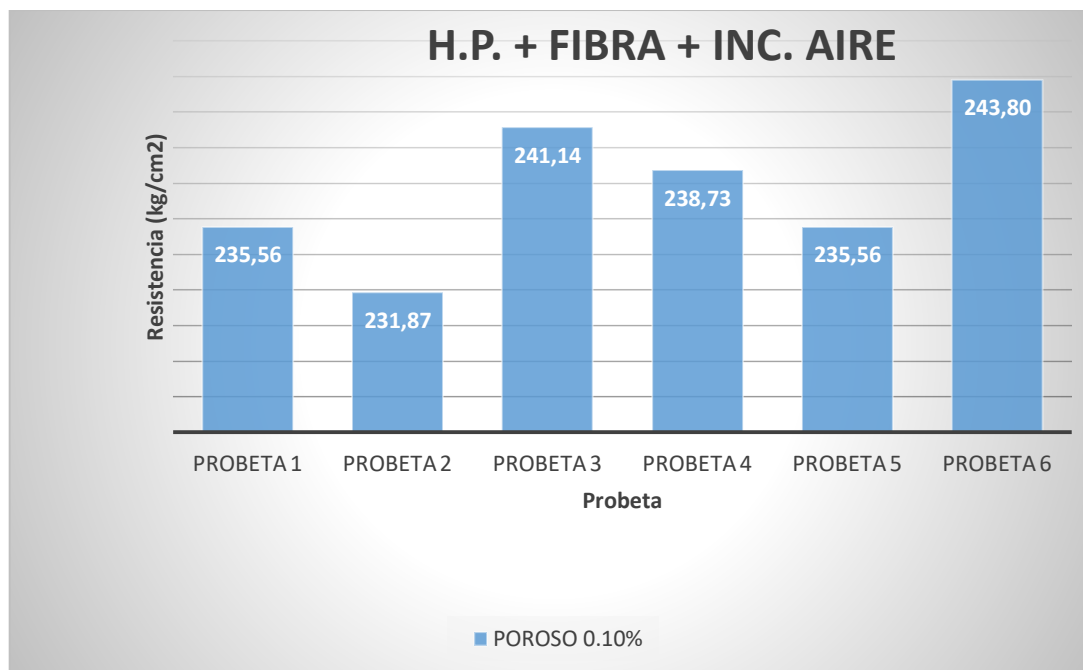
Tabla 3. 26 Resistencia a compresión del hormigón poroso con fibra sintética y 0.10 % de incorporador de aire.

Probeta Nº	Elemento	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
1	Probeta 1	6/11/2020	4/12/2020	28	182,08	421	42891,00	235,56	<b>235,56</b>
2	Probeta 2	6/11/2020	4/12/2020	28	180,89	411	41942,40	231,87	<b>231,87</b>
3	Probeta 3	6/11/2020	4/12/2020	28	177,57	420	42819,60	241,14	<b>241,14</b>
4	Probeta 4	6/11/2020	4/12/2020	28	181,84	426	43411,20	238,73	<b>238,73</b>
5	Probeta 5	6/11/2020	4/12/2020	28	182,08	421	42891,00	235,56	<b>235,56</b>
6	Probeta 6	6/11/2020	4/12/2020	28	180,65	432	44043,60	243,80	<b>243,80</b>

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 3. 10 Resistencia a compresión del hormigón poroso con fibra sintética y 0.10 % de incorporador de aire.



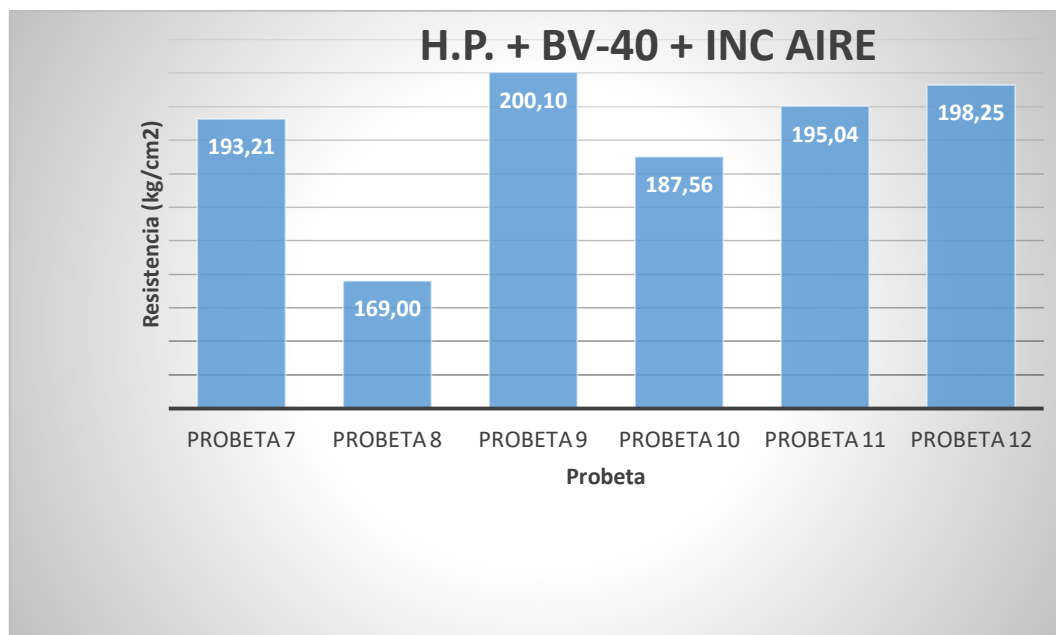
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 27 Resistencia a compresión del hormigón poroso con BV-40 + Inc aire

Probeta N°	Elemento	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
7	Probeta 7	6/11/2020	4/12/2020	28	180,65	342	34904,40	193,21	<b>193,21</b>
8	Probeta 8	6/11/2020	4/12/2020	28	181,37	301	30651,00	169,00	<b>169,00</b>
9	Probeta 9	6/11/2020	4/12/2020	28	181,37	356	36291,60	200,10	<b>200,10</b>
10	Probeta 10	6/11/2020	4/12/2020	28	181,37	334	34017,00	187,56	<b>187,56</b>
11	Probeta 11	6/11/2020	4/12/2020	28	181,37	347	35373,60	195,04	<b>195,04</b>
12	Probeta 12	6/11/2020	4/12/2020	28	181,37	353	35955,00	198,25	<b>198,25</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 11 Resistencia a compresión de cada probeta de hormigón poroso con BV-40 + Inc aire



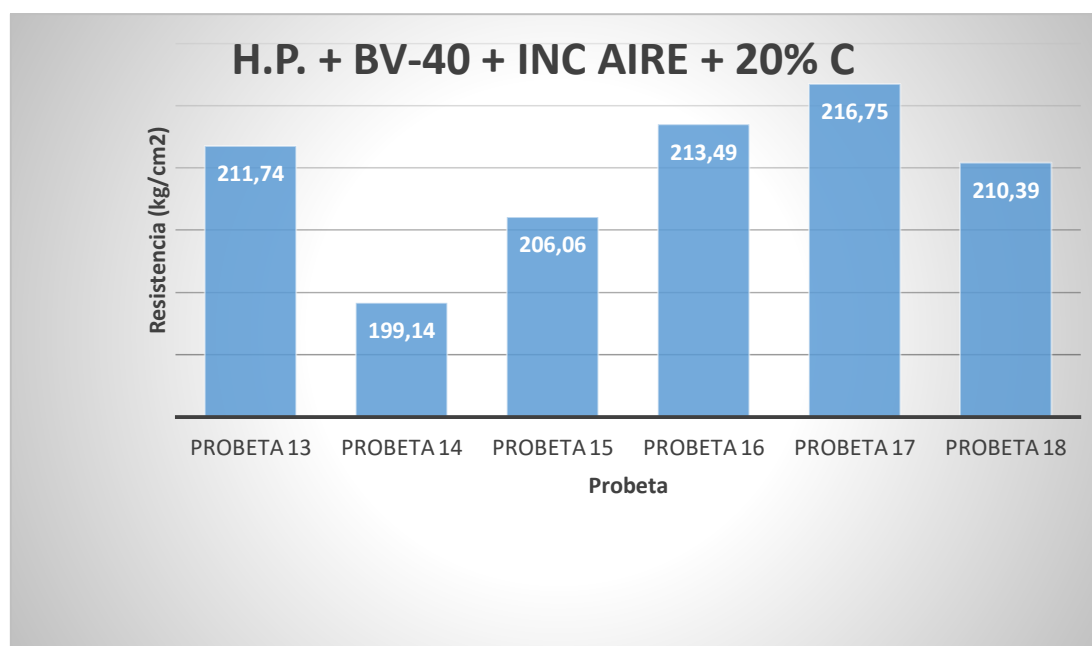
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 28 Resistencia a compresión del hormigón poroso con BV-40 + Inc aire + 20% de cemento

Probeta N°	Elemento	Fecha de	Fecha de	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
		Vaciado	Rotura						
13	Probeta 13	6/11/2020	4/12/2020	28	181,37	377	38403,00	211,74	<b>211,74</b>
14	Probeta 14	6/11/2020	4/12/2020	28	181,37	354	36118,20	199,14	<b>199,14</b>
15	Probeta 15	6/11/2020	4/12/2020	28	181,37	366	37372,80	206,06	<b>206,06</b>
16	Probeta 16	6/11/2020	4/12/2020	28	181,37	380	38719,20	213,49	<b>213,49</b>
17	Probeta 17	6/11/2020	4/12/2020	28	181,37	385	39310,80	216,75	<b>216,75</b>
18	Probeta 18	6/11/2020	4/12/2020	28	181,37	374	38158,20	210,39	<b>210,39</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 12 Resistencia a compresión de cada probeta de hormigón poroso con BV-40 + Inc aire + 20% de cemento



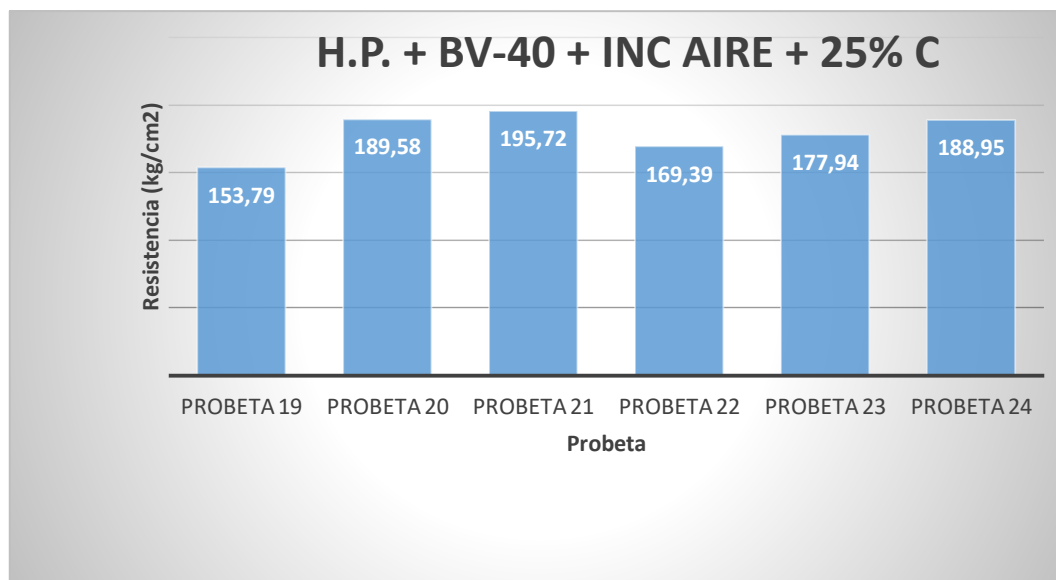
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 29 Resistencia a compresión del hormigón poroso con BV-40 + Inc aire + 25% de cemento

Probeta N°	Elemento	Fecha de	Fecha de	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
		Vaciado	Rotura						
19	Probeta 19	15/11/2020	11/12/2020	26	181,37	268	27346,20	150,78	<b>153,79</b>
20	Probeta 20	15/11/2020	11/12/2020	26	181,37	331	33711,00	185,87	<b>189,58</b>
21	Probeta 21	15/11/2020	11/12/2020	26	181,37	341	34802,40	191,89	<b>195,72</b>
22	Probeta 22	15/11/2020	11/12/2020	26	181,37	295	30120,60	166,08	<b>169,39</b>
23	Probeta 23	15/11/2020	11/12/2020	26	181,37	310	31640,40	174,46	<b>177,94</b>
24	Probeta 24	15/11/2020	11/12/2020	26	181,37	329	33598,80	185,25	<b>188,95</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 13 Resistencia a compresión de cada probeta de hormigón poroso con BV-40 + Inc aire + 25% de cemento



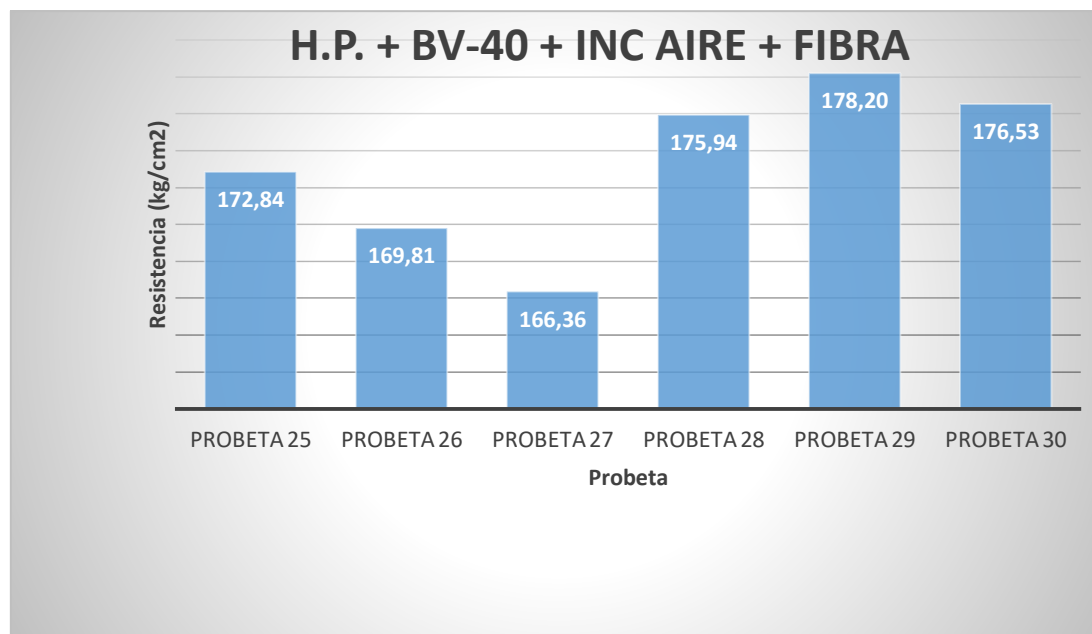
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 30 Resistencia a compresión del hormigón poroso con BV-40 + Inc aire + Fibra

Probeta N°	Elemento	Fecha de	Fecha de	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28
		Vaciado	Rotura						días (kg/cm <sup>2</sup> )
25	Probeta 25	23/11/2020	15/12/2020	22	181,37	291	29631,00	163,38	<b>172,84</b>
26	Probeta 26	23/11/2020	15/12/2020	22	181,37	285	29110,80	160,51	<b>169,81</b>
27	Probeta 27	23/11/2020	15/12/2020	22	181,37	280	28519,20	157,25	<b>166,36</b>
28	Probeta 28	23/11/2020	15/12/2020	22	181,37	296	30161,40	166,30	<b>175,94</b>
29	Probeta 29	23/11/2020	15/12/2020	22	181,37	300	30549,00	168,44	<b>178,20</b>
30	Probeta 30	23/11/2020	15/12/2020	22	181,37	297	30263,40	166,86	<b>176,53</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 14 Resistencia a compresión de cada probeta de hormigón poroso con BV-40 + Inc aire + Fibra



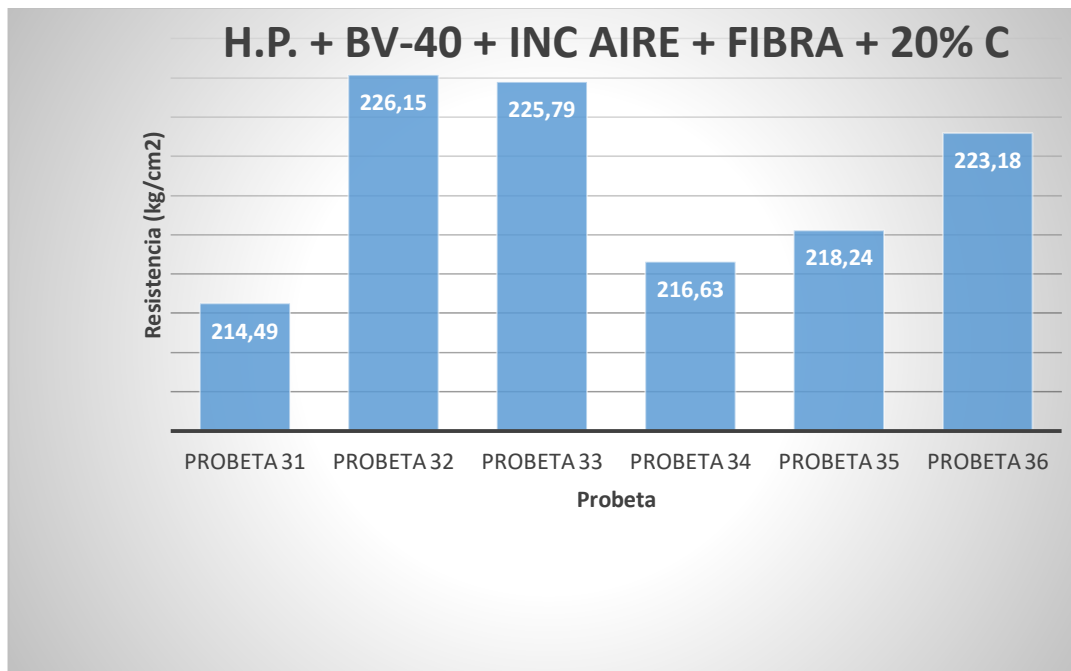
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 31 Resistencia a compresión del hormigón poroso con BV-40 + Inc aire + Fibra + 20 % de cemento

Probeta N°	Elemento	Fecha de	Fecha de	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
		Vaciado	Rotura						
31	Probeta 31	23/11/2020	15/12/2020	22	181,37	361	36771,00	202,74	<b>214,49</b>
32	Probeta 32	23/11/2020	15/12/2020	22	181,37	380	38770,20	213,77	<b>226,15</b>
33	Probeta 33	23/11/2020	15/12/2020	22	181,37	380	38709,00	213,43	<b>225,79</b>
34	Probeta 34	23/11/2020	15/12/2020	22	181,37	364	37138,20	204,77	<b>216,63</b>
35	Probeta 35	23/11/2020	15/12/2020	22	181,37	367	37413,60	206,29	<b>218,24</b>
36	Probeta 36	23/11/2020	15/12/2020	22	181,37	375	38260,20	210,96	<b>223,18</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 15 Resistencia a compresión de cada probeta de hormigón poroso con BV-40 + Inc aire + Fibra +20 % de cemento



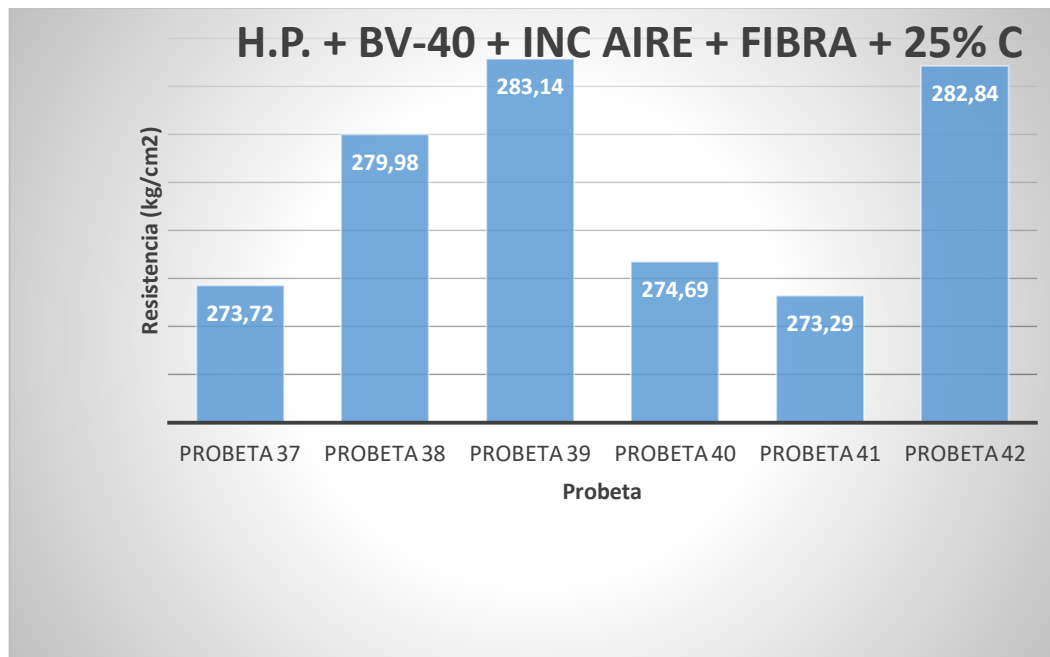
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 32 Resistencia a compresión del hormigón poroso con BV-40 + Inc aire + Fibra + 25 % de cemento

Probeta N°	Elemento	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
37	Probeta 37	27/11/2020	17/12/2020	20	181,37	450	45920,40	253,19	<b>273,72</b>
38	Probeta 38	27/11/2020	17/12/2020	20	181,37	461	46971,00	258,98	<b>279,98</b>
39	Probeta 39	27/11/2020	17/12/2020	20	181,37	466	47501,40	261,91	<b>283,14</b>
40	Probeta 40	27/11/2020	17/12/2020	20	181,37	452	46083,60	254,09	<b>274,69</b>
41	Probeta 41	27/11/2020	17/12/2020	20	181,37	450	45849,00	252,80	<b>273,29</b>
42	Probeta 42	27/11/2020	17/12/2020	20	181,37	465	47450,40	261,63	<b>282,84</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 16 Resistencia a compresión de cada probeta de hormigón poroso con BV-40 + Inc aire + Fibra + 25 % de cemento



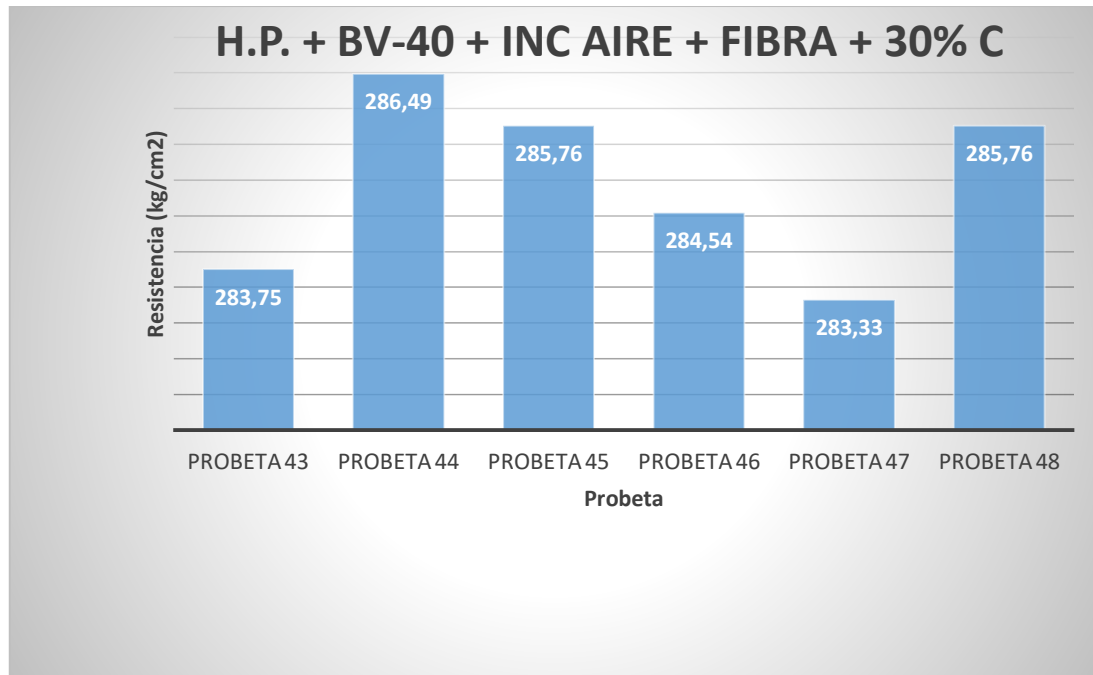
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 33 Resistencia a compresión del hormigón poroso con BV-40 + Inc aire + Fibra + 30 % de cemento

Probeta N°	Elemento	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
43	Probeta 43	27/11/2020	17/12/2020	20	181,37	467	47603,40	262,47	<b>283,75</b>
44	Probeta 44	27/11/2020	17/12/2020	20	181,37	471	48062,40	265,00	<b>286,49</b>
45	Probeta 45	27/11/2020	17/12/2020	20	181,37	470	47940,00	264,33	<b>285,76</b>
46	Probeta 46	27/11/2020	17/12/2020	20	181,37	468	47736,00	263,20	<b>284,54</b>
47	Probeta 47	27/11/2020	17/12/2020	20	181,37	466	47532,00	262,08	<b>283,33</b>
48	Probeta 48	27/11/2020	17/12/2020	20	181,37	470	47940,00	264,33	<b>285,76</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 17 Resistencia a compresión de cada probeta de hormigón poroso con BV-40 + Inc aire + Fibra + 30% de cemento

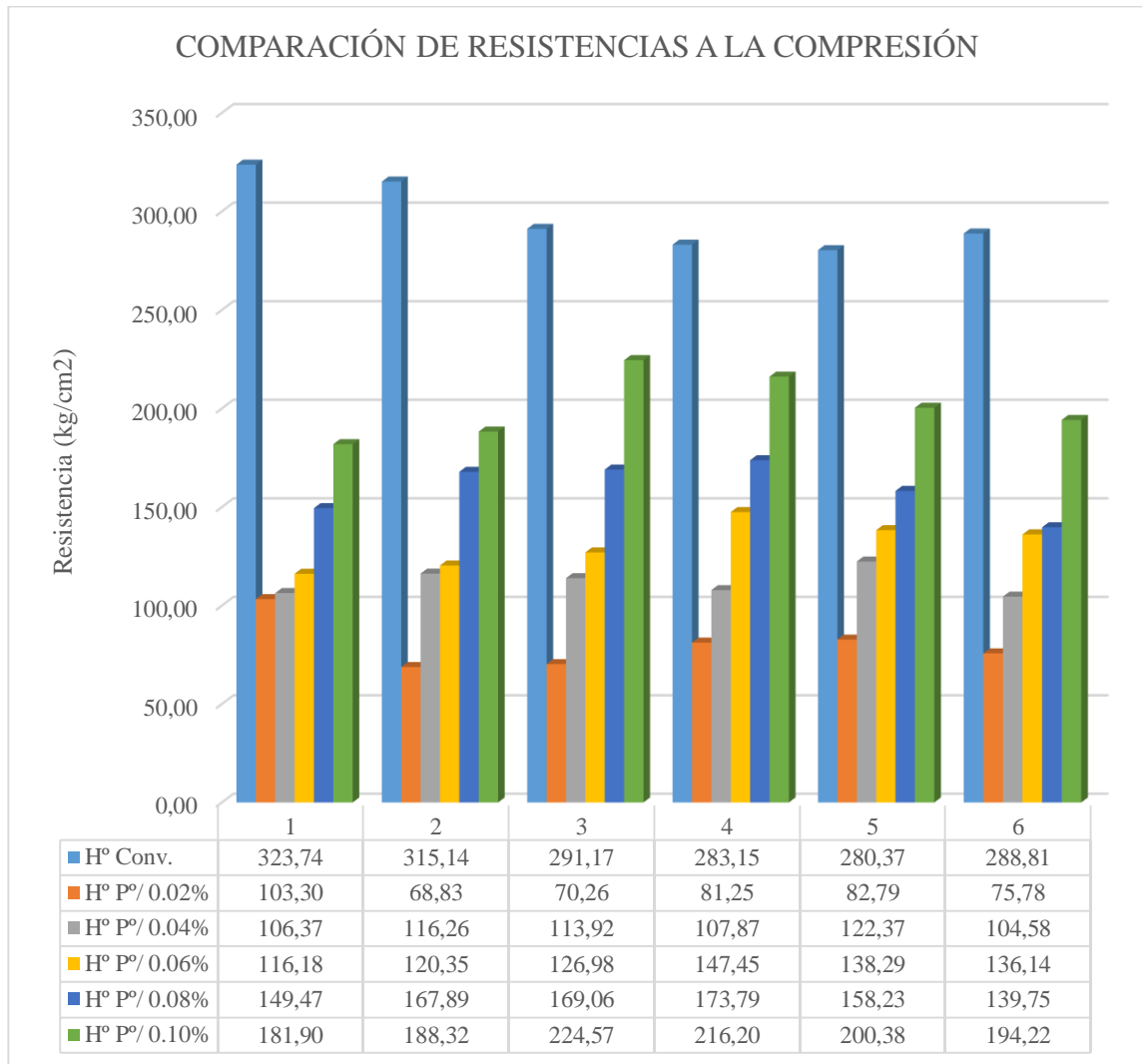


Fuente: Elaboración propia



### 3.7.3. Análisis comparativo de la resistencia a la compresión

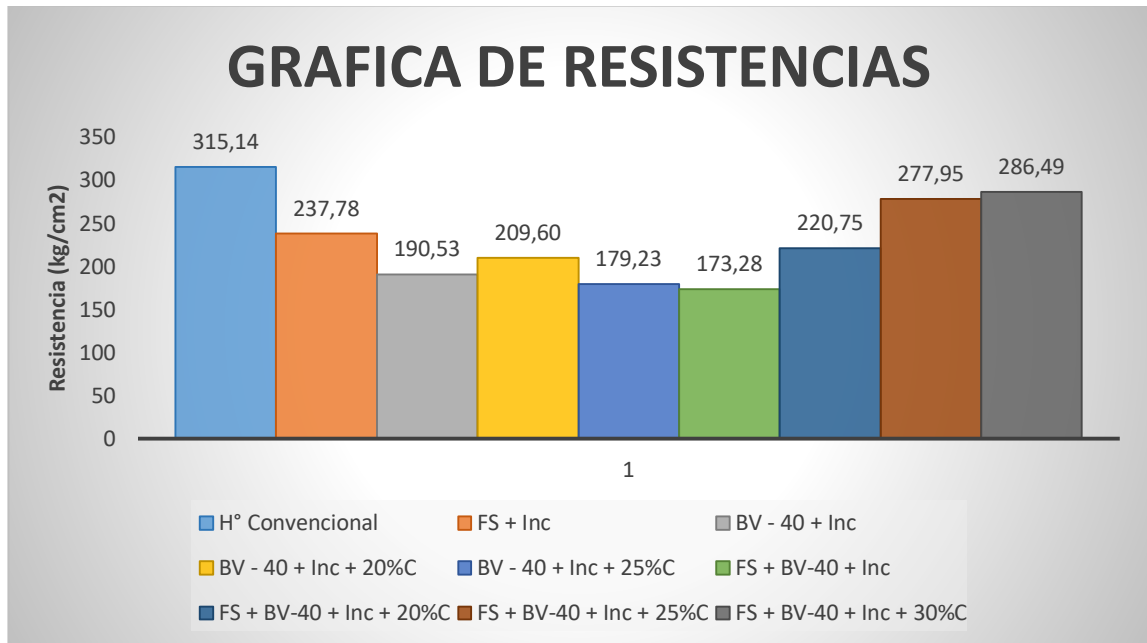
Gráfica 3. 18 Resistencia a compresión de cada probeta de hormigón poroso vs la resistencia a compresión H° convencional



Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en el gráfico comparativo, las resistencias del hormigón convencional son mayores y las resistencias del hormigón poroso van en ascenso hasta un valor máximo de 224 kg/cm<sup>2</sup>, por lo que se puede decir, que la mezcla de fibra sintética y el incorporador de aire trabajan como si fuera un H-21, con normalidad. Por ende, este hormigón soporta el tráfico vehicular pesado de 210 kg/cm<sup>2</sup>, mas no así el tráfico pesado industrial con cargas concentradas muy altas de 280 kg/cm<sup>2</sup>.

Gráfica 3. 19 Resistencia a compresión de cada probeta de hormigón poroso vs la resistencia a compresión H° convencional



Fuente: Elaboración propia

El gráfico muestra la variación de la resistencia para las combinaciones y adiciones de cemento que tiene el concreto poroso frente a una muestra de concreto convencional.

Se puede ver que las resistencias están para un tráfico vehicular común (180 kg/cm<sup>2</sup>) y para el tráfico vehicular pesado (210 kg/cm<sup>2</sup>), pocas combinaciones entran dentro del rango, con lo cual podemos decir que la combinación de fibra sintética más incorporador de aire, BV-40 más incorporador de aire con 20 % de cemento, fibra sintética más BV-40 e incorporador de aire con (20, 25 y 30) % de cemento están sujetas a ser usadas como alternativas para tráfico pesado.

Por últimos podemos concluir que ninguna de las probetas de concreto poroso deberá ser usada para el uso de tráfico pesado industrial con cargas concentradas muy altas (280 kg/cm<sup>2</sup>)

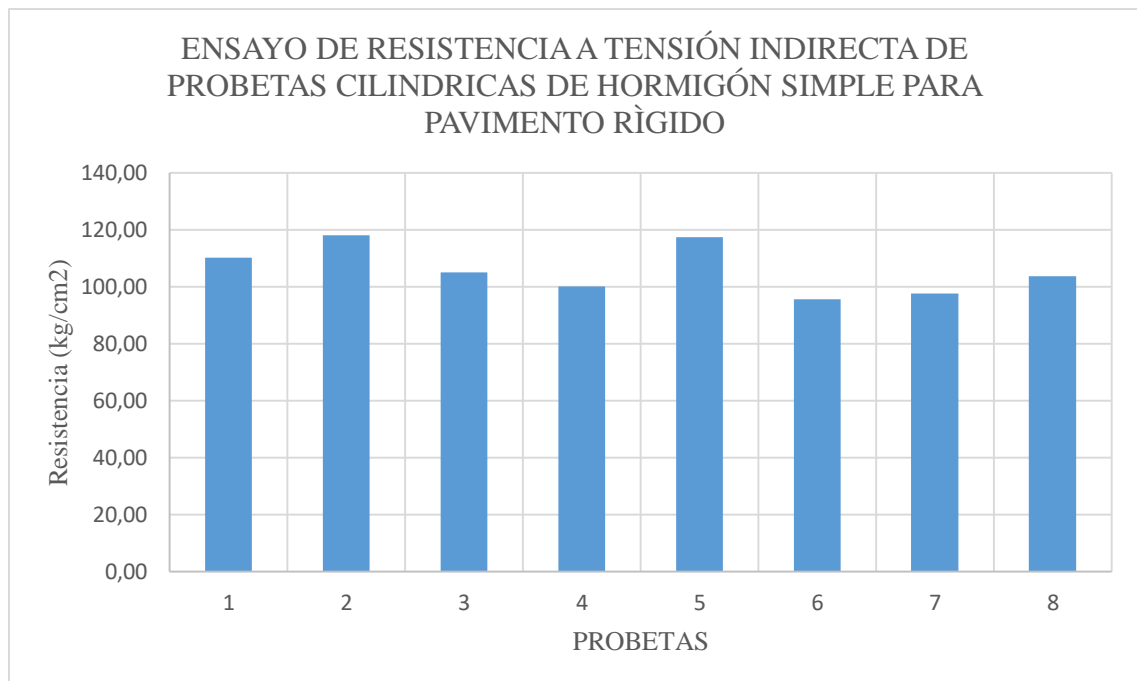
### 3.7.4. Resultados de las probetas de hormigón convencional sometidas a tensión indirecta

Tabla 3. 34 Resistencia a tensión indirecta

Probeta N°	Elemento	Fecha de	Fecha de	Edad	Sección	Lectura	Carga	Resistencia	Proyección
		vaciado	rotura	(días)	(cm <sup>2</sup> )	(KN)	(kg)	(Kg/cm <sup>2</sup> )	28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
1	Probeta 1	30/09/2019	15/11/2019	46	178.99	210	21420.00	119.67	<b>110.05</b>
2	Probeta 2	30/09/2019	15/11/2019	46	178.99	225	22950.00	128.22	<b>117.91</b>
3	Probeta 3	30/09/2019	15/11/2019	46	176.63	198	20145.00	114.06	<b>104.88</b>
4	Probeta 4	30/09/2019	15/11/2019	46	176.63	189	19227.00	108.86	<b>100.10</b>
5	Probeta 5	30/09/2019	15/11/2019	46	176.63	221	22542.00	127.63	<b>117.36</b>
6	Probeta 6	30/09/2019	15/11/2019	46	176.63	180	18360.00	103.95	<b>95.59</b>
7	Probeta 7	30/09/2019	15/11/2019	46	176.63	184	18747.60	106.14	<b>97.61</b>
8	Probeta 8	30/09/2019	15/11/2019	46	176.63	195	19890.00	112.61	<b>103.56</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 20 Ensayo a la tensión indirecta para el pavimento rígido convencional



Fuente: Elaboración propia

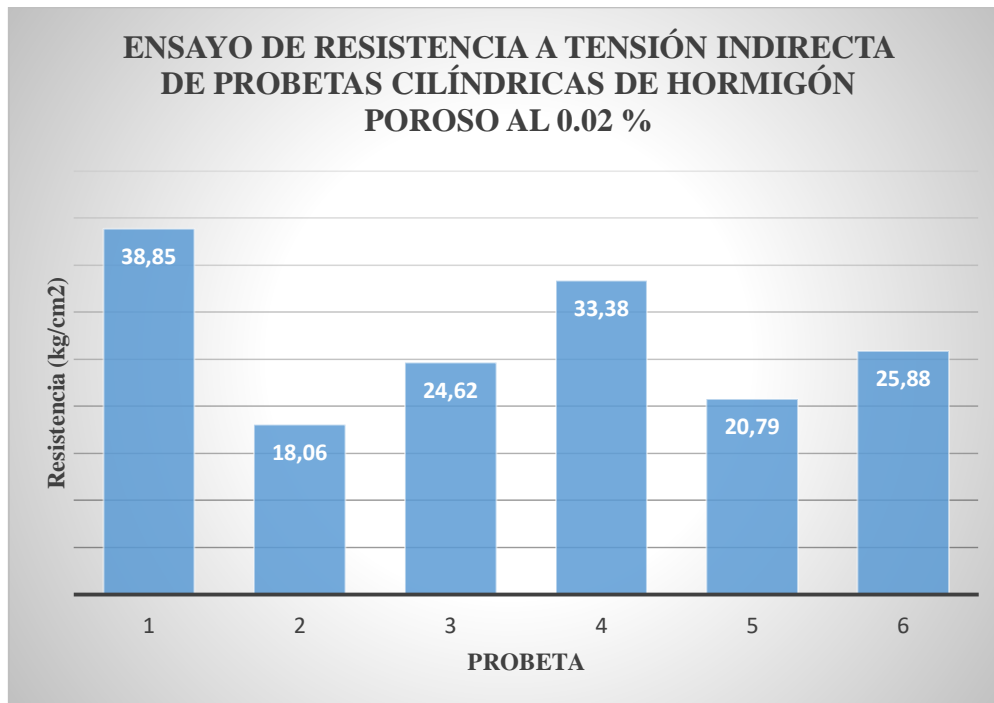
### 3.7.5. Resultados de las probetas de hormigón poroso sometidas a tensión indirecta

Tabla 3. 35 Resistencia a la tensión indirecta del hormigón poroso a 0.02 % de aditivo

Probeta N°	Elemento	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
1	Probeta 9	08/10/2019	15/11/2019	38	176.63	71	7242.00	41.00	<b>38.85</b>
2	Probeta 10	08/10/2019	15/11/2019	38	176.63	33	3366.00	19.06	<b>18.06</b>
3	Probeta 11	08/10/2019	15/11/2019	38	176.63	45	4590.00	25.99	<b>24.62</b>
4	Probeta 12	08/10/2019	15/11/2019	38	176.63	61	6222.00	35.23	<b>33.38</b>
5	Probeta 13	08/10/2019	15/11/2019	38	176.63	38	3876.00	21.94	<b>20.79</b>
6	Probeta 14	08/10/2019	15/11/2019	38	176.63	47	4824.60	27.32	<b>25.88</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 21 Ensayo de Resistencia a tensión indirecta de hormigón poroso con 0.02 % de aditivo



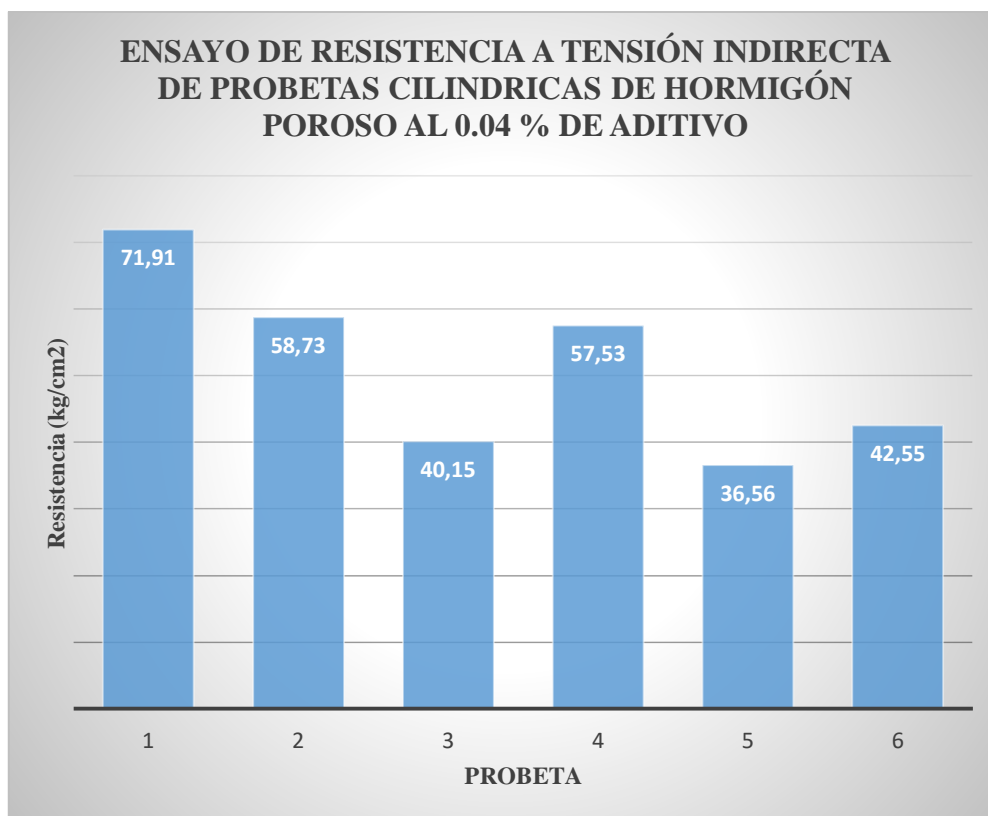
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 36 Resistencia a la tensión indirecta del hormigón poroso a 0.04 % de aditivo

Probeta N°	Elemento	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
7	Probeta 15	22/10/2019	15/11/2019	24	176.63	120	12240.00	69.30	<b>71.91</b>
8	Probeta 16	22/10/2019	15/11/2019	24	176.63	98	9996.00	56.59	<b>58.73</b>
9	Probeta 17	22/10/2019	15/11/2019	24	176.63	67	6834.00	38.69	<b>40.15</b>
10	Probeta 18	22/10/2019	15/11/2019	24	176.63	96	9792.00	55.44	<b>57.53</b>
11	Probeta 19	22/10/2019	15/11/2019	24	176.63	61	6222.00	35.23	<b>36.56</b>
12	Probeta 20	22/10/2019	15/11/2019	24	176.63	71	7242.00	41.00	<b>42.55</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 22 Ensayo de Resistencia a tensión indirecta de hormigón poroso con 0.04 % de aditivo



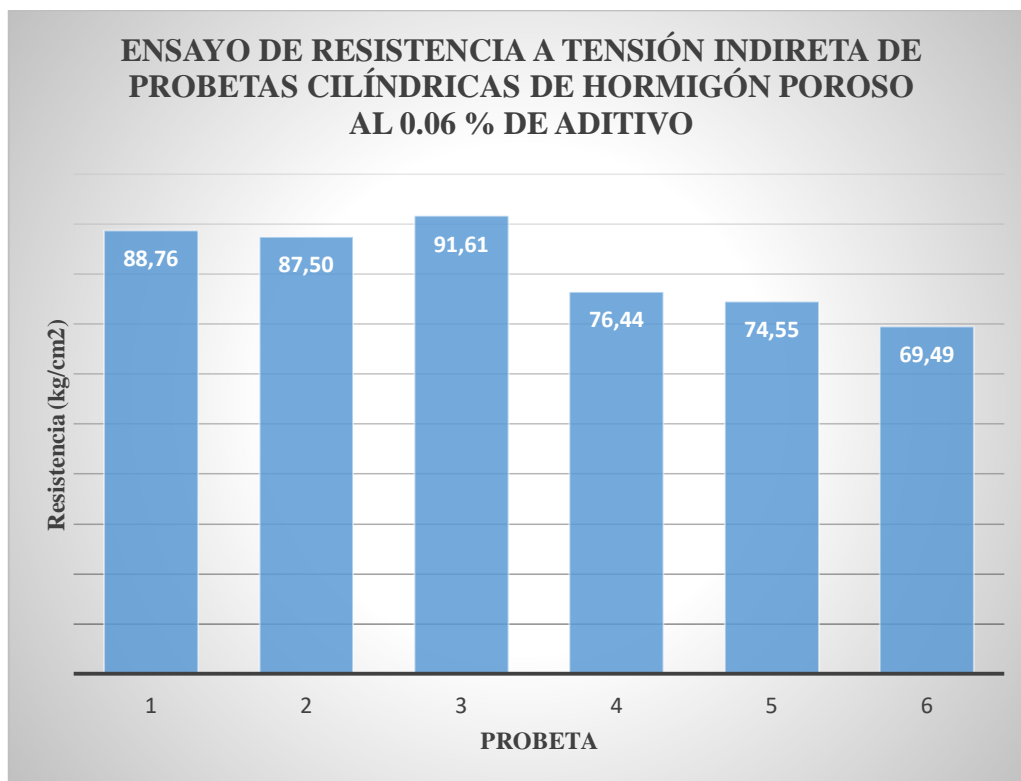
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 37 Resistencia a la tensión indirecta del hormigón poroso a 0.06 % de aditivo

Probeta N°	Elemento	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
13	Probeta 21	27/10/2019	15/11/2019	19	176.63	141	14331.00	81.14	<b>88.76</b>
14	Probeta 22	27/10/2019	15/11/2019	19	176.63	139	14127.00	79.98	<b>87.50</b>
15	Probeta 23	27/10/2019	15/11/2019	19	176.63	145	14790.00	83.74	<b>91.61</b>
16	Probeta 24	27/10/2019	15/11/2019	19	176.63	121	12342.00	69.88	<b>76.44</b>
17	Probeta 25	27/10/2019	15/11/2019	19	176.63	118	12036.00	68.14	<b>74.55</b>
18	Probeta 26	27/10/2019	15/11/2019	19	176.63	110	11220.00	63.52	<b>69.49</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 23 Ensayo de Resistencia a tensión indirecta de hormigón poroso con 0.06 % de aditivo



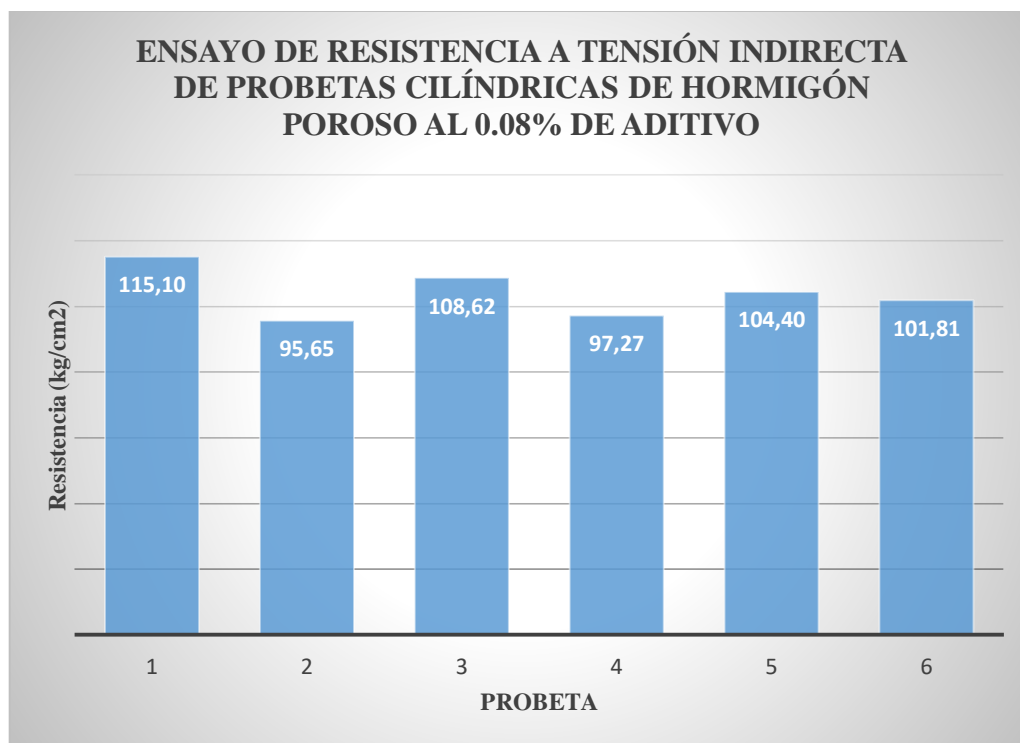
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 38 Resistencia a la tensión indirecta del hormigón poroso a 0.08 % de aditivo

Probeta N°	Elemento	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
19	Probeta 27	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	178	18105.00	102.51	<b>115.10</b>
20	Probeta 28	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	148	15045.00	85.18	<b>95.65</b>
21	Probeta 29	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	168	17085.00	96.73	<b>108.62</b>
22	Probeta 30	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	150	15300.00	86.62	<b>97.27</b>
23	Probeta 31	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	161	16422.00	92.98	<b>104.40</b>
24	Probeta 32	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	157	16014.00	90.67	<b>101.81</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 24 Ensayo de Resistencia a tensión indirecta de hormigón poroso con 0.08 % de aditivo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 39 Resistencia a la tensión indirecta del hormigón poroso a 0.10 % de aditivo

Probeta N°	Elemento	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
25	Probeta 33	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	233	23766.00	134.56	<b>151.10</b>
26	Probeta 34	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	180	18360.00	103.95	<b>116.73</b>
27	Probeta 35	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	218	22236.00	125.89	<b>141.37</b>
28	Probeta 36	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	179	18288.60	103.54	<b>116.27</b>
29	Probeta 37	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	187	19074.00	107.99	<b>121.27</b>
30	Probeta 38	29/10/2019	15/11/2019	17	176.63	184	18757.80	106.20	<b>119.25</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 25 Ensayo de Resistencia a tensión indirecta de hormigón poroso con 0.10 % de aditivo



Fuente: Elaboración propia



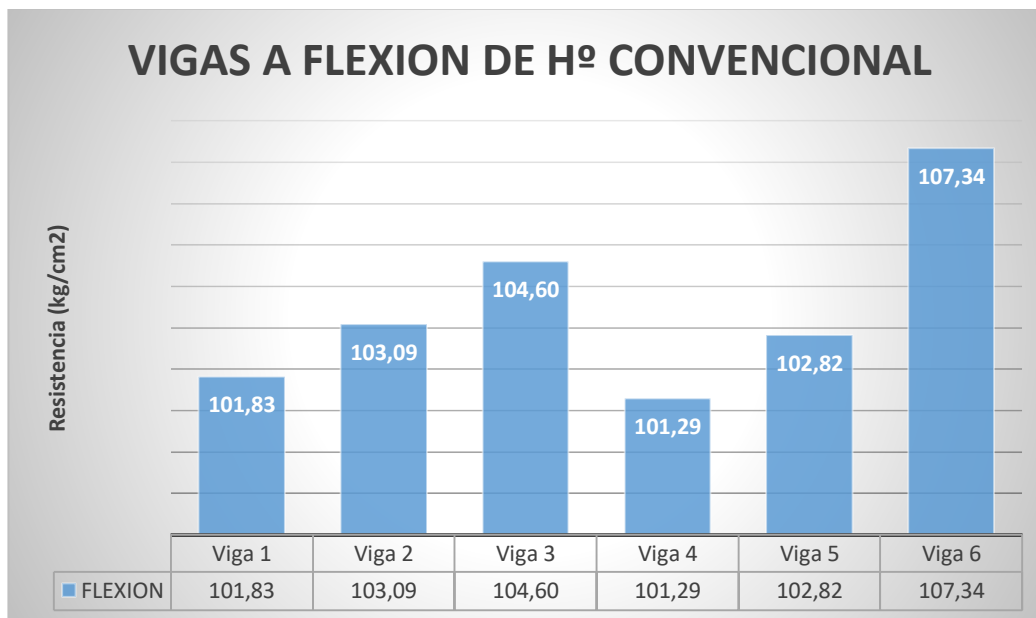
### 3.7.6. Resultados de las vigas de hormigón sometidas a flexión

Tabla 3. 40 Resistencia a la flexión de vigas de hormigón convencional

Probeta N°	Elemento	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Carga (lb)	a (plg)	b (plg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
1	Viga 1	6/11/2020	4/12/2020	28	12251,60	7,87	5,84	101,83	<b>101,83</b>
2	Viga 2	6/11/2020	4/12/2020	28	12498,88	7,87	5,85	103,09	<b>103,09</b>
3	Viga 3	6/11/2020	4/12/2020	28	12723,68	7,87	5,86	104,60	<b>104,60</b>
4	Viga 4	6/11/2020	4/12/2020	28	12251,60	7,87	5,85	101,29	<b>101,29</b>
5	Viga 5	6/11/2020	4/12/2020	28	12364,00	7,87	5,84	102,82	<b>102,82</b>
6	Viga 6	6/11/2020	4/12/2020	28	13038,40	7,87	5,86	107,34	<b>107,34</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 26 Ensayo de Resistencia a flexión de hormigón convencional



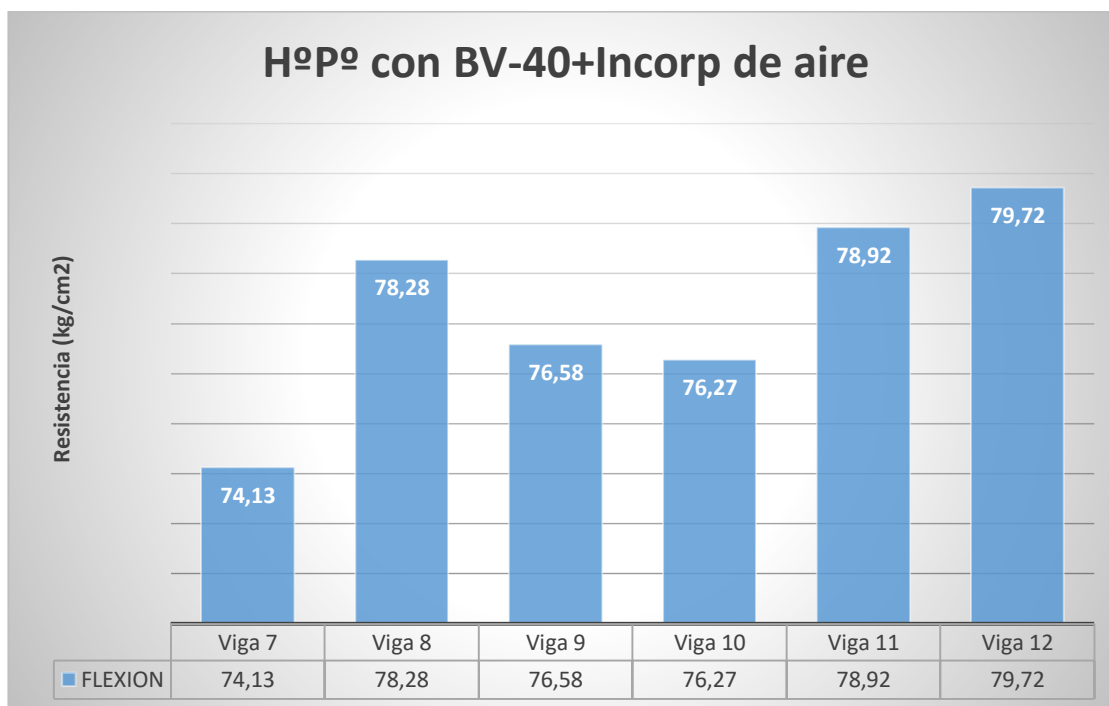
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 41 Resistencia a la flexión de vigas con BV-40 + Inc aire

Probeta N°	Elemento	Fecha de	Fecha de	Edad (días)	Carga (lb)	a (plg)	b (plg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
		Vaciado	Rotura						
7	Viga 7	6/11/2020	4/12/2020	28	9846,24	7,87	6,03	74,13	<b>74,13</b>
8	Viga 8	6/11/2020	4/12/2020	28	10295,84	7,87	6,01	78,28	<b>78,28</b>
9	Viga 9	6/11/2020	4/12/2020	28	10003,60	7,87	6,00	76,58	<b>76,58</b>
10	Viga 10	6/11/2020	4/12/2020	28	9846,24	7,87	5,98	76,27	<b>76,27</b>
11	Viga 11	6/11/2020	4/12/2020	28	10228,40	7,87	5,98	78,92	<b>78,92</b>
12	Viga 12	6/11/2020	4/12/2020	28	10250,88	7,87	5,97	79,72	<b>79,72</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 27 Ensayo de Resistencia a flexion de vigas con BV-40 + Inc aire



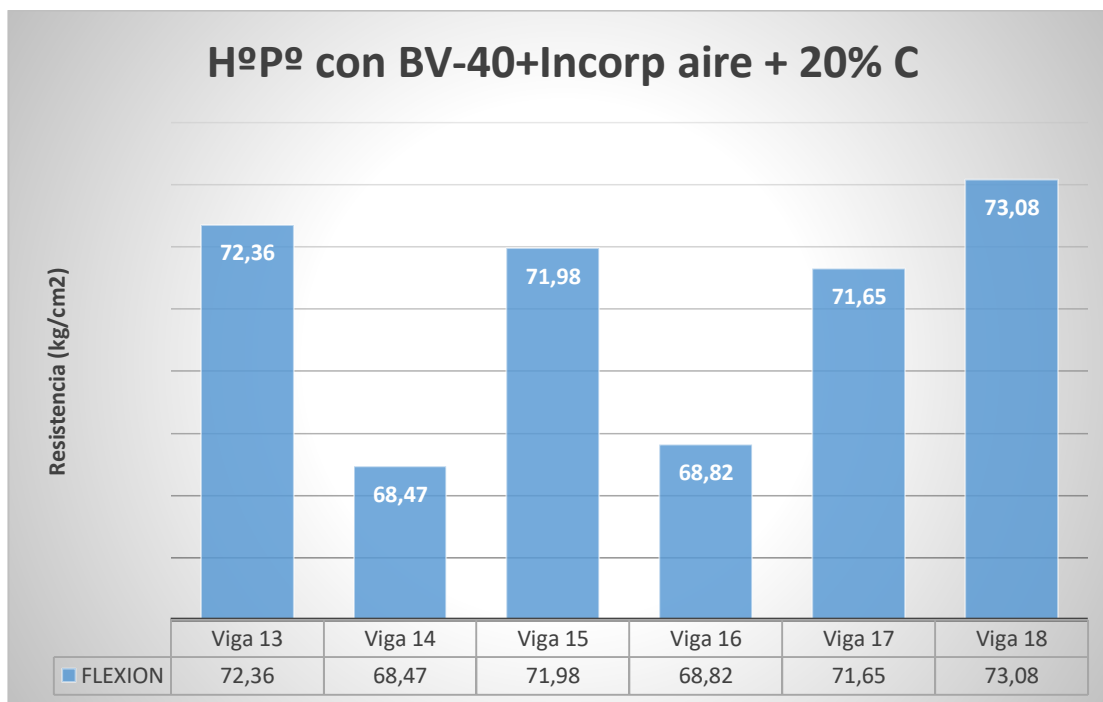
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 42 Resistencia a la flexión de vigas con BV-40 + Inc aire + 20 % de cemento

Probeta N°	Elemento	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Carga (lb)	a (plg)	b (plg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
13	Viga 13	8/11/2020	4/12/2020	26	9194,32	7,87	5,98	70,94	<b>72,36</b>
14	Viga 14	8/11/2020	4/12/2020	26	8699,76	7,87	5,98	67,13	<b>68,47</b>
15	Viga 15	8/11/2020	4/12/2020	26	8789,68	7,87	5,91	70,57	<b>71,98</b>
16	Viga 16	8/11/2020	4/12/2020	26	8744,72	7,87	5,98	67,47	<b>68,82</b>
17	Viga 17	8/11/2020	4/12/2020	26	9104,40	7,87	5,98	70,25	<b>71,65</b>
18	Viga 18	8/11/2020	4/12/2020	26	9104,40	7,87	5,94	71,65	<b>73,08</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 28 Ensayo de Resistencia a flexión de vigas con BV-40 + Inc aire + 20 % de cemento



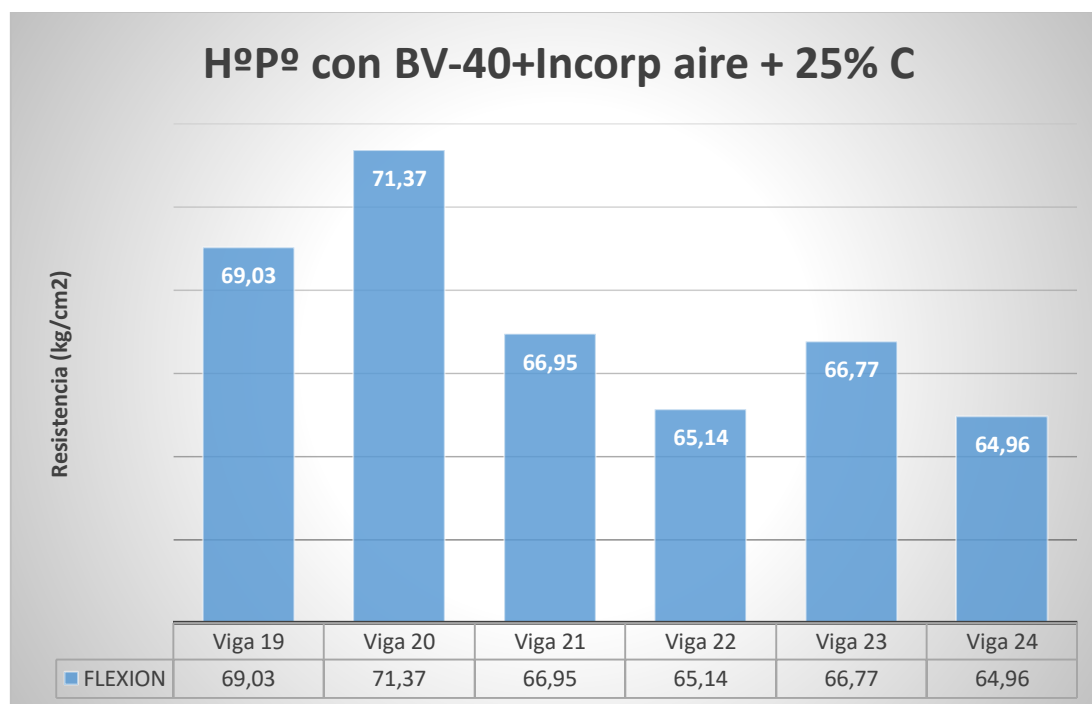
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 43 Resistencia a la flexión de vigas con BV-40 + Inc aire + 25 % de cemento

Probeta N°	Elemento	Fecha de	Fecha de	Edad (días)	Carga (lb)	a (plg)	b (plg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
		Vaciado	Rotura						
19	Viga 19	15/11/2020	11/12/2020	26	8430,00	7,87	5,91	67,68	<b>69,03</b>
20	Viga 20	15/11/2020	11/12/2020	26	8542,40	7,87	5,87	69,97	<b>71,37</b>
21	Viga 21	15/11/2020	11/12/2020	26	8340,08	7,87	5,94	65,64	<b>66,95</b>
22	Viga 22	15/11/2020	11/12/2020	26	8115,28	7,87	5,94	63,87	<b>65,14</b>
23	Viga 23	15/11/2020	11/12/2020	26	8317,60	7,87	5,94	65,46	<b>66,77</b>
24	Viga 24	15/11/2020	11/12/2020	26	8092,80	7,87	5,94	63,69	<b>64,96</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 29 Ensayo de Resistencia de vigas con BV-40 + Inc aire + 25 % de cemento



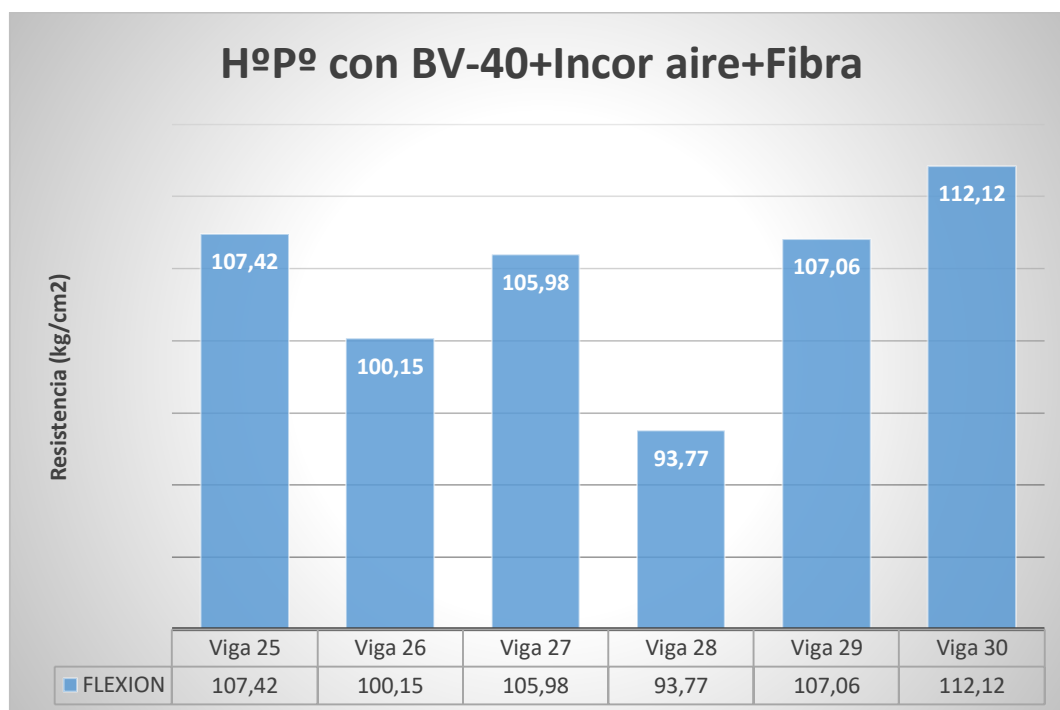
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 44 Resistencia a la flexión de vigas con BV-40 + Inc aire + Fibra

Probeta N°	Elemento	Fecha de	Fecha de	Edad (días)	Carga (lb)	a (plg)	b (plg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
		Vaciado	Rotura						
25	Viga 25	23/11/2020	15/12/2020	22	13420,56	7,87	6,02	101,53	<b>107,42</b>
26	Viga 26	23/11/2020	15/12/2020	22	13263,20	7,87	6,14	94,67	<b>100,15</b>
27	Viga 27	23/11/2020	15/12/2020	22	13240,72	7,87	6,02	100,17	<b>105,98</b>
28	Viga 28	23/11/2020	15/12/2020	22	11262,48	7,87	5,94	88,64	<b>93,77</b>
29	Viga 29	23/11/2020	15/12/2020	22	13375,60	7,87	6,02	101,19	<b>107,06</b>
30	Viga 30	23/11/2020	15/12/2020	22	13465,52	7,87	5,94	105,98	<b>112,12</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 30 Ensayo de Resistencia con BV-40 + Inc aire + Fibra



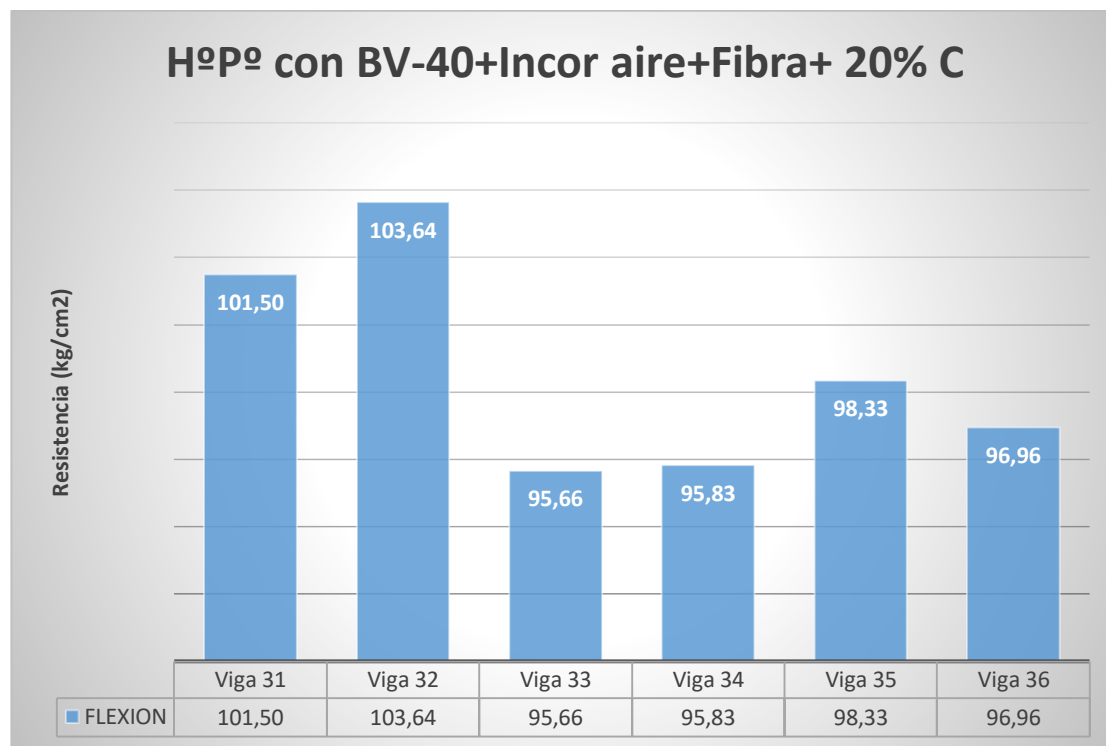
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 45 Resistencia a la flexión de vigas con BV-40 + Inc aire + Fibra + 20 % de cemento

Probeta N°	Elemento	Fecha de	Fecha de	Edad (días)	Carga (lb)	a (plg)	b (plg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
		Vaciado	Rotura						
31	Viga 31	23/11/2020	15/12/2020	22	11712,08	7,87	5,87	95,94	<b>101,50</b>
32	Viga 32	23/11/2020	15/12/2020	22	11959,36	7,87	5,87	97,96	<b>103,64</b>
33	Viga 33	23/11/2020	15/12/2020	22	11262,48	7,87	5,91	90,42	<b>95,66</b>
34	Viga 34	23/11/2020	15/12/2020	22	11509,76	7,87	5,94	90,58	<b>95,83</b>
35	Viga 35	23/11/2020	15/12/2020	22	11577,20	7,87	5,91	92,95	<b>98,33</b>
36	Viga 36	23/11/2020	15/12/2020	22	11644,64	7,87	5,94	91,65	<b>96,96</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 31 Ensayo de Resistencia a flexión con BV-40 + Inc aire + Fibra + 20 % de cemento



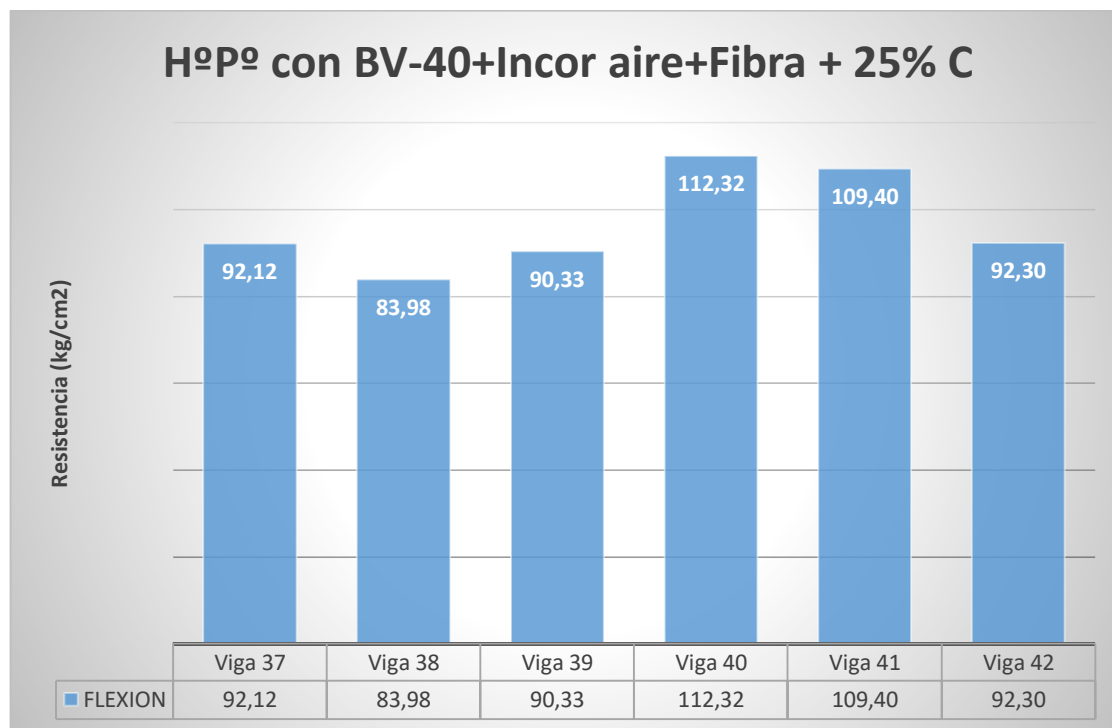
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 46 Resistencia a la flexión de vigas con BV-40 + Inc aire + Fibra + 25 % de cemento

Probeta N°	Elemento	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Carga (lb)	a (plg)	b (plg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
37	Viga 37	27/11/2020	17/12/2020	20	11262,48	7,87	6,02	85,21	<b>92,12</b>
38	Viga 38	27/11/2020	17/12/2020	20	11307,44	7,87	6,22	77,68	<b>83,98</b>
39	Viga 39	27/11/2020	17/12/2020	20	11262,48	7,87	6,06	83,56	<b>90,33</b>
40	Viga 40	27/11/2020	17/12/2020	20	13465,52	7,87	5,98	103,90	<b>112,32</b>
41	Viga 41	27/11/2020	17/12/2020	20	13375,60	7,87	6,02	101,19	<b>109,40</b>
42	Viga 42	27/11/2020	17/12/2020	20	11284,96	7,87	6,02	85,38	<b>92,30</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 32 Ensayo de Resistencia a flexión con BV-40 + Inc aire + Fibra + 25 % de cemento



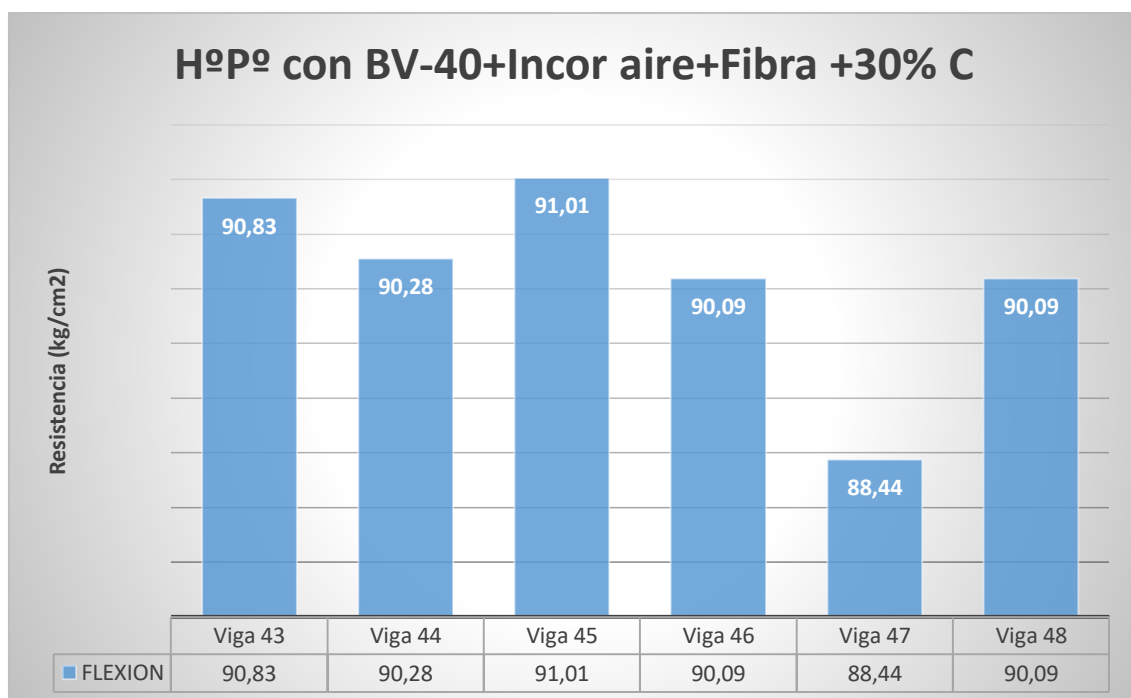
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 47 Resistencia a la flexión de vigas con BV-40 + Inc aire + Fibra + 30 % de cemento

Probeta N°	Elemento	Fecha de	Fecha de	Edad (días)	Carga (lb)	a (plg)	b (plg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
		Vaciado	Rotura						
43	Viga 43	27/11/2020	17/12/2020	20	11105,12	7,87	6,02	84,02	<b>90,83</b>
44	Viga 44	27/11/2020	17/12/2020	20	11037,68	7,87	6,02	83,51	<b>90,28</b>
45	Viga 45	27/11/2020	17/12/2020	20	11127,60	7,87	6,02	84,19	<b>91,01</b>
46	Viga 46	27/11/2020	17/12/2020	20	11015,20	7,87	6,02	83,34	<b>90,09</b>
47	Viga 47	27/11/2020	17/12/2020	20	10812,88	7,87	6,02	81,81	<b>88,44</b>
48	Viga 48	27/11/2020	17/12/2020	20	11015,20	7,87	6,02	83,34	<b>90,09</b>

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 33 Ensayo de Resistencia a flexión con BV-40 + Inc aire + Fibra + 30 % de cemento

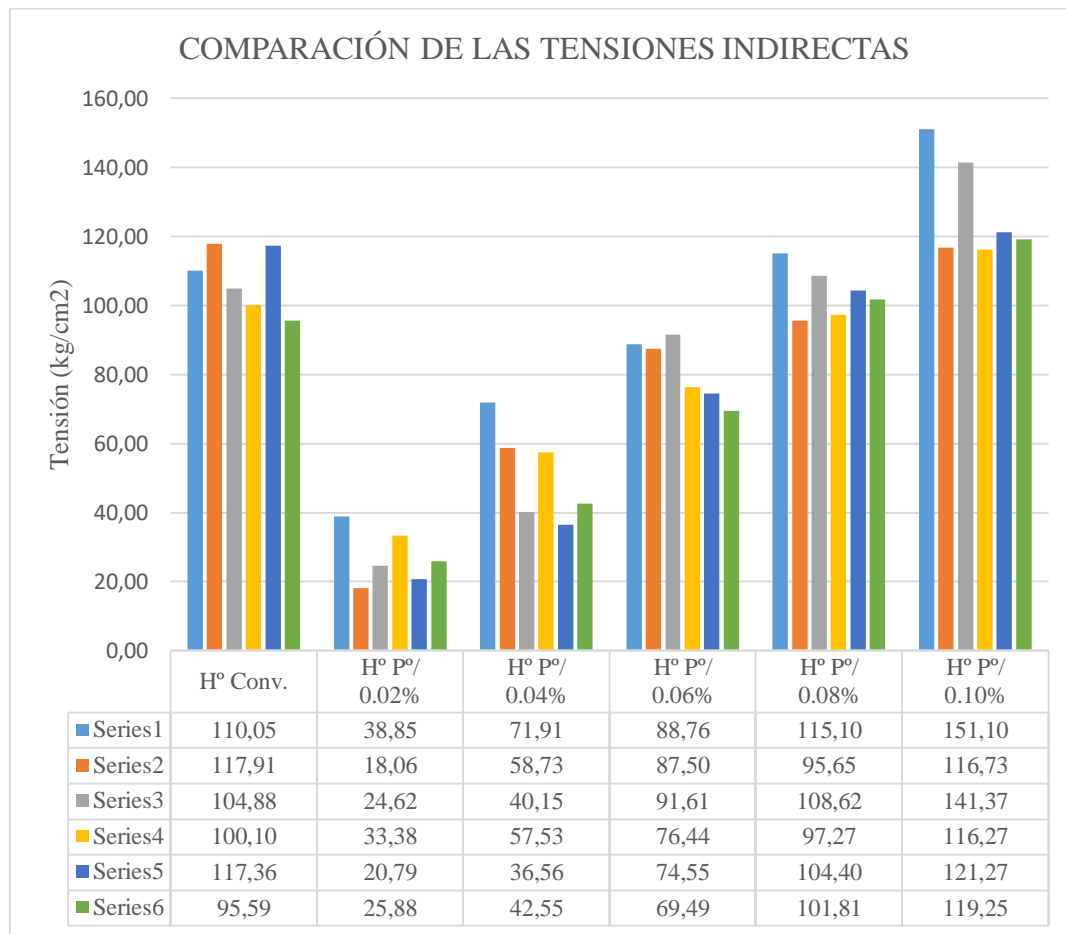


Fuente: Elaboración propia



### 3.7.7. Análisis comparativo de la resistencia a la flexión

Gráfica 3. 34 Comparación de tensiones indirectas

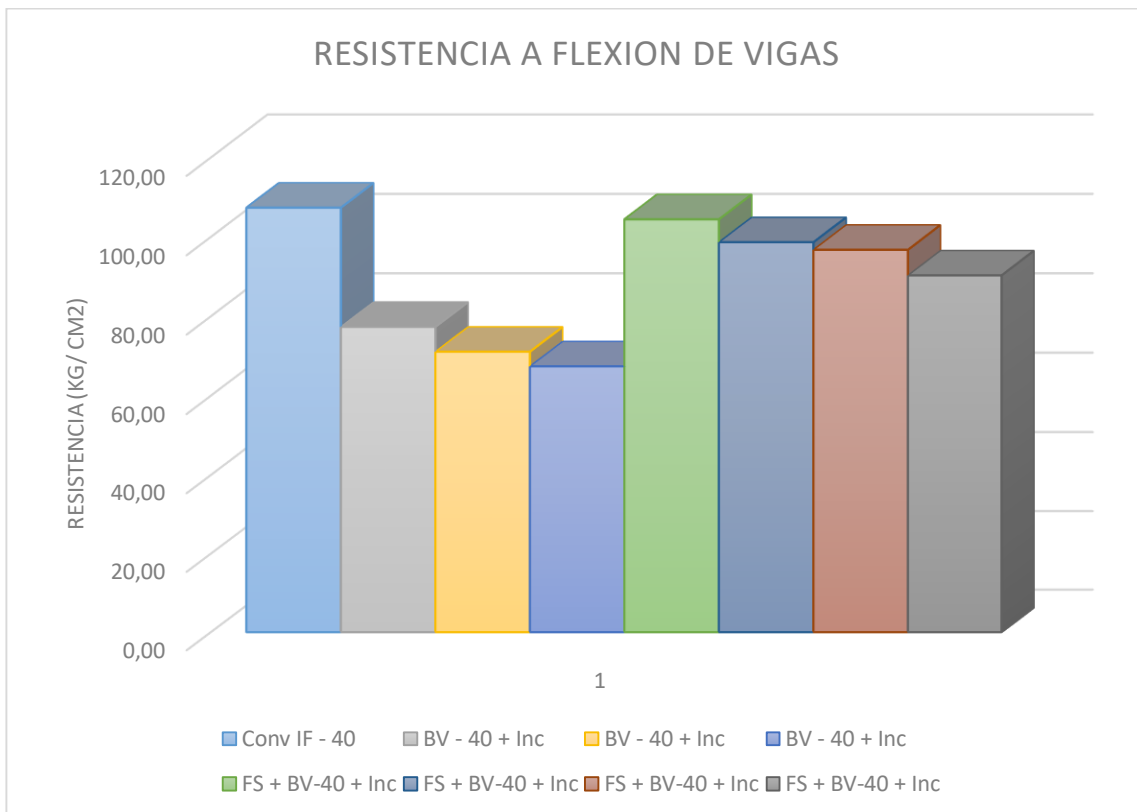


Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a las especificaciones técnicas de la fibra sintética lo que se ve en tabla es correcto, siendo que la fibra aumenta la resistencia en las probetas. Se puede destacar que las probetas del hormigón poroso con 0.10 % de aditivo se adapta mejor para la investigación actual.

El cálculo de la mezcla de estos dos aditivos se hizo con el fin de tener una primera guía de cómo actúa la mezcla en el concreto poroso y obtener un valor representativo que pueda mostrar el cambio de las características frente al pavimento rígido convencional.

Gráfica 3. 35 Comparación de vigas sometidas a flexión



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica podemos ver a detalle cómo afecta la flexión en cada promedio de vigas para los diferentes casos de aditivos e incremento de cemento de ellos.

Podemos concluir que la flexión no es un dato muy relevante en el cálculo de pavimento poroso, pero se nota que la fibra sintética tiene más protagonismo en el incremento de las resistencias de las vigas.

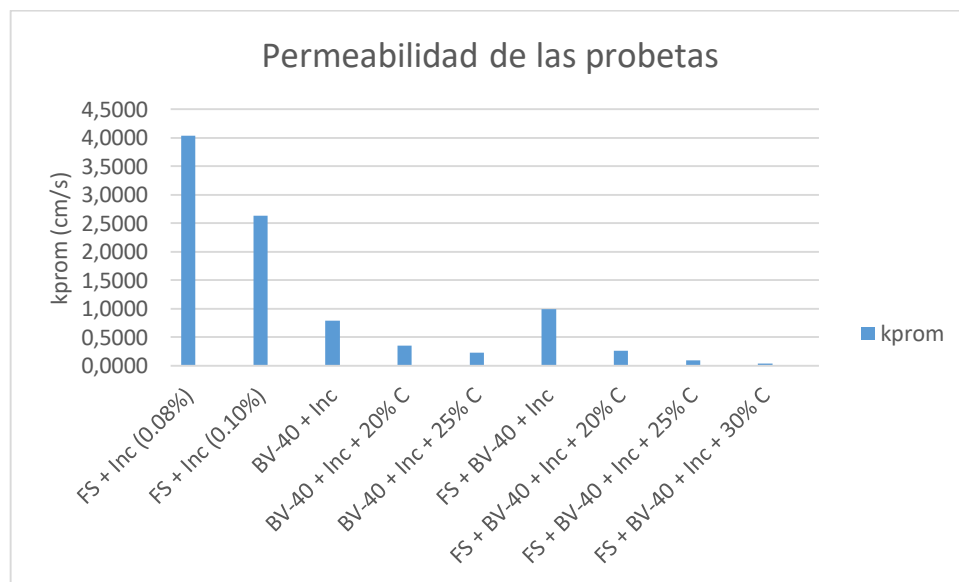
### 3.7.8. Análisis de la permeabilidad

Tabla 3. 48 Permeabilidad de probetas

Muestra N°	L (cm)	a (cm <sup>2</sup> )	h1 (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	H2 (cm)	Tiempo (seg)	k (cm/seg)	kprom (cm/seg)	Desviación estandar (cm/s)
FS + Inc (0.08%)	20	10,01	45	10,01	5	11,56	3,8014	4,0423	0,3406
	20	10,01	45	10,01	5	10,26	4,2831		
FS + Inc (0.10%)	20	10,01	45	10,01	5	15,23	2,8854	2,6291	0,3624
	20	10,01	45	10,01	5	18,52	2,3728		
BV-40 + Inc	20	10,01	45	10,01	5	51,62	0,8513	0,7828	0,0969
	20	10,01	45	10,01	5	61,52	0,7143		
BV-40 + Inc + 20% C	20	10,01	45	10,01	5	122,25	0,3595	0,3534	0,0086
	20	10,01	45	10,01	5	126,54	0,3473		
BV-40 + Inc + 25% C	20	10,01	45	10,01	5	210,25	0,2090	0,2249	0,0224
	20	10,01	45	10,01	5	182,56	0,2407		
FS + BV-40 + Inc	20	10,01	45	10,01	5	40,15	1,0945	0,9856	0,1540
	20	10,01	45	10,01	5	50,12	0,8768		
FS + BV-40 + Inc + 20% C	20	10,01	45	10,01	5	155,62	0,2824	0,2592	0,0327
	20	10,01	45	10,01	5	186,15	0,2361		
FS + BV-40 + Inc + 25% C	20	10,01	45	10,01	5	425,68	0,1032	0,0935	0,0138
	20	10,01	45	10,01	5	524,63	0,0838		
FS + BV-40 + Inc + 30% C	20	10,01	45	10,01	5	1550,12	0,0283	0,0305	0,0031
	20	10,01	45	10,01	5	1345,25	0,0327		

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. 36 Permeabilidad de probetas



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3. 29 Equipo de permeabilidad



Fuente: Elaboración propia

La norma ACI 522-R menciona tasas de infiltración de aproximadamente 36 L/m<sup>2</sup>/s (mm/s) para contenidos de vacíos en el rango de 20 % a 25 %. Por otra parte, las investigaciones de Allen Sparkman sugieren una infiltración mínima de 400 plg/h o 0.282 cm/s para obtener un desempeño adecuado del concreto.

Por este análisis se puede tomar un mínimo a tomar en cuenta en los datos obtenidos en laboratorio, siendo que valores por debajo de 0.282 cm/s ya no se consideran porosos.

Por este motivo los datos de BV-40 + Inc con 25 % de cemento y los datos de fibra más BV-40 con incrementador arriba de 20 % de cemento, serán referencia para anular los datos de compresión que no cumplen con el requisito de permeabilidad.

### 3.7.9. Análisis de costos

Tabla 3. 49 Costo del Pavimento convencional

Actividad	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Costo en Bs
Demolición de carpeta existente	m <sup>2</sup>	40,6	480	19488
Excavación	m <sup>3</sup>	59,71	225,65	13473,5615
Capa sub base (e=20 cm)	m <sup>3</sup>	117,17	96	11248,32
Junta longitudinal	m	4,92	80	393,6
Junta transversal	m	80,29	80	6423,2
Hormigón rígido (e = 18 cm)	m <sup>3</sup>	738,56	1080	797644,8
Corte y sello de juntas	m	23,23	80	1858,4
Limpieza	m <sup>2</sup>	16,36	480	7852,8
				<b>Bs 858.382,68</b>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. 50 Costo del pavimento poroso

Actividad	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Costo en Bs
Demolición de carpeta existente	m <sup>2</sup>	40,6	480	19488
Excavación	m <sup>3</sup>	59,71	225,65	13473,5615
Mejoramiento de la subrazante	m <sup>2</sup>	129,52	630	81597,6
Junta longitudinal	m	4,92	80	393,6
Junta transversal	m	80,29	80	6423,2
Corte y sello de juntas	m	23,23	80	1858,4
Geotextil	m <sup>2</sup>	29,56	6000	177360
Hormigón poroso (e = 29,2 cm)	m <sup>3</sup>	607,27	1752	1063937,04
Limpieza	m <sup>2</sup>	16,36	480	7852,8
				<b>Bs1.372.384,20</b>

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en las tablas anteriores, se hace notar que el presupuesto vario ampliamente en el pavimento poroso por el hecho de necesitar mayor espesor y necesitar la geomalla.

Por ende, en tema de costos el pavimento poroso es más caro, pero conlleva soluciones en temporada de lluvias.

CAPÍTULO IV  
CONCLUSIONES Y  
RECOMENDACIONES

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

##### 4.1.1. Conclusiones

La incorporación de fibras a la mezcla de hormigón poroso fue mejorando la resistencia a la compresión como se pueden ver en los gráficos de análisis, concluyendo que los mismos se pueden usar para un tráfico pesado de (210 – 280) kg/cm<sup>2</sup>.

Al ver que la permeabilidad es un factor muy importante en el estudio, se optó por usarla como filtro para descartar resultados de la compresión. Llegando a la siguiente conclusión:

Tabla 3. 51 Costo del pavimento poroso

Muestra N°	Resistencia	k (cm/seg)	Pavimento poroso
H° Convencional	315,1400	-----	<b>No Cumple</b>
FS + Inc (0.10%)	237,7800	2,6291	Cumple
BV-40 + Inc	190,5300	0,7828	Cumple
BV-40 + Inc + 20% C	209,6000	0,3534	Cumple
BV-40 + Inc + 25% C	179,2300	0,2249	<b>No Cumple</b>
FS + BV-40 + Inc	173,2800	0,9856	Cumple
FS + BV-40 + Inc + 20% C	220,7500	0,2592	<b>No Cumple</b>
FS + BV-40 + Inc + 25% C	277,9500	0,0935	<b>No Cumple</b>
FS + BV-40 + Inc + 30% C	286,4900	0,0305	<b>No Cumple</b>

Fuente: Elaboración propia

Para las mezclas de pavimento poroso

Se ve que hay una mejora en la resistencia a los 28 días del concreto poroso, elaborado con fibra sintética en  $550 \text{ gr/m}^3$  y con sus variaciones de incorporador de aire a 0.08 % y 0.10 %, por lo cual se concluye que son los más aptos para uso de pavimento poroso con tráfico pesado.

Se llega a la conclusión en este caso que el pavimento rígido convencional es mejor para tráfico pesado, a pesar de la mejora en sus características del concreto poroso.

En la evaluación de capacidad de soporte para tráfico pesado, el análisis de laboratorio gracias a las propiedades físicas y mecánicas que presentaban los agregados y la adición de la fibra sintética con el incorporador de aire, concluye que el pavimento poroso estudiado en esta tesis es viable para tráficos que resistan una compresión de entre 210 – 280  $\text{kg/cm}^2$ .

La combinación del BV-40 con el incorporador de aire da buenos resultados en porosidad y resistencia a compresión por lo cual se convierte en una alternativa de pavimento poroso.

Se concluye usar el método AASHTO para el cálculo de espesores, siendo que es el recomendado según la Universidad de los Andes, así como también el método de Chile que entra dentro de los parámetros a tomar en cuenta para los cálculos que se requieran.

De acuerdo a la revisión de la literatura realizada se puede constatar que no hay una estandarización de los métodos de dosificación para la producción de concreto permeable.

Si se analiza el tiempo en el que este material ha sido aplicado, tanto en Estados Unidos como en Europa, se puede inferir que existen pocos métodos de dosificación desarrollados. Debido a lo anterior, puede afirmarse que el CP es un material complejo pues su desempeño depende de factores como la cantidad de cemento, la relación a/c el tipo y forma de los agregados, el uso de aditivos químicos y los procesos de aplicación, compactación y curado.

#### **4.1.2. Recomendaciones**

- Para el diseño mezclas se recomienda utilizar los métodos que proponen el ACI 211.3R-02 “Guía para el Proporcionamiento de Concretos de Cero Slump”, y el ACI 522R-10 “Reporte en Concreto Permeable”.
- Se recomienda emplear en el diseño agregados gruesos de tamaño estándar N° 8



(ASTM C 33), puesto que han demostrado brindar mejores resultados en lo que respecta a la Resistencia a la Compresión.

- Para un adecuado proceso de mezclado del concreto permeable, se recomienda la siguiente secuencia: Vaciar en la mezcladora parte del agua de diseño, seguido del agregado grueso y fino (si fuese considerado hasta un 10 % del contenido de cemento), luego el cemento para finalmente añadir tiras de polipropileno y el agua restante. Además, se recomienda que el agua sea añadida en forma gradual y sistemática, debido a que una cantidad insuficiente de agua provocará una mezcla sin consistencia y por ende una baja resistencia, mientras que una cantidad excesiva de agua, generará que la pasta selle los vacíos de la mezcla comprometiendo así la permeabilidad del concreto.
- Se debe tener cuidado al añadir el aditivo BV-40 ya que está dado de acuerdo a la cantidad del 15 % del cemento que se use en la dosificación.
- El tiempo de mezclado recomendado debe ser como mínimo de 2- 4 minutos puesto que se trabaja con relaciones agua/cemento bajas (0.4).
- Se recomienda estudiar el empleo de otros materiales añadidos en el diseño de mezcla del concreto permeable. Como la fibra de celulosa que ha dado muy buenos resultados en carreteras como Maryland de Estados Unidos. A modo de verificar la viabilidad técnica y económica de su incorporación.
- Si se emplea este tipo de pavimento poroso, se recomienda aspirar cada año o más a menudo, para eliminar los residuos de la superficie. Se recomienda el lavado a presión que restaura entre un 80 % a 90 % la permeabilidad.
- Es recomendable usar el aditivo incorporador de aire en zonas frías, porque ayuda al descongelamiento del pavimento, haciendo que no afecte en gran medida a su drenaje de aguas.
- Es también recomendable usar el BV-40 con incorporador de aire en un 20 % de adición de cemento, ya que cumple las normas de compresión y permeabilidad.