

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El pavimento de hormigón poroso es una alternativa respecto al pavimento de hormigón convencional para vías de bajo tráfico, estacionamientos vehiculares, aceras, ciclo vías, etc. Una situación incómoda que puede generarse debido a deficiencias en el diseño hidráulico o a las condiciones topográficas de la vía en calles construidas con el concreto convencional son las películas de agua estancada en la superficie del pavimento, que genera pérdida de adherencia entre la llanta del vehículo con la superficie del pavimento, tal situación produce también una inestabilidad de contacto entre éstos, fenómeno conocido como hidropneumático; además los períodos intensos de lluvias, pueden hacer colapsar los sistemas de drenaje, por lo que se necesita que disminuya el caudal para no saturar dicho sistema.

Para atenuar estos efectos, en los últimos años se ha desarrollado a nivel mundial un modo alternativo de diseñar los pavimentos de estacionamientos y calles de bajo tránsito, construyendo estructuras que permiten el paso del agua a través de la capa superficial hacia su interior, donde se almacena para ser infiltrada si el terreno lo permite, o para ser conducida a un sistema de recolección de forma controlada. De este modo, se disminuye la acumulación de agua en su superficie y el escurrimiento superficial aguas abajo.

Este documento describe algunos antecedentes del uso del concreto permeable como capa de rodadura para pavimentos en otros países. Se plantea la problemática de la presente investigación y se trabaja sobre la base de los objetivos, alcances, justificaciones que motivaron el estudio para esta técnica. La teoría es parte indispensable para poder abordar conceptos relacionados a la técnica de los pavimentos de hormigón poroso.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo tiene como finalidad el dar a conocer propiedades como la dosificación, permeabilidad y resistencia del hormigón poroso para realizar una valoración técnica de funcionalidad vial.

La investigación de nuevas técnicas en los pavimentos está siendo demandada, sobre todo por el cambio climático que ocurre alrededor del mundo, y nuestro país, siendo uno de los más vulnerables, necesita de medidas autosostenibles, por lo que este tipo de hormigón aplicado a pavimentos, encaja perfectamente en esa lógica.

En América del sur, existen antecedentes de estudio del hormigón poroso para pavimentos urbanos en Chile, trabajo similar llevado a cabo en Estados Unidos. En cuanto a nuestro país y sobre todo en el departamento de Tarija, el hormigón poroso es relativamente nuevo con escasa o casi nada de aplicación en la construcción de obras civiles.

Los pavimentos de hormigón poroso dan al conductor una mayor sensación de seguridad, ya que, entre otras ventajas, absorben el agua, disminuyen el ruido, reduce el efecto de spray y desaparece el hidropneumático (que se produce cuando las ranuras o dibujo de los neumáticos no logran evacuar la película de agua que pasa entre ellos y el pavimento, provocando una presión del agua que levanta el neumático de su apoyo, con la consiguiente pérdida de control del vehículo).

1.3 DISEÑO TEÓRICO

1.3.1 Planteamiento del problema

1.3.1.1 Situación problemática

El extenso uso de pavimentos impermeables trae consigo, sobre todo en áreas de un importante desarrollo urbano, considerables problemas en la evacuación de las aguas de lluvias y en las condiciones de escurrimiento aguas abajo. El creciente uso de estas estructuras en áreas urbanas, disminuye notoriamente la capacidad de recarga natural de agua en los terrenos, e incrementa de forma considerable el caudal del escurrimiento superficial llevando consigo una mayor carga contaminante, y por

ende, aumenta el riesgo de provocar inundaciones en los sectores más bajos de las urbanizaciones.

Ante la problemática de la acumulación de agua sobre la superficie del pavimento en periodos intensos de lluvia, generando hidropneumático, y el posible colapso del sistema de drenajes por el aumento del caudal debido a la escorrentía, se plantea como solución no la eliminación sistemática del agua, sino, más bien el impedir que se acumule en la superficie, llevándola al respectivo sistema de alcantarillado a través de una capa de pavimento rígido poroso.

Siendo inexistente el uso de esta técnica en nuestro país, surge una oportunidad de comenzar el desarrollo de estos.

1.3.1.2 Problema

¿Cuál es la valoración técnica en la funcionalidad vial, en cuanto a la permeabilidad y resistencia considerando la modificación del porcentaje de vacíos del hormigón poroso?

1.3.2 Objetivos

1.3.2.1 Objetivo General

- ✓ Estudiar las propiedades del hormigón poroso modificando el porcentaje de vacíos, de tal manera que se obtenga valores de permeabilidad y resistencia que garanticen una buena funcionalidad vial.

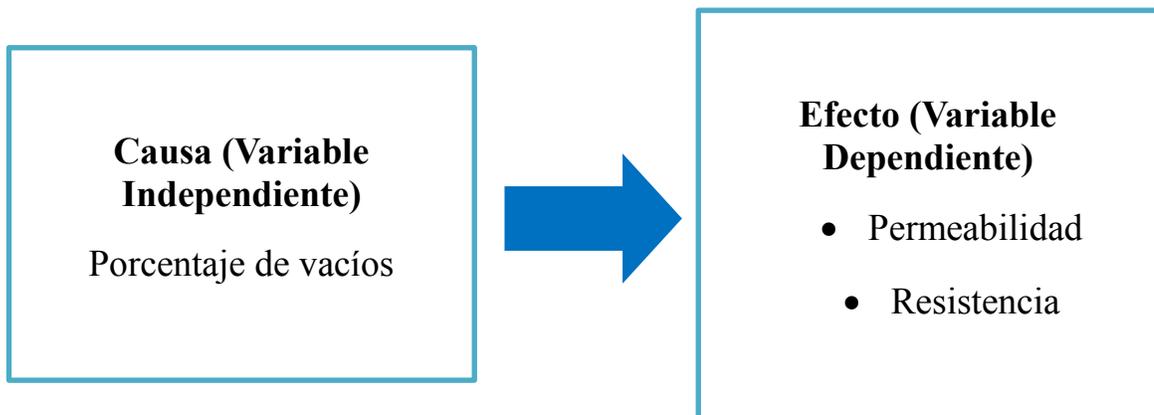
1.3.2.2 Objetivos Específicos:

- ✓ Caracterizar los materiales componentes del hormigón poroso.
- ✓ Analizar y estudiar las características y metodologías para el diseño de hormigón poroso.
- ✓ Determinar la dosificación para los hormigones porosos.
- ✓ Determinar las propiedades de permeabilidad, resistencia a compresión y flexión del hormigón poroso.
- ✓ Analizar los resultados para su utilización en el pavimento.
- ✓ Realizar las conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación.

1.3.3 Hipótesis de la investigación

Modificando el porcentaje de vacíos del hormigón poroso, se tiene diferentes propiedades de permeabilidad y resistencia, que sirven para una valoración técnica de la funcionalidad vial.

1.3.4 Definición de variables operacionales



1.4. DISEÑO METODOLÓGICO

1.4.1. Componentes

1.4.1.1. Unidad de estudio

Las propiedades del hormigón poroso son el objeto de estudio de la presente investigación, donde se modificará los porcentajes de vacíos en el hormigón para medir y analizar aquellas propiedades netamente referidas al pavimento rígido como ser: permeabilidad y resistencia

1.4.1.2. Población

Los hormigones porosos son la totalidad de la población de análisis sobre la cual se realizará los ensayos.

1.4.1.3. Muestra

El porcentaje de vacíos dentro del hormigón poroso producirá una variación en las propiedades y características a medir en la investigación. Por tanto, la muestra en el presente caso son los hormigones con diferentes porcentajes de vacíos.

1.4.1.4. Muestreo

Se dispondrá de los siguientes porcentajes de vacíos para el muestreo del estudio.

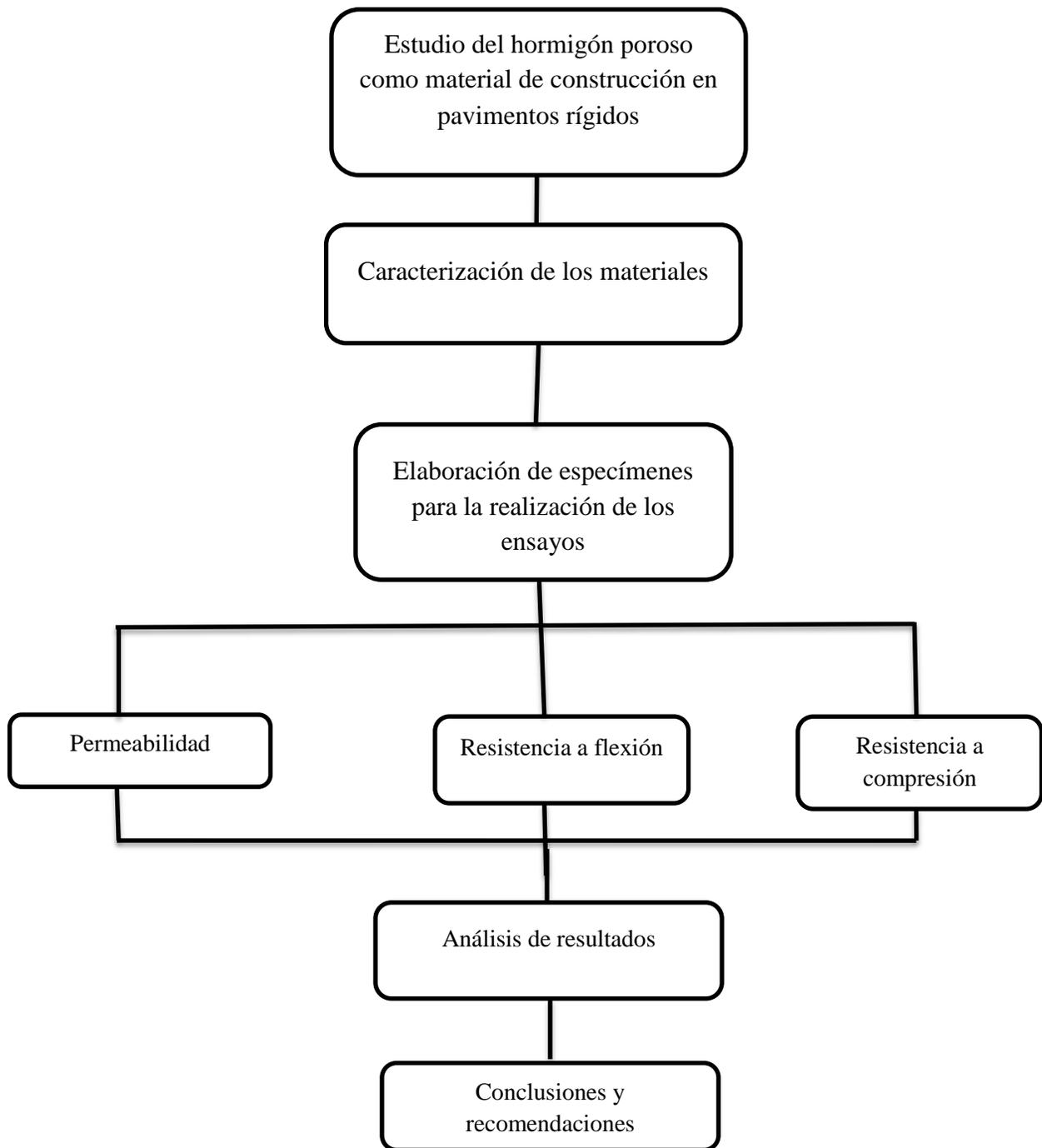
15 % de vacíos
20 % de vacíos
25 % de vacíos

1.4.2. Métodos y técnicas empleadas

1.4.2.1. Metodología

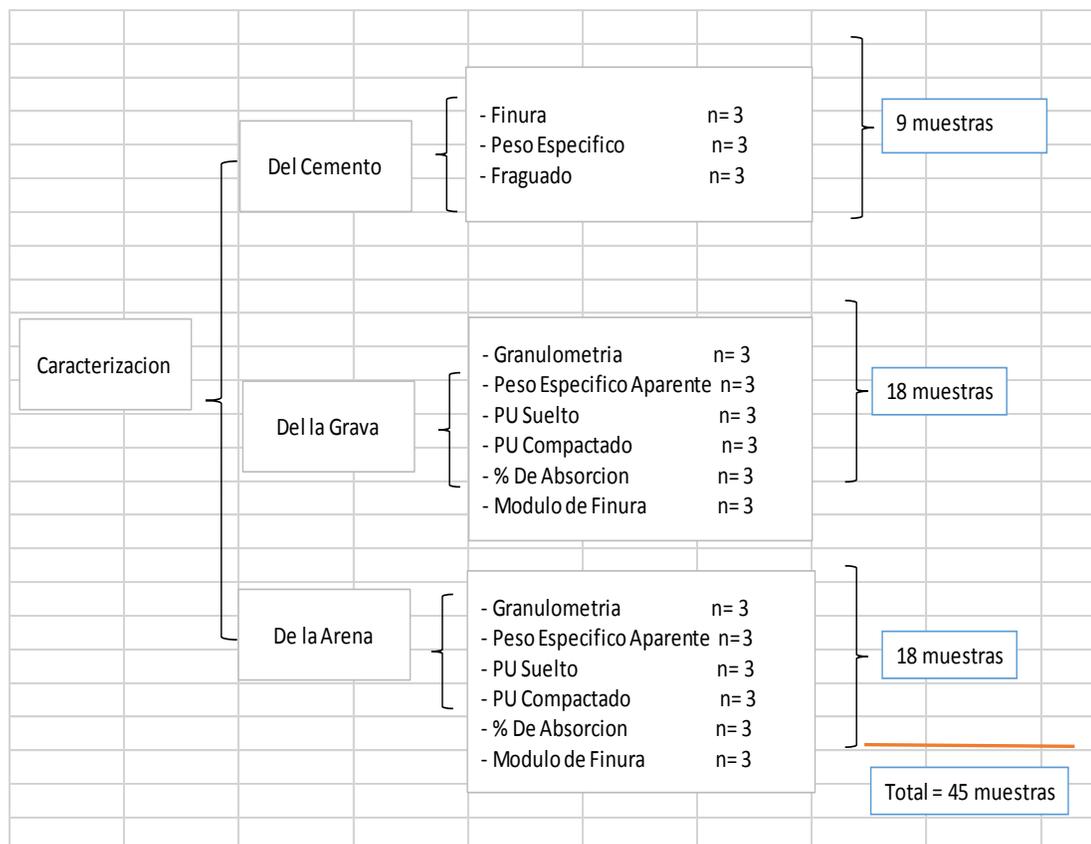
Para poder estudiar las propiedades del hormigón poroso modificando el porcentaje de vacíos por dosificación, de tal manera que se obtenga valores de permeabilidad y resistencia que garanticen una buena funcionalidad vial, se seguirán los siguientes pasos:

- 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.



Se realizará la caracterización de los componentes del hormigón para verificar si se está cumpliendo las normas y si son de buena calidad, por lo tanto, se realizará las siguientes muestras a los agregados, como al cemento:

Cuadro 1.1: Tamaño de la Muestra p/ Caracterización de componentes

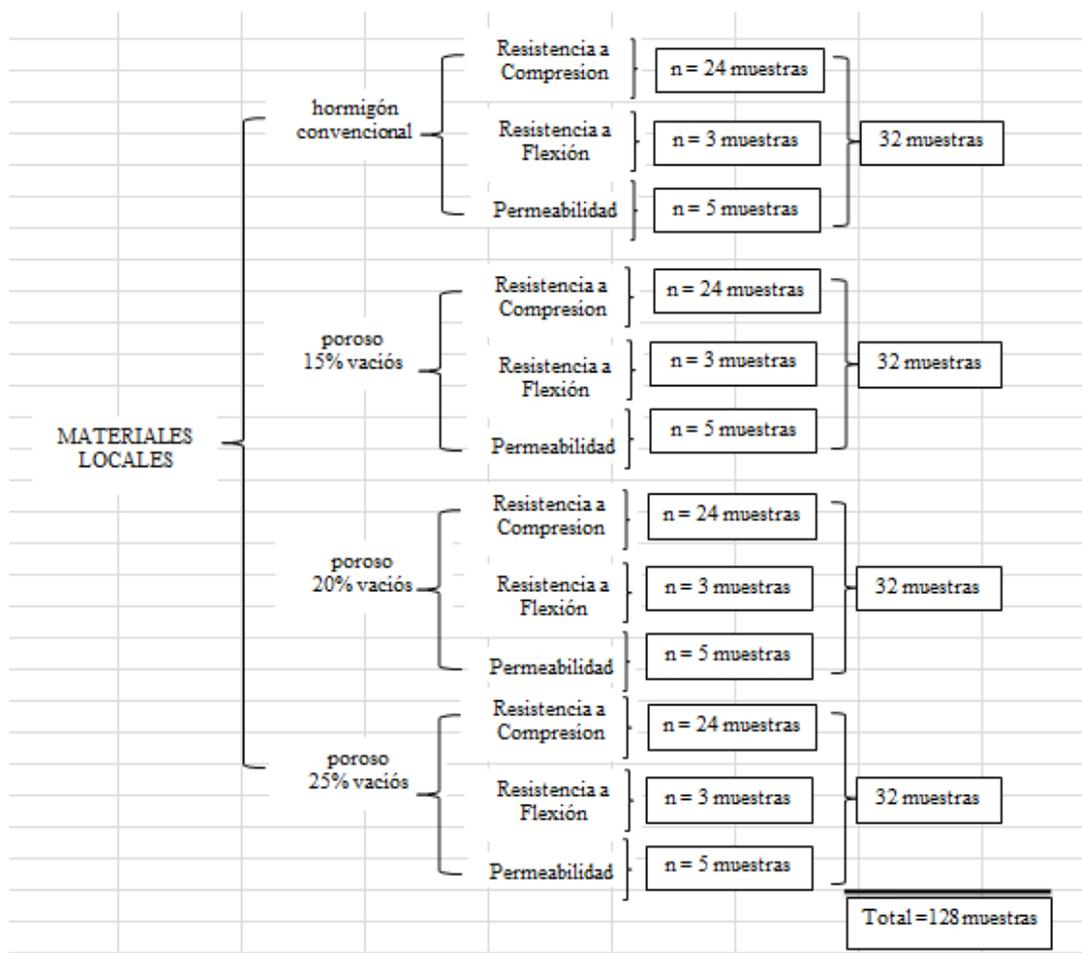


Fuente: Elaboración Propia

Ya que se trata de un tipo de estudio descriptivo, se trabajará con una muestra con un mínimo de 30 por grupo, la cual correspondería al trabajo de investigación teniendo cuatro tipos de hormigón con diferentes porcentajes de vacíos, lo cual dará un total de 96 probetas sometidas a compresión, 12 vigas a flexión con dos apoyos y 20 ensayos de permeabilidad

Se especificará de mejor forma en el siguiente esquema:

Cuadro 1.2: Selección del número de muestras p/ Investigación



Fuente: Elaboración Propia

1.4.2.2. Técnicas

Las técnicas en este trabajo de investigación son documentales y experimentales.

- Documentales por los documentos bibliográficos a utilizar para el diseño de hormigones porosos aplicados a pavimentos rígidos.
- Experimentales porque se realizarán ensayos de laboratorio para efectuar la dosificación y determinar las propiedades del hormigón poroso.

1.4.2.3. Medios

Para la realización del proyecto de investigación se utilizarán los siguientes materiales.

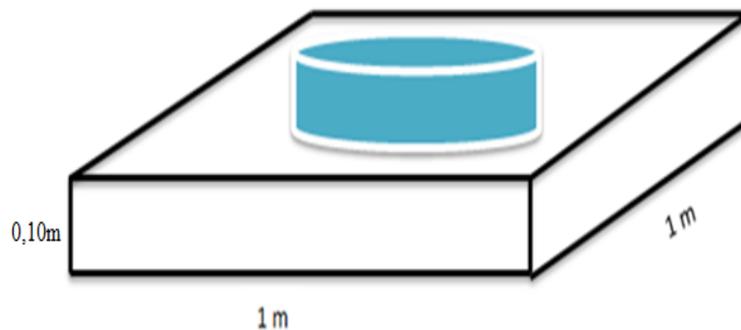
- Instrumentos de laboratorio de hormigones como ser: juego de Tamices, recipientes, moldes, varillas, hornos, balanzas eléctricas.



- Equipo de ensayos en el hormigón.



Gráfica 1.1.Prensas hidráulicas



Gráfica 1.2.Equipo de ensayo de permeabilidad.

1.4.3. Alcance de la investigación

En la presente investigación se realizará un estudio del hormigón poroso como material de construcción en pavimentos rígidos con el fin de disminuir el hidropilado.

El estudio se efectuará en las propiedades físico-mecánicas del hormigón que son requisitos en el empleo del pavimento rígido, por lo tanto, se realizará los siguientes ensayos:

- ❖ Caracterización de los materiales a ser utilizados para la investigación.
- ❖ La dosificación y elaboración de especímenes para realizar los ensayos.
- ❖ Ensayos de resistencia a compresión, resistencia a flexión y permeabilidad.
- ❖ Análisis de resultados, mediante cuadros y gráficas.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

MARCO TEÓRICO

En el desarrollo de este proyecto de investigación se ha tomado en cuenta la información y el conocimiento secundario disponible, ya que es necesario tener un concepto claro de los componentes y etapas que se tratarán en el presente estudio, referidos al Concreto en Pavimentos Rígidos.

2.1. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS

Un pavimento puede definirse como la superestructura de la obra vial que hace posible la circulación expedita de los vehículos como la comodidad, seguridad y economía requeridos por el usuario y previstos por el proyecto. En general, está constituido por un conjunto de capas superpuestas, compuestas por materiales seleccionados, procesados o sometidos a algún tratamiento, las cuales quedan comprendidas entre el nivel superior de la terracerías y la superficie de rodamiento y cuyo comportamiento depende de la calidad y el tipo de los materiales, de su espesor y disposición en la estructura de los pavimentos así como la calidad de la construcción.

La clasificación clásica de los pavimentos distingue dos tipos principales: los pavimentos flexibles o asfálticos, y los de tipo rígido o de concreto hidráulico. En el último, en particular, los pavimentos propiamente dichos están constituidos por una losa relativamente delgada, apoyada sobre una sub base; y, en ocasiones, directamente sobre la capa subrasante, especialmente cuando está es de muy buena calidad y el tránsito no es muy intenso. Debido a que el módulo de elasticidad del concreto es mucho mayor que el correspondiente a los materiales que les sirven de apoyo, la mayor parte de la capacidad de carga de los pavimentos procede de la propia losa, efecto que es conocido como la propia viga. Las losas de concreto hidráulico deben resistir, además de los esfuerzos provocados por el tránsito, los producidos por cambio de temperatura y humedad, así como por cambios

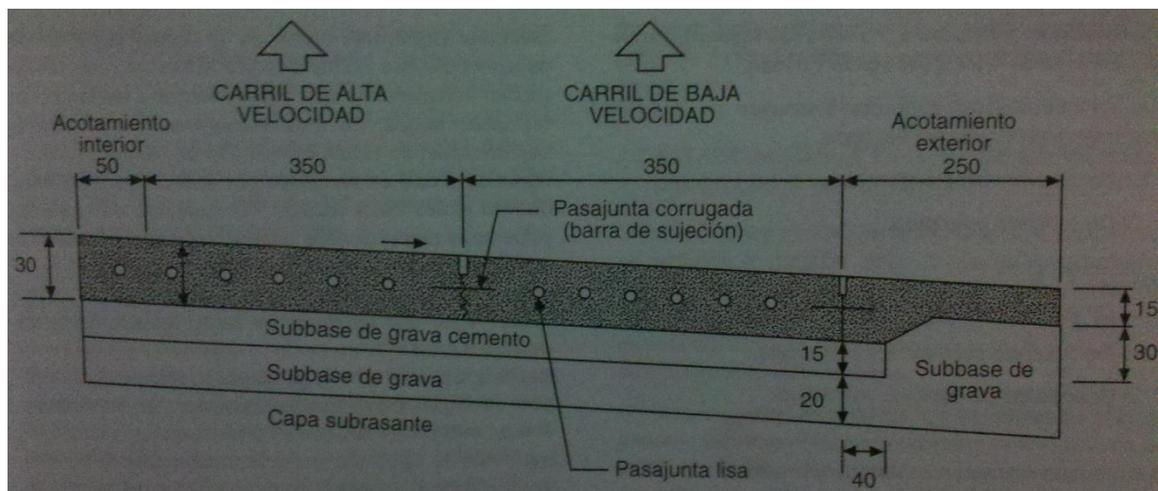
volumétricos de los materiales que sirven de apoyo. Las acciones anteriores tienden a deformar las losas produciendo esfuerzos de intensidad muy variables.

En términos generales, puede decirse que las características estructurales de las losas dependen fundamentalmente del espesor de la calidad de concreto empleado, interviniendo en esta última y en forma primordial la resistencia a la tensión, aun cuando la resistencia al desgaste superficial juega también un papel importante.

Adicionalmente, debe hacerse hincapié en que las características estructurales y funcionales antes descritas y previstas en el proyecto que dependen en gran parte, de las técnicas y de los procesos constructivos, así como de la supervisión y del control de la calidad. Razón por la cual, es muy importante que estos sean los adecuados para cumplir a cabalidad las especificaciones establecidas.

2.2. ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS Y SUS FUNCIONES

Gráfica 2.1 Sección Transversal típica de un Pavimento Rígido



Fuente: IMCYC Pavimentos de Concreto

- **Losas de Concreto Hidráulico**

Constituyen la parte fundamental del pavimento rígido, debiendo estar capacitadas para resistir los esfuerzos producidos por el tránsito y los efectos de la intemperie, y 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, de manera que, sólo deban ser necesarias algunas actuaciones locales y esporádicas de conservación, de poca importancia y costo.

- **Subbase**

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 de pavimentos y en ocasiones puede constituir una capa drenante.

Se trata de un elemento importante para garantizar la uniformidad del soporte de las losas, y se construye por lo general con materiales granulares no cementados, los cuales, cuando el tránsito llegue a ser muy pesado e intenso, se hace necesario estabilizar, generalmente con cemento portland, para evitar que bajo su acción sufran erosiones indeseables, recurriéndose a subbases de grava-cemento y aun de concreto pobre.

Debe mencionarse que esta capa también es denominada base, por su posición inmediata bajo la losa; sin embargo, se le designa como subbase debido a que en general 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.

- **Capa Subrasante**

Constituye la capa superior de la terracería y puede estar formado por el propio terreno natural adecuadamente compactado y perfilado, o por material seleccionado procedente de un banco, si el material natural es 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 DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO

Como se mencionó anteriormente, en los pavimentos rígidos la losa de concreto hidráulico constituye el elemento de mayor responsabilidad estructural y funcional, teniendo las capas inferiores, como la subbase y la capa subrasante, la función de asegurar un apoyo uniforme y estable al pavimento, entre otras más.

Normalmente, el espesor de las losas puede partir de unos 15 cm, para tránsito muy ligero, hasta llegar a ser del orden de los 40 cm en el caso de autopistas y carreteras con alto nivel de tránsito pesado, requiriendo además concretos homogéneos y de alta calidad, con resistencias a la tensión no inferiores a 3,5 Mpa (35 kg/cm²), y muy comúnmente de 4 Mpa (40 kg/cm²) o más.

Los pavimentos de concreto hidráulico 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
- Sobrelosas de concreto hidráulico

2.4. CONCRETO HIDRÁULICO PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS

Los hormigones para 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.

Se requieren de hormigones con ciertas características especiales. Estas últimas derivan de la necesidad de contar con un hormigón que potencie la resistencia de adherencia entre la pasta de cemento y las partículas de mayor tamaño, propiedad que

se mide con el ensayo normalizado de resistencias. Un buen hormigón es aquel que resulta satisfactorio tanto en sus estados: Fresco y endurecido.

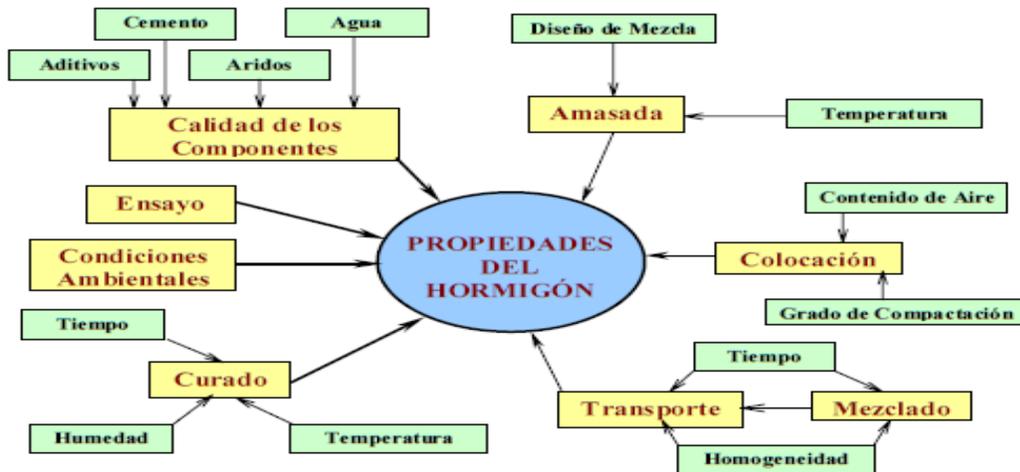
Normalmente, las especificaciones indican resistencias a los 28 días de edad y un nivel de fracción defectuosa de 20% con tamaño de árido de 40 mm. y cono de 3 cm.

2.5. FACTORES QUE AFECTAN EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO HIDRÁULICO

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

Su empleo es habitual en obras de arquitectura e ingeniería, tales como edificios, puentes, pavimentos, diques, puertos, canales, túneles, etc. e incluso en aquellas edificaciones cuya estructura principal se construye en acero, su utilización es imprescindible para conformar la cimentación.

• FACTORES QUE AFECTAN LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN



2.6. ENSAYOS DEL HORMIGÓN EMPLEADOS EN EL PAVIMENTO RÍGIDO

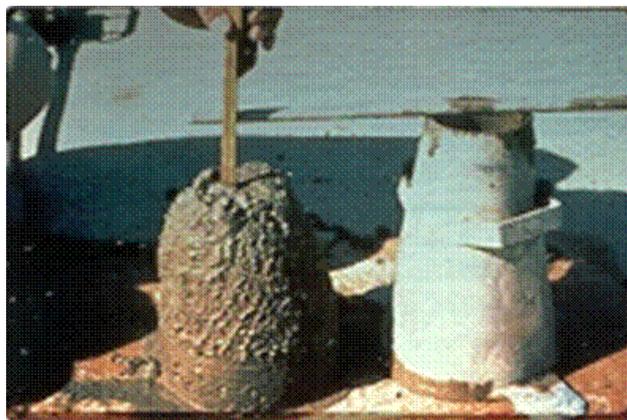
a) **Consistencia y Trabajabilidad (ASTMC143-INVE-404).** Sirve para determinar variaciones en la uniformidad entre las diferentes bachadas de una determinada mezcla, también da una idea de la trabajabilidad y de la facilidad de puesta en obra del concreto.

- **Factores de los que depende la Consistencia**

Existe gran cantidad de factores que influyen en la trabajabilidad, siendo los más importantes los siguientes:

- a. Gradación de los agregados.
- b. Forma y textura superficial de los agregados.
- c. Contenido de aire.
- d. Contenido de aditivos.
- e. Fluidez de la pasta.
- f. Cantidades relativas de pasta y agregados.
- g. Relación Arena - Agregado Total.
- h. Algunos factores externos.

Gráfica 2.2: Ensayo de Abrams



Fuente: Elaboración Propia

Cuadro 2.1 Tabla de Asentamiento en el cono de Abrams

Asentamiento (cm)	Consistencia (Tipo de Concreto)	Grado de Trabajabilidad	Tipo de Estructura y Colocación
0 - 2,0	Muy seca	Muy pequeño	Vigas o pilotes de alta resistencia con vibradores de encofrados.
2,0 - 3,5	Seca	Pequeño	Pavimentos vibrados y construidos con máquina extrusora.
3,5 - 5,0	Semi - seca	Pequeño	Construcción en masa voluminosa, losas medianamente reforzadas con vibración, fundaciones en concreto simple, pavimentos con vibradores normales.
5,0 - 10,0	Media	Medio	Losas medianamente reforzadas, pavimentos, compactados a mano, columnas vigas, fundaciones y muros, con vibración.
10,0 - 15,0	Húmeda	Alto	Secciones con mucho refuerzo, trabajos donde la colocación sea difícil, revestimiento de túneles, no recomendable para compactarlo demasiado.

Fuente: Norma ACI 211

b) Resistencia a la Compresión (f'_c) (ASTM C39 – INV E410). Es una medida universal de la calidad del concreto, que no está muy relacionada con las condiciones de trabajo de un pavimento rígido, dado que la relación entre los esfuerzos de compresión del tránsito y la resistencia a la compresión del concreto es muy pequeña para influir sobre el espesor del diseño de las losas.

- **Factores que inciden en la Resistencia**

En general, el factor más importante en la resistencia de un concreto totalmente compactado es la relación agua/cemento. Sin embargo, para una mezcla trabajable, bien dosificada y en condiciones estándar de mezclado, curado y métodos de prueba, además de la influencia de la relación agua/cemento, intervienen otros elementos como la granulometría, textura superficial, forma, resistencia, rigidez, tamaño máximo del agregado, el tiempo, la calidad del cemento, así como de la calidad del agua y el tipo y calidad de los aditivos.

La resistencia del concreto también depende de la temperatura, del fraguado, de la edad y muchos otros factores.

- **Tipo y cantidad de Cemento**

El tipo y cantidad de cemento utilizado tiene gran influencia en la resistencia final conseguida por el concreto debido a que el cemento es el material químicamente “activo” en la mezcla.

Los diferentes tipos de cemento o distintas marcas, no se deben intercambiar sin antes hacer un riguroso análisis del efecto que dicho cambio puede tener sobre la resistencia.

Lo más importante, en lo que respecta al cemento, es su cantidad en la mezcla, y generalmente que a mayor contenido de éste se consiguen mayores resistencias. Dicha afirmación tiene su límite, ya que se ha demostrado que para mezclas con una baja relación agua/cemento y con un contenido de cemento muy alto (superior a 470 Kg/m³), existe disminución en la resistencia, en especial cuando se utiliza agregado de gran tamaño. Este comportamiento se debe a los esfuerzos inducidos por la contracción, que al ser obstruida por las partículas de agregado, causa agrietamientos en la pasta o una pérdida de adherencia entre el cemento y el agregado.

- **Relación agua/cemento**

Un factor que se ha venido mencionando y que tiene gran influencia en la mayor parte de las propiedades del concreto y en especial en la resistencia, es la relación agua / cemento.

Cuando se estudió lo referente al agua de mezclado, se anotó que ésta forma parte de aproximadamente el 15% del volumen total del concreto, del cual el 5% hidrata al cemento y el 10% restante es agua evaporable. Este último se utiliza para proporcionar fluidez a la mezcla y lograr una masa plástica; al evaporarse deja en su lugar poros de aire.

Gráfica 2.3 Ensayo de Compresión



Fuente: Elaboración Propia

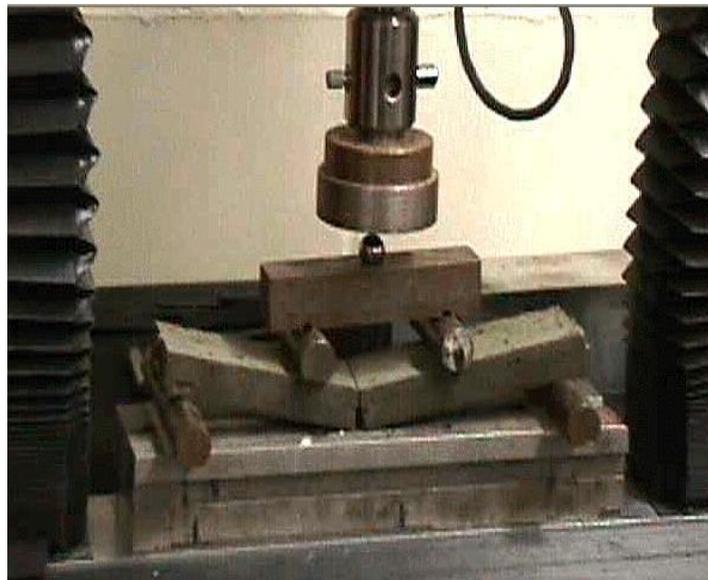
- c) **Resistencia a la Flexión σ_R (ASTM C78 – INV E-414)**. Es el valor que se utiliza en el diseño de pavimentos rígidos, debido a que la relación entre los esfuerzos de flexión producidos por el tránsito y la resistencia a flexión del concreto es alta, a menudo mayor de 0.5. Este valor se determina mediante ensayos de módulo de rotura sobre probetas prismáticas apoyadas en sus extremos y aplicando dos cargas concentradas en los tercios de la luz.

Además, Constituye uno de los factores más importantes que debe considerarse en el diseño de los pavimentos rígidos. Debido a que las losas de concreto se flexionan bajo el efecto de las cargas impuestas por el tránsito, se producen en ellas esfuerzos de tensión y compresión, siendo los primeros obviamente más importantes, ya que la resistencia del concreto a la flexión es de apenas del orden 10 por ciento de su resistencia a compresión. Por esta razón es que, para efectos del diseño, se deben considerar los esfuerzos y la resistencia de concreto a la tensión, determinándose esta última por medio de ruptura a la tensión por flexión, obtenido al ensayar vigas en la prueba de carga en los tercios del claro. Estas pruebas se realizan en especímenes cuyas edades corresponden a 7, 14, 28 y 90 días, utilizándose las dos primeras para el control de obra y para definir la apertura del tránsito.

Las resistencias a 28 días se utilizan para el diseño de pavimentos de carreteras, y la correspondiente a 90 días, generalmente para el diseño de pavimentos de aeropuertos. Con relación a los módulos comúnmente especificados para el diseño de pavimentos, estos varían por lo común de 3,5 a 5 Mpa (35 a 50 kg/cm²). En general se recomienda utilizar los módulos superiores a 4 Mpa (40 kg/cm²) para pavimentos de autopistas y carreteras con tránsito pesado.

En ocasiones se suele especificar y controlar la resistencia del concreto mediante pruebas convencionales de compresión en especímenes cilíndricos, f'_c , estableciéndose una correlación con respecto al módulo de ruptura. El factor de correlación entre el MR y f'_c llega a ser muy amplio, fluctuando entre 0,1 y 0,17, razón por la cual este procedimiento resulta admisible en obras pequeñas y previa correlación en cada caso particular. Hay que señalar que igualmente debe conocerse el módulo elástico del concreto para el diseño de espesores según algunos métodos. El módulo elástico de este material utilizado en pavimento varía usualmente entre 20000 y 60000 Mpa.

Gráfica 2.4 Ensayo de Viga a Flexión



Fuente: Elaboración Propia

d) Curado del Concreto

Luego del proceso de fraguado del concreto es necesario mantener el concreto tan saturado de agua como sea posible, con el fin de terminar de hidratar al cemento y conseguir su máxima eficiencia.

Por esta razón, la resistencia del concreto depende en gran medida de la atención que se preste a este factor.

Otro factor importante en el curado es su temperatura, debido a que un aumento durante este proceso acelera las reacciones químicas de la hidratación lo cual afecta en forma benéfica la resistencia a edades tempranas del concreto, pero con consecuencias adversas en la resistencia posterior.

e) Permeabilidad

Esta prueba tiene gran importancia ya que sus resultados indican si existe la posibilidad de que el agua, proveniente de las lluvias o escurrimientos superficiales, penetre a través de los poros que presenta el pavimento rígido.

Permeabilidad es una de las propiedades en el hormigón empleado para el pavimento rígido, debido a que esta estructura se somete a diferentes tipos de precipitaciones, la cual hace que el agua se escurra o se infiltre en la losa de hormigón; esta permeabilidad se origina por el grado de porosidad que contenga la muestra y el acabado que tenga éste.

2.7. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PAVIMENTO RÍGIDO

Factores básicos en el proceso de diseño de una mezcla

La estimación del peso de la mezcla para el concreto requerido implica una secuencia de pasos lógicos y directos, que de hecho, ajustan las características de los materiales disponibles a una mezcla adecuada para el trabajo. El aspecto de la adaptabilidad no siempre permite la selección individual de las proporciones. En general, estas especificaciones exigen todas o algunas de las siguientes recomendaciones:

- Relación máxima agua/cemento o relación agua/materiales cementantes.
- Contenido mínimo de cemento.
- Contenido de aire.
- Asentamiento.
- Tamaño máximo de agregado.
- Resistencia.
- Otros requisitos relacionados con aspectos como sobre-diseño de resistencia, aditivos y tipos especiales de cemento, otros materiales cementantes o agregados.

Especificaciones de materiales:

Cemento

El cemento utilizado será Portland, de marca aprobada oficialmente, el cual deberá cumplir lo especificado en la norma AASHTO M85. Si los documentos del Proyecto no señalan algo diferente, se empleará el denominado Tipo I.

Cuadro 2.2 Norma para Cementos

Tabla 1. Resumen de cambios a la AASHTO M85 y ASTM C150 de 2004 a 2009			
Disposición	AASHTO M85-04	ASTM C150-04a	AASHTO M 85-09 ASTM C150-09
Finura máxima (Blaine) Una muestra de un promedio de 5	400 [I,II,IV,V] 420 [I,II,IV,V]	Sin límite Sin límite	430 [II(MH)*, [V] Ninguno
Tipo II máximo C_3S	58	Sin límite	Tipo II(MH) $4.75C_3A + C_3S \leq 100$
Máximo de adiciones en el procesamiento	1%	No hay límite prescrito	Orgánico $\leq 1\%$ Inorgánico $\leq 5\%$
Uso de piedra caliza	No permitido	Hasta 5%	Hasta 5%, con nuevo nombre y Sección 5 reorganizada para mayor claridad
Tipo II mínimo SiO_2	20%	Sin límite	Sin límite
Nota D de la Tabla 1	Ambiguo	Ambiguo	Mejorado para mayor claridad

* Exento para cementos Tipo II (MH) con bajo índice de calor, del límite de finura cuando $4.75 C_3A + C_3S \leq 90$

Fuente: elaboración Propia

Agua

El agua de amasado interviene en las reacciones de hidratación del cemento. La cantidad de la misma debe ser la estricta necesaria, pues la sobrante que no interviene en la hidratación del cemento se evaporará y creará huecos en el hormigón

disminuyendo la resistencia del mismo. Puede estimarse que cada litro de agua de amasado en exceso supone anular dos kilos de cemento en la mezcla. Sin embargo, una reducción excesiva de agua originaría una mezcla seca, poco manejable y muy difícil de colocar en obra. Por ello, es un dato muy importante fijar adecuadamente la cantidad de agua.

Gráfica 2.5: Agua



Fuente: elaboración Propia

Durante el fraguado y primer endurecimiento del hormigón se añade el agua de curado para evitar la desecación y mejorar la hidratación del cemento.

Ambas, el agua destinada al amasado, como la destinada al curado deben ser aptas para cumplir su función; de esta manera, el agua de curado afectará las reacciones químicas cuando se está endureciendo el hormigón. Normalmente, el agua apta suele coincidir con la potable y debe cumplir una serie de parámetros que están normalizados. Así, en la normativa está limitado el pH, el contenido en sulfatos, en ion cloro y los hidratos de carbono.

Cuando una masa es excesivamente fluida o muy seca hay peligro de que se produzca el fenómeno de la segregación (separación del hormigón en sus componentes: áridos, cemento y agua). Suele presentarse cuando se realiza el hormigonado con caídas de material superiores a los 2 metros.

Agregado Grueso

La grava o agregado grueso es uno de los principales componentes del hormigón o concreto, por este motivo su calidad es sumamente importante para garantizar buenos resultados en la preparación de estructuras de hormigón.

El agregado grueso estará formado por roca o grava triturada obtenida de las fuentes previamente seleccionadas y analizadas en laboratorio, para certificar su calidad. El tamaño mínimo será de 4,8 mm. El agregado grueso debe ser duro, resistente, limpio y sin recubrimiento de materiales extraños o de polvo, los cuales, en caso de presentarse, deberán ser eliminados mediante un procedimiento adecuado, como ser el lavado.

La forma de las partículas más pequeñas del agregado grueso de roca o grava triturada deberá ser generalmente cúbica y deberá estar razonablemente libre de partículas delgadas, planas o alargadas en todos los tamaños.

En general, el agregado grueso deberá estar de acuerdo con la norma ASTM C 33 (El uso de la norma está sujeto al país en el cual se aplique la misma, ya que las especificaciones de cada una de estas varían de acuerdo con la región o país).

Cuadro 2.3 Requisitos de la norma ASTM para el agregado grueso

Sustancia	Norma	Límite máximo(%)
Material que pasa por el tamiz No. 200	(ASTM C 117)	máx. 0.5
Materiales ligeros	(ASTM C 123)	máx. 1
Grumos de arcilla	(ASTM C 142)	máx. 0.5
Otras sustancias dañinas	-	máx. 1
Pérdida por intemperismo	(ASTM C 88, método Na ₂ SO ₄)	máx. 12
Pérdida por abrasión en la máquina de Los Ángeles	ASTM C 131 y C 535	máx. 40

El agregado grueso debe estar bien graduado entre los límites fino y grueso y deben estar separados en tamaños normales cuyas granulometrías se indican a continuación:

Cuadro 2.4 Granulometría de la norma ASTM C-33 para el agregado grueso

Tamiz U.S.Standard	Dimensión de la malla (mm)		Porcentaje en peso que pasa por los tamices individuales	
-	-	19 mm	38 mm	51 mm
2"	50	-	100	100
1½"	38	-	95-100	95-100
1"	25	100	-	35-70
¾"	19	90-100	35-70	-
½"	13	-	-	10-30
⅜"	10	20-55	10-30	-
N° 4	4.8	0-10	0-5	0-5
N° 8	2.4	0-5	-	-

Fuente: Norma ASTM

Módulo de finura

El módulo de finura del agregado grueso, es el índice aproximado que nos describe en forma rápida y breve la proporción de finos o de gruesos que se tiene en las partículas que lo constituyen.

El módulo de finura para el agregado grueso se calcula sumando los porcentajes acumulados de los tamices 1½", ¾", ⅜", N°4 + 500 y dividiendo el total entre 100. Es un indicador de la finura de un agregado es: cuanto mayor sea el módulo de finura, más grueso es el agregado. Por lo general, el rango del módulo de finura del agregado grueso es de 5.5 a 8.5

Tamaño máximo (TM)

Se define como la abertura del menor tamiz por el cual pasa el 100% de la muestra.

Tamaño Máximo Nominal (TMN)

El tamaño máximo nominal es otro parámetro que se deriva del análisis granulométrico y está definido como el tamiz que le sigue en abertura (mayor) a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado es del 15% o más. La mayoría de los especificadores granulométricos se dan en función del tamaño máximo nominal y comúnmente se estipula de tal manera que el agregado cumpla con los siguientes requisitos.

- ✓ El TMN no debe ser mayor que $1/5$ de la dimensión menor de la estructura, comprendida entre los lados de una formaleta.
- ✓ El TMN no debe ser mayor que $1/3$ del espesor de una losa.

El TMN no debe ser mayor que $3/4$ del espaciamiento libre máximo

Agregado Fino

La arena, agregado fino o árido fino se refiere a la parte del árido o material cerámico inerte que interviene en la composición del hormigón.

Gráfica 2.6. Agregado fino (arena)



Fuente: Elaboración propia

El agregado fino consistirá en arena natural proveniente de canteras aluviales o de arena producida artificialmente. La forma de las partículas deberá ser generalmente cúbica o esférica y razonablemente libre de partículas delgadas, planas o alargadas. La arena natural estará constituida por fragmentos de roca limpios, duros, compactos, durables.

En general, el agregado fino o arena deberá cumplir con los requisitos establecidos en la norma ASTM C-33, es decir, no deberá contener cantidades dañinas de arcilla, limo, álcalis, mica, materiales orgánicos y otras sustancias perjudiciales.

Cuadro 2.5 Requisitos de la norma ASTM para el agregado fino

Sustancia	Norma	Límite máximo (%)
Material que pasa por el tamiz n° 200	(ASTM C 117)	3%
Materiales ligeros	(ASTM C 123)	1%
Grumos de arcilla	(ASTM C 142)	1%
Total de otras sustancias dañinas (como álcalis, mica, limo)	-	2%
Pérdida por meteorización	(ASTM C 88, método Na ₂ SO ₄)	10%

Fuente: Norma ASTM

El agregado fino deberá estar bien gradado entre los límites fino y grueso y tendrá la siguiente granulometría:

Cuadro 2.6. Granulometría de la norma ASTM C-33 para el agregado fino

Tamiz U.S.Standard	Dimensión de la malla (mm)	Porcentaje en peso que pasa
Nº 3/8"	9,52	100
Nº 4	4,75	95 - 100
Nº 8	2,36	80 - 100
Nº 16	1,18	50 - 85
Nº 30	0,60	25 - 60
Nº 50	0,30	10 - 30
Nº 100	0,15	2 - 10

Fuente: Norma ASTM

Módulo de Finura

El módulo de finura del agregado fino, es el índice aproximado que nos describe en forma rápida y breve la proporción de finos o de gruesos que se tiene en las partículas que lo constituyen.

El módulo de finura de la arena se calcula sumando los porcentajes acumulados en las mallas siguientes: Número 4, 8, 16, 30, 50 y 100 y dividiendo el total entre 100. Un indicador de la finura de un agregado es: cuanto mayor sea el módulo de finura, más grueso es el agregado.

Es útil para estimar las proporciones de los agregados finos y gruesos en las mezclas de concreto.

El rango del módulo de finura de la arena es de 2.3 a 3.1

Si el módulo de finura de una arena es de 2.3 se trata de una arena fina; y si el modulo se encuentra entre 2.3 a 3.1 se trata de una arena mediana. Y si el modulo es mayor que 3.1 se trata de una arena gruesa.

Peso específico

Se define en la dosificación de hormigón, como la relación del peso de la muestra de un material en el aire, al peso del agua desplazado por el mismo incluyendo sus poros permeables. Según sea que el peso en el aire se considera seco (en horno a peso constante) o en condición de saturado y superficie seca, el peso específico se refiere a una de esas condiciones.

El peso específico de los agregados, que se expresa también como densidad en el sistema Internacional de Unidades, adquiere importancia en la construcción, cuando se requiere que el concreto tenga un peso límite, sea máximo o mínimo. Además, el peso específico es un indicador de calidad, en cuanto que los valores elevados corresponden a materiales de buen comportamiento, mientras que el peso específico bajo generalmente corresponde a agregados absorbentes y débiles, caso en el que es recomendable realizar pruebas adicionales.

Porcentaje de absorción

Es la cantidad de agua que un agregado necesita para pasar de la condición seca a de saturado superficialmente, se expresa generalmente en porcentaje:

$$\% \text{Absorción} = \frac{\text{Masa}_{\text{sss}} - \text{Masa}_{\text{seca}}}{\text{Masa}_{\text{seca}}} * 100$$

La absorción de los agregados se obtiene, generalmente, después de haber sometido al material a una saturación durante 24 horas; cuando ésta termina, se procede a secar superficialmente el material, y por diferencias de masa se logra obtener el porcentaje de absorción con relación a la masa seca del material.

Humedad superficial

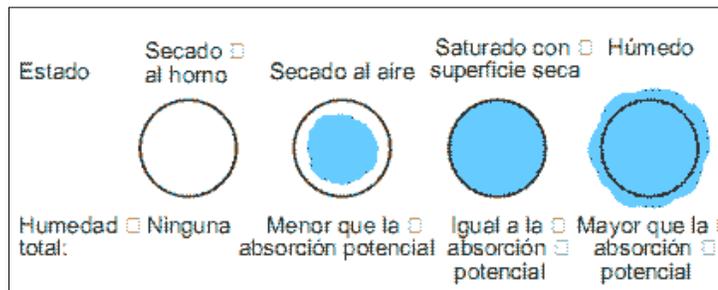
Es la cantidad de agua superficial retenida por la partícula, su influencia está en la mayor o menor cantidad de agua necesaria en la mezcla se expresa de la siguiente forma:

Las condiciones de humedad de los agregados se presentan en la Figura y se las puede definir como:

$$\% \text{ humedad} = \frac{\text{Peso humedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} * 100$$

1. Secado al horno – totalmente absorbente
2. Secado al aire – la superficie de las partículas está seca, pero su interior contiene humedad y, por lo tanto, aún es ligeramente absorbente
3. Saturado con superficie seca (SSS) – no absorben ni ceden agua al concreto
4. Húmedos – Contiene un exceso de humedad sobre la superficie (agua libre)

Gráfica 2.7. Condiciones de humedad de los agregados.



Fuente: Elaboración propia

La cantidad de agua que se adiciona en la planta de concreto se debe ajustar para las condiciones de humedad de los agregados, a fin de que se atienda a la demanda de agua del diseño de la mezcla de manera precisa. Si el contenido de agua del concreto no se mantiene constante, la relación agua-cemento variará de una amasada a la otra, resultando en la variación de otras propiedades, tales como la resistencia a la compresión y la Trabajabilidad.

Los agregados grueso y fino generalmente tienen niveles de absorción (contenido de humedad a SSS) que varían del 0.2% al 4% y del 0.2% al 2%, respectivamente. Los contenidos de agua libre, por lo general, varían del 0.5% al 2% para el agregado grueso y del 2% al 6% para el agregado fino. El contenido máximo de humedad del agregado grueso drenado es normalmente menor que aquél del agregado fino. La mayoría de los agregados finos pueden mantener un contenido máximo de humedad drenada de cerca del 3% al 8%, mientras que el agregado grueso puede mantener del 1% al 6%.

2.8. DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL

El objetivo de la dosificación de hormigones es determinar las proporciones en que deben combinarse los materiales componentes, con el fin de obtener las condiciones previstas para el hormigón.

Existen varios métodos de dosificación del hormigón como ser los métodos de García Balado, método O'Reilly, método Aashto y el método Americano ACI entre otros. Pero el método ACI es el que garantiza mejor calidad en el hormigón, por lo cual se opta por este método para la dosificación de la mezcla.

- Método de Dosificación ACI 211

Cuadro 2.7 Selección de la resistencia del hormigón f_{ck} y f_{cm}

Resistencia de Diseño Cuando no Hay Datos que Permitan Determinar la Desviación Estándar (a)	
Resistencia específica f_{ck} en (kg/cm²)	Resistencia de diseño de la mezcla f_{cm} en (kg/cm²)
Menos de 210 kg/cm ²	$f_{ck} + 70$ kg/cm ²
De 210 a 350 kg/cm ²	$f_{ck} + 85$ kg/cm ²
Más de 350 kg/cm ²	$f_{ck} + 100$ kg/cm ²

Fuente: Código ACI 211

Cuadro 2.8 Selección del asentamiento

Asentamientos Recomendados para Diversos Tipos de Construcción y Sistemas de Colocación y Compactación				
Consistencia	Asentamiento mm.	Ejemplo de Tipo de construcción	Sistema De colocación	Sistema de compactación
Muy seca	0-20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación	Con vibradores de formaleta; hormigones de proyección neumática (lanzado)	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión
Seca	20-35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa
Semi - seca	35-50	Pavimentos, fundaciones en homigón simple	Colocación con máquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas, con vibración
Media	50-100	Elementos compactados a mano, losas muros, vigas	Colocación manual	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración
Húmeda	100-150	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo	Secciones bastante reforzadas, sin vibración
Muy húmeda	150 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo-embudo Tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración (Normalmente no adecuados para vibrarse)

Fuente: Código ACI 211

Cuadro 2.9 Selección del tamaño máximo del agregado

Tamaños máximos nominales de agregados según el tipo de construcción				
Dimensión mínima de la sección (cm)	Tamaño máximo en pulg. (mm.)			
	Muros reforzados, vigas y columnas	Muros sin refuerzo	Losas muy reforzadas	Losas sin refuerzo o poco reforzadas
6 - 15	1/2"(12) - 3/4"(19)	3/4"(19)	3/4"(19) - 1"(25)	3/4"(19) - 1 3/4"(38)
19 - 29	3/4"(19) - 1 1/2"(38)	1 1/2"(38)	1 1/2"(38)	1 1/2"(38) - 3"(76)
30 - 74	1 1/2"(38) - 3"(76)	3"(76)	1 1/2"(38) - 3"(76)	3"(76)
75 o más	1 1/2"(38) - 3"(76)	6"(152)	1 1/2"(38) - 3"(76)	3"(76) - 6"(152)

Fuente: Código ACI 211

Cuadro 2.10 Estimación del agua de mezclado

Requerimiento Aproximado de Agua de Mezclado para Diferentes Asentamientos y Tamaños Máximos de Agregado, con Partículas de Forma Redondeada y Textura Lisa, en Hormigón sin Aire Incluido									
Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm (pulg.)							
		9,51 3/8"	12,70 1/2"	19,00 3/4"	25,40 1"	38,10 1 1/2"	50,80 2"	64,00 2 1/2"	76,10 3"
mm	pulg.	Agua de mezclado, en Kg/m ³ de hormigón							
0	0	213	185	171	154	144	136	129	123
25	1	218	192	177	161	150	142	134	128
50	2	222	197	183	167	155	146	138	132
75	3	226	202	187	172	160	150	141	136
100	4	229	205	191	176	164	154	144	139
125	5	231	208	194	179	168	156	146	141
150	6	233	212	195	182	172	159	150	146
175	7	237	216	200	187	176	165	156	148
200	8	244	222	206	195	182	171	162	154

Fuente: Código ACI 211

Cuadro 2.11 Resistencia en función a la razón agua/cemento

Correspondencia entre la Resistencia a la Compresión a los 28 Días de Edad y la Relación Agua-Cemento para los Cementos Colombianos, Pórtland Tipo I, en Hormigones sin Aire Incluido			
Resistencia a la compresión Kg/cm ²	Relación agua-cemento en peso		
	Límite superior	Línea media	Límite inferior
140	-	0,72	0,65
175	-	0,65	0,58
210	0,7	0,58	0,53
245	0,64	0,53	0,49
280	0,59	0,48	0,45
315	0,54	0,44	0,42
350	0,49	0,40	0,38

Fuente; Norma ACI 211

Cálculo del contenido de cemento

La cantidad de cemento por unidad de volumen de concreto se obtiene de las determinaciones efectuadas en los cuadros 2.10 y 2.11.

El cemento requerido es igual al contenido estimado de agua de mezclado (Cuadro 2.10), dividido entre la relación “agua/cemento” (Cuadro 2.11). No obstante, si la especificación incluye por separado un límite mínimo de cemento, además de los requerimientos de resistencia y durabilidad, la mezcla debe basarse en aquel criterio que conduzca a la mayor cantidad de cemento.

$$C = A/(A/C)$$

Dónde:

C = Contenido de cemento en kg/m³.

A = Requerimiento de agua de mezclado en kg/m³.

A/C = Relación agua/cemento, por peso.

Estimación del contenido de agregado grueso

Los agregados similares en granulometría y en tamaño máximo producirán un concreto de trabajabilidad satisfactoria cuando se emplee un volumen determinado de agregado grueso y seco, compactado con varilla por volumen unitario de concreto.

Cuadro 2.12 Volumen del agregado seco y compactado

Volumen de agregado grueso, seco y compactado con varilla (a), por volumen de hormigón para diferentes módulos de finura de la arena (b)					
Tamaño máximo		Módulo de finura de la arena			
mm.	pulg.	2,40	2,60	2,80	3,00
9,5	3/8"	0,50	0,48	0,46	0,44
12,7	1/2"	0,59	0,57	0,55	0,53
19,0	3/4"	0,66	0,64	0,62	0,60
25,4	1"	0,71	0,69	0,67	0,65
38,1	1 1/2"	0,75	0,73	0,71	0,69
50,8	2"	0,78	0,76	0,74	0,72
76,1	3"	0,82	0,80	0,78	0,76
152,0	6"	0,87	0,85	0,83	0,81

Fuente: Norma ACI 211

Estimación del contenido de agregado fino

Si el peso del volumen unitario de concreto se presupone o puede estimarse por experiencia, el peso requerido de agregado fino es simplemente la diferencia entre el peso del concreto fresco y el peso total de los otros ingredientes. Por lo general, sobre la base de experiencias anteriores con materiales, se conoce el peso unitario del concreto con una precisión razonable, si no se cuenta con esta información se puede utilizar datos tabulados.

Cuadro 2.13: Peso seco y Volumen Absoluto

Peso Seco y Volumen Absoluto de los Ingredientes por Metro Cúbico de Hormigón			
Componente	Peso seco	Peso	Volumen
Cemento	P_c	G_c	V_c
Agua	P_a	1.0	V_a
Contenido de aire	-	-	A
Agregado grueso	P_{ag}	G_{ag}	V_{ag}
Agregado fino	P_{af}	G_{af}	V_{af}
TOTAL	P_u		1.000

Fuente: Código ACI 211

Ajustes a las mezclas de prueba

En la obra es común que por las condiciones de los agregados, la cantidad de agua calculada sea demasiado o, por lo contrario, sea poco. En tales casos debe realizarse una corrección en las proporciones calculadas en función al contenido de humedad que contenga tanto el material fino como grueso.

2.9. HORMIGÓN POROSO

2.9.1. Definición

Un estudio de investigación en concreto poroso realizado por la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa en Perú define al Hormigón poroso como una mezcla de agregado grueso, cemento, agua, y poco a ninguna arena. Es también conocido como el hormigón "sin finos" o poroso, esta mezcla crea una estructura de célula abierta, permitiendo al agua de lluvia infiltrarse al suelo subyacente. Simulando la superficie de tierra natural, el hormigón poroso es excelente para la evacuación de agua de lluvia.

2.9.2. Ventajas convenientes y desafíos del Hormigón poroso

Las ventajas de los pavimentos de Hormigón poroso sobre los pavimentos de concreto convencional según el comité ACI 522 son:

- Controla la contaminación que arrastra la corriente en las aguas de lluvias.
- Incrementa las instalaciones de parqueo, eliminando áreas para la retención de agua.
- Controla la escorrentía de aguas lluvias.
- Reduce el deslizamiento sobre la superficie de caminos y carreteras.
- Reduce el deslumbramiento sobre la superficie de rodadura en gran medida, particularmente cuando está mojado por la noche.
- Reduce la interacción del ruido entre la llanta y el pavimento.
- Elimina o reduce el tamaño de las alcantarillas.
- Permite que el aire y el agua lleguen a las raíces de los árboles, aun cuando el pavimento esté dentro de la línea de goteo.

El concreto permeable ha sido ampliamente utilizado en estacionamientos vehiculares, filtro de evacuación de agua, aceras, bases de pavimentos, calles y otras vías incluso de alto tráfico. La dosificación de los componentes del concreto permeable crea una estructura abierta que permite el paso libre del agua y el aire. Ciertos tipos de pavimento permeable permiten drenar desde 1.35 hasta 12.17 litros

por segundo por metro cuadrado (l/s/m²), que es mucho mayor a las lluvias más fuertes, lo cual genera una ventaja en la evacuación rápida del agua.

La resistencia mecánica y la durabilidad del concreto permeable utilizado en pavimentos son menores que los de otros materiales elaborados con concreto hidráulico convencionales, pero pueden llegar a valores similares con una buena dosificación de la mezcla. Existen experiencias de uso del material como capa de rodadura y material de base en varios países del mundo.

El concreto permeable no necesita tratamiento especial cuando es utilizado como capa de base en lugares donde no existe la posibilidad de colmatación por arrastre de finos.

Subbases impermeables, tales como arcilla deben tener una capa permeable al menos de 15 cm instalados entre ella y el pavimento para recolectar el agua y evacuarla lateralmente al sistema de drenaje previsto.

Entre los posibles inconvenientes y desafíos a superar están:

- Uso limitado para zonas de tráfico de vehículos pesados.
- Prácticas de construcción especializadas.
- Tiempo de curado extendido.
- Sensibilidad al contenido de agua y control del concreto fresco.
- Cuidado y atención especial en el diseño para algunos tipos de suelos como los expansivos y susceptibles a heladas, además los suelos con una muy baja permeabilidad.
- Falta de métodos de ensayo estandarizados.
- Atención especial que puede exigirse con la calidad del agua subterránea.
- Período de vida corto.
- Atención especial al diseño y construcción necesarios.
- No deberá utilizarse en zonas de protección de pozos o zonas de recarga de acuíferos para abastecimiento de agua; ya que la escorrentía puede afectar la

calidad del agua (dependerá del entorno y del uso. Por ejemplo, si filtrarán aceites o líquidos que perjudiquen los mantos acuíferos).

Una de las preocupaciones en el uso del material en capas de pavimentos cuando existen riesgos de colmatación por arrastre de finos es la necesidad de realizar el mantenimiento periódicamente en intervalos cortos de tiempo, si los niveles de materiales finos llegan a ocupar los vacíos; por lo que es necesario en la etapa de diseño del proyecto tener en cuenta los dispositivos necesarios para el mantenimiento. Lavar con agua a presión permite restablecer las condiciones de permeabilidad del pavimento.

También preocupa el hecho de que siendo el suelo quien capta el agua y que también sustenta toda la estructura, en condiciones de saturación puede darse la pérdida de carga de soporte. Este hecho está impulsando investigaciones alrededor del mundo en los lugares donde utilizan este sistema de pavimento.

2.9.3. Caracterización de los materiales componentes del Hormigón poroso

El concreto permeable, 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 capa 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 concreto convencional.

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

La granulometría utilizada resulta fundamental en las propiedades que tendrá el concreto permeable. Se debe utilizar agregados que presenten como mínimo dos caras fracturadas con ausencia casi total de finos, pues impermeabilizarían o sellarían la

mezcla; por lo que, es recomendable tener un tamaño de agregado bastante uniforme para obtener un porcentaje elevado de vacíos.

2.9.3.1. Agregados

Los agregados deberán cumplir con los requisitos de Norma ASTM C33-07 y ASTM D448-07. Los agregados que no cumplan con las especificaciones de las normas anteriormente señaladas, pero que hayan demostrado, mediante ensayos especiales o en uso, que producen concreto permeable con resistencia y permeabilidad adecuadas, pueden ser utilizados cuando así lo autorice el supervisor.

Los agregados se deben almacenar en depósitos o compartimentos adecuados y separados según el tamaño de agregado. Cada compartimento se debe diseñar para que la operación de descarga sea libre y eficiente, de tal manera que haya una mínima segregación. 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 proporcionamiento de las mezclas de concreto 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 del 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 graduación estrecha del agregado grueso debe ser dura y limpia, libres de

recubrimiento, tal como polvo o arcilla, o sustancia química absorbida que pueda ser perjudicial a la adherencia pasta/agregado o a la hidratación del cemento.

Estas dos características afectan la trabajabilidad del concreto fresco, pero también se logra una mezcla económica porque afecta a la cantidad de concreto que puede fabricarse con una cantidad determinada de cemento y agua.

Son preferibles las fuentes de agregados con un registro de servicio con rendimiento aceptable. En ausencia de ello, una combinación de ensayos puede llevarse a cabo para proporcionar una base para evaluar la idoneidad del agregado candidato para su incorporación en la mezcla de concreto permeable.

El peso unitario de los agregados deberá ser determinado de acuerdo a ASTM C29/C29M - 07. Para fuentes desconocidas y/o nuevas de agregados, los resultados de los ensayos se llevarán a cabo por la norma ASTM C33/C33M - 07 y ASTM D448 - 08, y deberá ser revisada con el aporte de la experiencia de un ingeniero en materiales.

2.9.3.1.1. Agregado grueso

La estructura interna de un concreto permeable puede describirse como un conjunto de partículas de agregado grueso, en contacto y unidas entre sí por puentes constituidos por la pasta (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 concreto. Esto se puede observar en la compresión de las probetas cilíndricas 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 uno graduado y mucho menos cuanto mayor sea el diámetro del agregado.

Ya que prácticamente existe contacto entre las partículas de agregado grueso, los esfuerzos mecánicos, se concentran, por lo que es 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.

Deberán evitarse agregados bien graduados, ya que reducen la porosidad, y pueden no proveer un adecuado contenido de vacíos. Se sugiere un límite máximo de agregado grueso que pase 15% de la malla N^o 4 (4.75 mm).

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 resultará 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

2.9.3.1.2. Agregado fino

El agregado fino si es utilizado, debe cumplir con la Norma ASTM C 33 – 08 de "Especificación Estándar para Agregados de Concreto" y no deberá exceder de 0.10 m³ por 1.0 m³ de concreto poroso.

Dependiendo del pasante del agregado grueso en la malla N^o 4 y como límite máximo del 15%, se podrá adicionar agregado fino según lo siguiente:

- Para un pasante del 5 al 10% de la malla N^o 4 (4.75 mm) agregar 74 kg/m³ de agregado fino.
- Para un pasante del 0 al 5% de la malla N^o 4 (4.75 mm) agregar 119 kg/m³ de agregado fino.

El conocer las características de los agregados a utilizar en la mezcla de concreto permeable, permitirá determinar la influencia que tendrán ya sea en estado fresco

como en estado endurecido, en el cuadro 2.14 nos indica cómo afecta la caracterización en dichos aspectos

Cuadro 2.14. Influencia de los Agregados en el Concreto Permeable en Estado Fresco y Endurecido

Características de los agregados	Aspectos influidos en el concreto	
	Concreto Fresco	Concreto Endurecido
Granulometría	Manejabilidad Requerimiento de agua	Resistencia mecánica Economía
Limpieza (materia orgánica , limo, arcilla y otros finos indeseables)	Requerimiento de agua.	Durabilidad Resistencia mecánica
Densidad (Gravedad específica)	Peso Unitario	Peso Unitario
Absorción de Partículas	Perdida de agua en la mezcla	Resistencia mecánica Permeabilidad
Forma de Partículas	Trabajabilidad Requerimiento de agua	Resistencia mecánica Economía
Textura Superficial	Trabajabilidad Requerimiento de agua	Resistencia mecánica Resistencia al desgaste Economía
Tamaño Máximo	Segregación Peso Unitario Requerimiento de agua	Resistencia mecánica Peso Unitario Permeabilidad Economía
Resistencia a la Abrasión	Ninguno	Resistencia a la Abrasión Durabilidad
Coefficiente de Expansión Térmica	Ninguno	Propiedades térmicas
Fuente: Normas ASTM C33-07, ASTM C 1688-09, ASTM C 131-07, ASTM C29-07		

2.9.3.2. Relación ponderal entre el agregado fino y el agregado grueso (F/G)

El parámetro (F/G) tiene una gran influencia en el comportamiento del concreto permeable, está íntimamente relacionado con el tamaño máximo del agregado grueso, de manera que, a mayor tamaño del agregado grueso, y más uniforme, la relación

(F/G) deber ser menor. En el trabajo de graduación bajo el título “Resistencia Mecánica y Condiciones de Obra del Concreto Poroso en los Pavimentos Según el Tipo de Granulometría” llevada a cabo por estudiantes de la Universidad de Medellín, Colombia; este valor parece indicar que el valor (F/G) debe oscilar entre 0.05 y 0.30.

Una relación inferior a 0.05 impide la formación de puentes suficientemente resistentes con dotaciones de cemento y, por otro lado, desampara excesivamente el conglomerante frente a ataques químicos de sustancias transportadoras por el agua o del agua pura misma.

Valores elevados de F/G producen efectos en función de la relación agua/cemento; en estado fresco, si se trabaja con valores altos de agua/cemento y mayor fluidez del mortero, este escurre hacia las zonas inferiores del concreto, colmatando y cementando la masa de dichas zonas, de esta forma, disminuye la permeabilidad del conjunto y reduce los puentes entre los agregados.

2.9.3.3. Cemento

Cemento Portland conforme a las Normas ASTM C 150, C 595 o C 1157 se utiliza como el aglutinante principal.

El almacenamiento debe garantizar que el cemento no pierda sus características físicas y químicas establecidas en las normas mencionadas, y se debe tener control sobre las emisiones de polvo. En el caso de que se almacenen varios tipos de cemento, estos se deben almacenar por separado.

Una mayor dosis de cemento generará un concreto más resistente, pero demasiado cemento disminuirá el porcentaje de vacíos interconectados en el concreto, perdiendo este su capacidad de infiltración. Es recomendable usar una dosis que fluctúe entre los 300 Kg/m³ y los 400 Kg/m³, según requisitos de resistencia y permeabilidad.

2.9.3.4. 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) porque una cantidad de agua en exceso producirá que la pasta fluya y selle el sistema de poros. La adición de agua, por lo tanto, deberá ser monitoreada en el campo. Información adicional de la calidad del agua se encuentra en el comité ACI 301. Agua reciclada de las operaciones de concreto puede ser utilizada pero solamente si cumple las disposiciones de ASTM C94/94M – 07 o AASHTO M-157.

La dosis de agua utilizada para el hormigón poroso tiene una gran repercusión en las propiedades de la mezcla. Una cantidad insuficiente de agua resultará en una mezcla sin consistencia y con una baja resistencia. Una cantidad excesiva de agua, generará una pasta que sellará los vacíos de la mezcla y que, además, lavará el cemento desde la superficie del agregado, produciendo una baja resistencia al desgaste superficial.

2.9.3.5. Aditivos

Los aditivos deben ser certificados por la casa productora del aditivo. Los aditivos químicos reductores de agua, retardantes y acelerantes deben cumplir las especificaciones de la Norma ASTM C 494 – 08; los aditivos incorporadores de aire, la Norma ASTM C 260 – 08 y, los superfluidificantes, la Norma ASTM C 1017 - 08.

Acelerantes pueden ser utilizados cuando el concreto permeable es colocado en climas fríos. Estudios reportan que el uso de estabilizadores de hidratación es una ayuda en el tiempo de trabajo de la mezcla y en los modificadores de viscosidad para mejorar la trabajabilidad; estas ventajas también han sido observadas durante la producción actual y en la colocación en proyectos. Con el uso de múltiples aditivos en cualquier mezcla, es recomendable llevar a cabo la colocación de bachadas de prueba para identificar cualquier problema de incompatibilidad de aditivos y verificar que las propiedades en estado fresco y endurecido son sistemáticamente alcanzables.

En algunas circunstancias las dosis requeridas de incorporadores de aire, acelerantes y de aditivos retardantes pueden variar. Por consiguiente, se debe permitir un rango de dosificaciones con el fin de obtener los efectos deseados. Antes de la utilización de cualquier aditivo, se debe verificar mediante ensayos la compatibilidad de éstos, con el tipo y calidad del cemento.

Se pueden utilizar estabilizadores de hidratación su uso es recomendado en el diseño y producción de concreto permeable. La función primaria del material debería ser como estabilizador de la hidratación, debido a que demora la hidratación del cemento, formando una barrera protectora alrededor de las partículas de cemento. También debe cumplir con los requisitos de ASTM C 494 – 08 Tipo B Retardantes o Tipo D Reductor de agua/retardante.

Cuando se genera en el ambiente mucho viento, y hay condiciones de ambiente seco se crean altas tasas de evaporación que reduce la ventana de tiempo para que la mezcla sea colocada más eficientemente. Por ello, el uso de retardantes de evaporación puede ser útil en este sentido.

Aditivos colorantes también son incluidos en algunas mezclas, esto con un fin meramente decorativo, ya que no aporta alguna propiedad mecánica ni tampoco aporta a las características hidráulicas del concreto permeable. Los colorantes deben tener un alto poder de coloración, gran facilidad para mezclarse con el cemento, insolubles con el agua, que sean estables a la luz y el ambiente; además a los ambientes agresivos y que no alteren el proceso de fraguado del concreto, ASTM C 979-10. El uso de pigmentos produce como resultado un concreto con el color integrado, de larga duración y gran belleza, mejora las características de terminado del concreto, vitalidad y excelente precisión en el color.

2.9.4. Propiedades

Las propiedades del Hormigón poroso señalados por Carlos Aire del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto son las siguientes:

Propiedades en estado fresco

- **Revenimiento:** En general es cero, sin embargo, se usan valores en el rango de 20 a 50 mm. La prueba de revenimiento no es una prueba que se considera para fines de control de calidad, como 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.

- **Peso unitario:** El peso unitario del concreto permeable es del orden del 70% del concreto convencional.
- **Tiempo de fraguado:** El tiempo de fraguado se reduce en el concreto permeable, por lo que en algunos casos se debe usar aditivos químicos para permitir la adecuada colocación.

Propiedades en estado endurecido

- **Porosidad:** La porosidad es una medida de los espacios vacíos entre los agregados. La condición para que un concreto sea permeable es que el contenido de vacíos sea mayor al 15%.
- **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. Una excesiva compactación reducirá la permeabilidad al sellar los poros necesarios para la filtración del agua.

Propiedades mecánicas

- **Resistencia a la compresión:** La resistencia a la compresión típica es del orden de 7 MPa, sin embargo, se pueden desarrollar resistencias hasta de 28 MPa. La resistencia a la compresión está influenciada por los materiales componentes, el esfuerzo de compactación y por el contenido de vacíos.
- **Resistencia a la flexión:** La resistencia a la flexión varía entre 1 y 3.8 MPa. Su determinación puede estar sujeta a una importante variabilidad, por lo que es común medir la resistencia a la compresión y usar relaciones empíricas para estimar su valor.
- **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, colocarlas más espaciadas.

Cuadro 2.15. Propiedades típicas del concreto poroso

PROPIEDAD	RANGO
Revenimiento ,mm	20
Peso unitario, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	1600 - 2000
Tiempo de fraguado, hora	1
Porosidad, % (en volumen)	15 – 25
Permeabilidad, $\frac{\text{lt}}{\text{m}^2 \text{ min}}$	120-320
Resistencia a compresión MPa	7-28
Resistencia a flexión, MPa	1 - 3.8
Contracción	$200 \cdot 10^{-4}$
Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto	
Autor :Carlos Aire	

2.9.5. Dosificación de Hormigón poroso

El procedimiento de diseño del concreto permeable difiere mucho con relación al concreto convencional, ya que éste se basa en la relación agua/cemento o la resistencia del concreto ya sea compresión o tensión; en cambio en el concreto poroso lo más importante es el porcentaje de vacíos y el volumen de pasta, puesto que el porcentaje de vacíos determinará la velocidad de infiltración, en consecuencia la permeabilidad del concreto poroso, por otro lado, el volumen de pasta asegura la adherencia entre las partículas del agregado grueso.

En el apéndice 6 del comité ACI 211.3, se proporciona un método para la dosificación de concreto permeable sin revenimiento, que se utiliza para pavimentos y otras aplicaciones donde el drenaje y la percolación son necesarios.

2.9.5.1. Materiales

Las graduaciones más comunes de agregado grueso utilizadas en el concreto permeable reúnen los requerimientos de la Norma ASTM C 33 los tamaños de malla de 9.5 a 2.36 mm (Tamaño N° 8), 12.5 a 4.75 mm (Tamaño N° 7), y 19.0 a 4.75 mm (Tamaño N° 67).

El agregado fino se incorpora para aumentar la resistencia a compresión y reducir la percolación a través del concreto.

2.9.5.2. Relación agua/material cementante

La relación Agua/Material Cementante es una importante consideración para mantener la resistencia y la estructura de vacíos del concreto. Una alta relación Agua/Material Cementante reduce la adhesión de la pasta al agregado, y causa que la pasta fluya y llene los vacíos, aun cuando la compactación sea de menor intensidad. Una baja relación Agua/ Material Cementante tiende a causar bolas en el mezclador y evita una distribución uniforme. La experiencia muestra que un rango de 0.35 a 0.45 provee el mejor recubrimiento del agregado y estabilidad en la pasta.

2.9.5.3. Porcentaje de vacíos

Para asegurar que el agua filtrará a través del concreto poroso, el porcentaje de vacíos, calculados como porcentaje de aire por el método gravimétrico (ASTM C 138), debe ser 15% o mayor como se muestra en la gráfica 2.8. A este contenido de vacíos, la resistencia a la compresión del concreto según se muestra en la gráfica 2.9, sería aproximadamente de 24 MPa (3500 psi) a los 28 días. A mayor porcentaje de vacíos, mayor tasa de percolación, pero menor resistencia a la compresión. A menor porcentaje de vacíos, menor tasa de percolación, pero mayor resistencia a la compresión.

Además, la resistencia a la compresión aumenta conforme disminuye el tamaño máximo nominal del agregado.

2.9.5.4. Cantidad de agregado grueso

Los ensayos sobre la densidad seca varillada realizado por la National Aggregates Association – National Ready Mixed Concrete Association (NAANRMCA) muestran que la densidad seca varillada del agregado grueso, determinado por la Norma ASTM C 29/29M-07, puede ser usada efectivamente en la proporción del concreto permeable, donde:

- b/b_o = Volumen seco varillado del agregado grueso en una unidad de volumen de concreto.
- b = Volumen real del agregado grueso en una unidad de volumen de concreto.
- b_o = Volumen real del agregado grueso en una unidad de volumen de agregado grueso.

El valor b/b_o compensa automáticamente los efectos de diferentes formas de partículas de agregado grueso, clasificación (graduación) y gravedad específica. Por otra parte, los valores de b/b_o para una gama de agregados de tamaño máximo nominal normalmente se utilizan en concreto permeable, de 10 a 20 mm (3/8 a 3/4 pulgadas) y son muy similares.

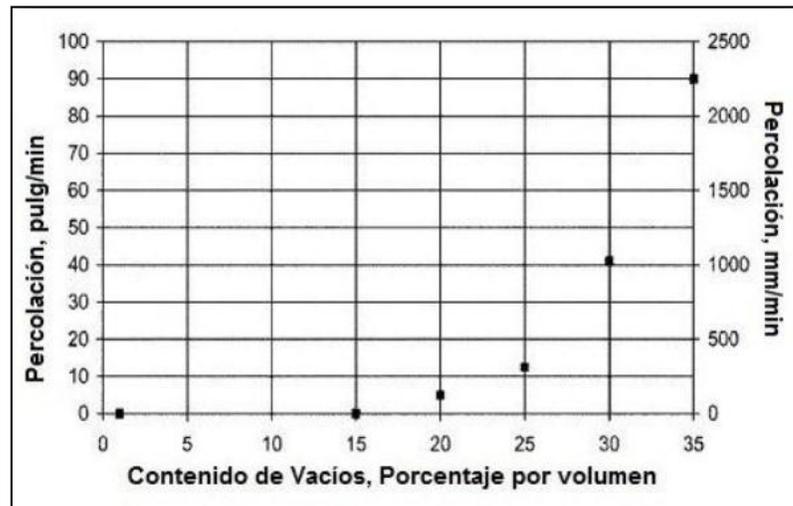
El cuadro 2.16 expone los valores de b/b_o para agregados gruesos de tamaño N° 8 y N° 67 y para contenidos de agregado fino de 0, 10, y 20% del total de agregado.

Cuadro 2.16. Valores Efectivos de b/b_o

Porcentaje de Agregado Fino	b / b_o	
	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

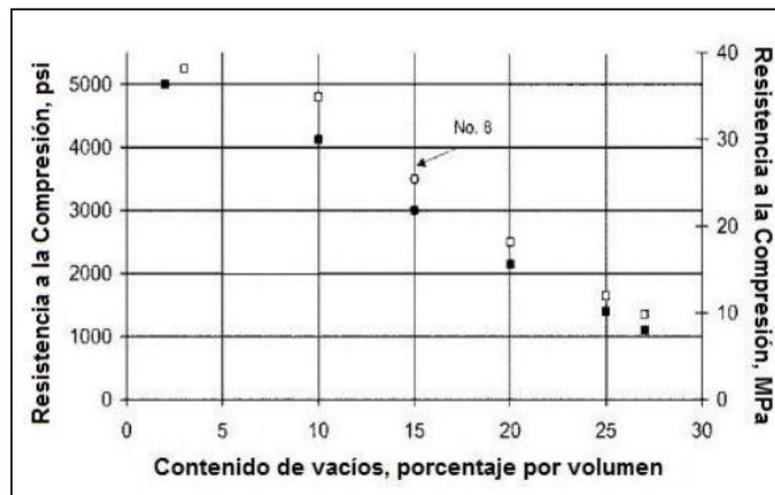
Fuente: Comité ACI 211.3. Apéndice 6

Gráfica 2.8. Contenido de vacíos mínimo para la percolación basada en pruebas y métodos de ensayos de NAA-NRMCA (National Aggegates Association – National Ready Mixed Concrete Association)



Fuente: Comité ACI 211.3. Apéndice 6

Gráfica 2.9. Relación entre el contenido de vacíos y resistencia a la compresión a los 28 días para agregados de tamaño N° 67 y N° 8 de la Norma ASTM C3



Fuente: Comité ACI 211.3. Apéndice 6

2.9.5.5. Procedimiento de Dosificación

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, como se muestra en la Gráfica 2.10. La cantidad de agregado depende de la densidad seca varillada y los valores b/bo seleccionados del cuadro 2.16.

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:

Volumen de Pasta (VP) = Volumen de Cemento + Volumen de Agua en m³, o

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

Donde **C** es la masa de cemento y **W** es la masa de agua. Si la relación Agua/Cemento es

(W/C), entonces:

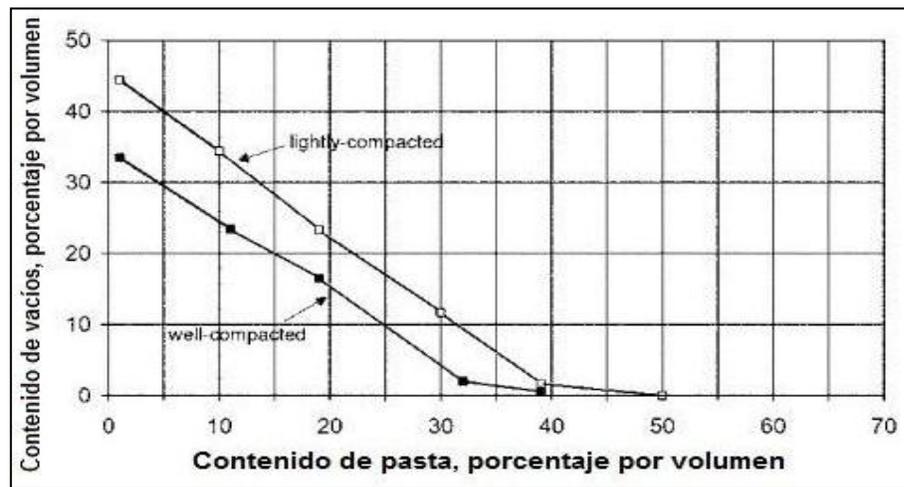
$$W = \left(\frac{W}{C}\right) * C$$

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.

Gráfica 2.10. 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 dosificación de la mezcla calculada debe ser revisada en el laboratorio por bachadas de prueba y ajustes según sea necesario.

Además, se recomienda que las bachadas de prueba incluyan dos mezclas adicionales con 30 kg/m³ más y 30 kg/m³ 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.

2.10. APLICACIÓN PRÁCTICA

El hormigón poroso se aplica en una capa adicional definitiva de rodadura en un pavimento rígido de hormigón convencional para disminuir los problemas generados con las aguas superficiales en los pavimentos en zonas que presenten precipitaciones elevadas.

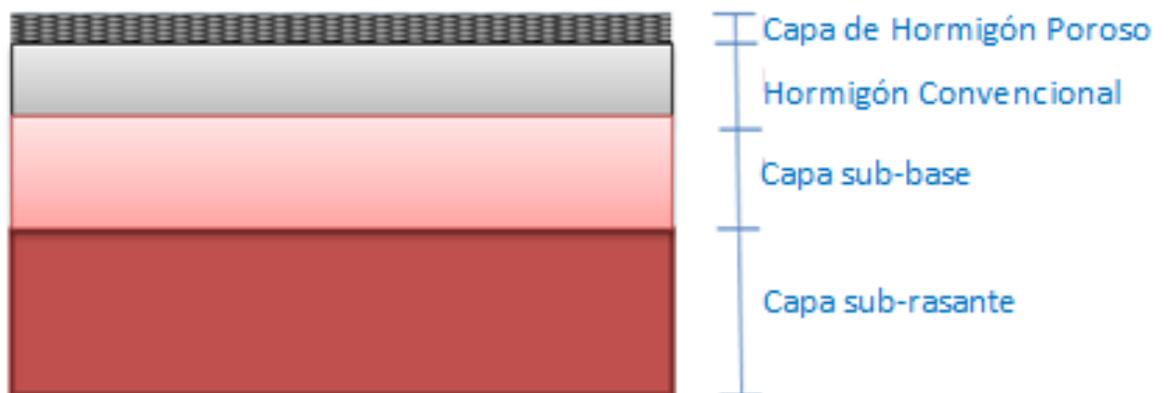
Gráfica 2.11. Ejemplo de aplicación del hormigón poroso



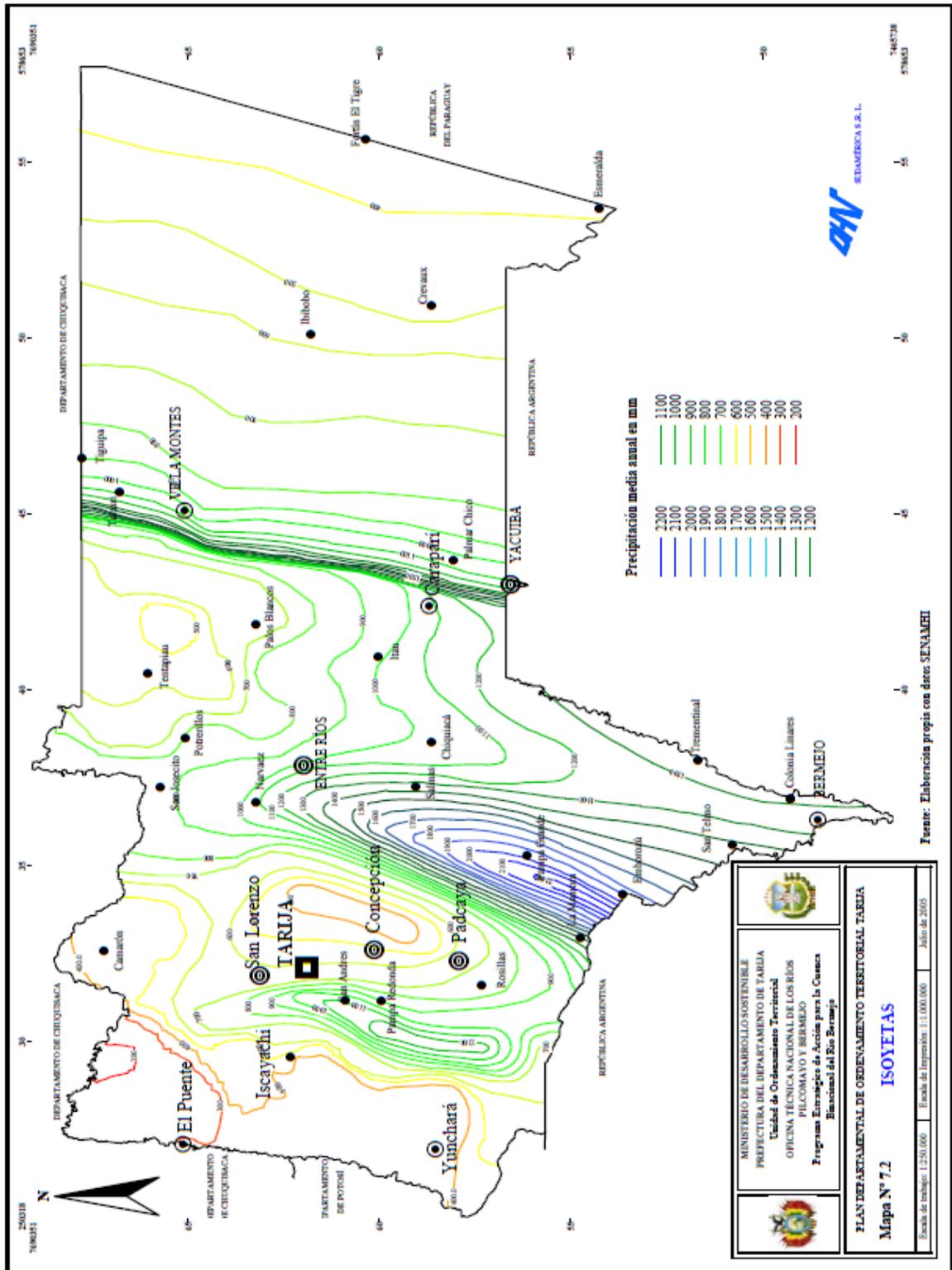
Fuente: TRAMO EXPERIMENTAL TEMUCO – CHOL CHOL (CHILE)

Gráfica 2.12 Paquete estructural del hormigón poroso en un pavimento rígido

PAQUETE ESTRUCTURAL



Gráfica 2.13 mapa de Tarija con isoyetas



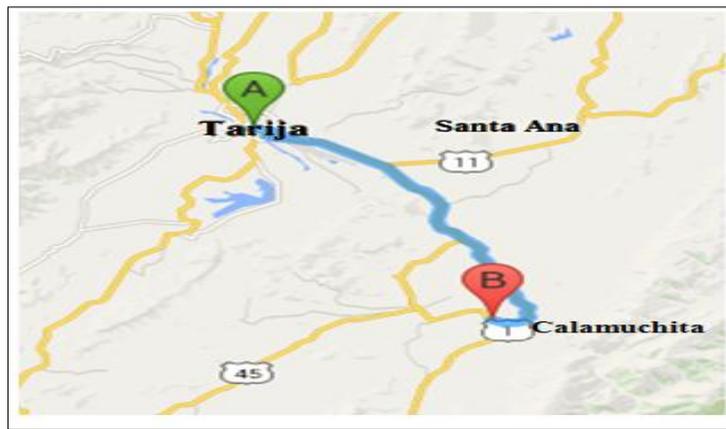
CAPÍTULO III

**DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
SOBRE EL PAVIMENTO DEL HORMIGÓN
POROSO**

3.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

El área de estudio es la cuenca del Río Camacho, está ubicada en el departamento de Tarija, al sur de Bolivia y cubre una superficie aproximada de 950 km², la parte baja y media de la cuenca corresponde a la sección municipal de Uriondo, mientras que la parte alta corresponde a Padcaya, dentro de las provincias Avilés y Arce respectivamente, Se encuentra a una altitud de 1,714 metros sobre el nivel del mar.

Gráfica 3.1 Ubicación del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

3.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

Se trata de materiales de la orillas del río, por lo tanto los áridos son de canto rodado

3.3. MUESTREO DE MATERIALES PARA LA INVESTIGACIÓN

3.3.1. Muestreo de grava y arena

El muestreo se realizó mediante una clasificadora de áridos que está ubicada a orillas del río Camacho en la comunidad de Calamuchita, perteneciente a una empresa que está efectuando obras civiles en la provincia Uriondo. De la cual logramos conseguir una cantidad representativa de material para realizar la investigación.

Gráfica 3.2 Muestreo de los materiales pétreos



Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Muestreo del cemento.

El cemento a utilizar es “EL PUENTE” Tipo IP30 es conseguido de las agencias situadas en nuestra ciudad

3.4. PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS PARA EL HORMIGÓN CONVENCIONAL

3.4.1. Granulometría de la grava

La granulometría de la grava se realizó utilizando los tamices especificados por la norma ASTM.

Gráfica 3.3 Juego de tamices



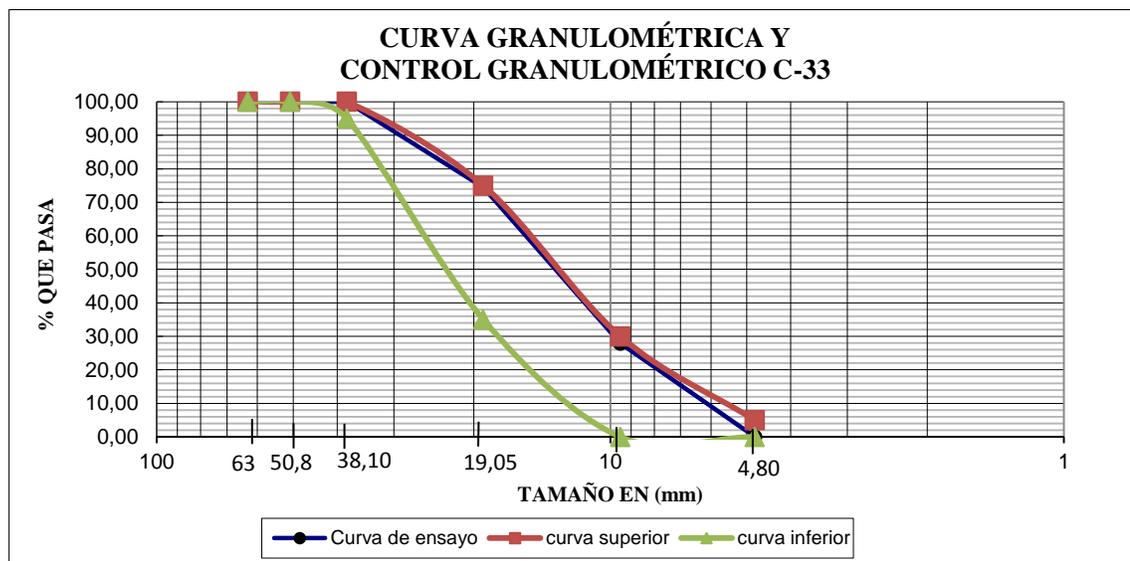
Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.1. Granulometría de la grava

Tamiz	Peso retenido (gr)	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
1 1/2"	0	0,00	0,00	100,00
1"	725	7,25	7,25	92,8
3/4"	1830	18,3	25,55	74,5
1/2"	2175	21,75	47,3	52,7
3/8"	2475	24,75	72,05	28,0
N° 4	2795	27,95	100,00	0,00
Total	10000			

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.2. Curva granulométrica de la grava



Fuente: Elaboración propia

La granulometría de la grava cumple con los parámetros especificados por la norma ASTM C-33. (Ver anexos)

3.4.1.1. Tamaño máximo de la grava.

$$TM = 11/2''$$

3.4.1.2. Tamaño máximo nominal de la grava.

$$TMN = 1''$$

3.4.1.3. Módulo de finura de la grava.

El módulo de finura se encuentra dentro del rango especificado por la norma ACI. (5.5 – 8.5)

$$MF = \frac{(\%) \text{Ret.Acum}(1\frac{1}{2} + 3/4 + 3/8 + N^{\circ}4 + 500)}{100}$$

$$MF = 6.98$$

3.4.2. Peso unitario de la grava

3.4.2.1. Método de golpeado

Se realizó en un molde 14 lt de volumen y se apisono en 3 capas, cada con 25 golpes con la varilla tal como especifican las normas ASTM

Gráfica 3.4. Molde cilíndrico de 14 lt



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.3. Peso unitario de la grava (golpeado)

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	5660,00	10000,00	22980,00	17320,00	1,732
2	5660,00	10000,00	22990,00	17330,00	1,733
3	5660,00	10000,00	22960,00	17300,00	1,730
PROMEDIO					1,732

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.2. Método de traspaleo

Se efectuó en un molde de 9,6 lt de volumen y se apisonó en 3 capas, cada una con 25 golpes con la varilla tal como determinan las normas ASTM.

Cuadro 3.4. Peso unitario de la grava (traspaleo)

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm ³)
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
PROMEDIO					1,628

Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Peso específico y absorción de la grava

El mencionado ensayo de laboratorio se efectuó siguiendo el procedimiento estipulado por la Norma ASTM.

Gráfica 3.5. Equipo para peso específico grava



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.5. Peso Específico de la grava

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABSORCIÓN
1	5420,00	5479,00	3455,00	2,68	2,71	2,76	1,09
2	5410,00	5473,00	3420,00	2,64	2,67	2,72	1,16
3	5430,00	5488,00	3432,00	2,64	2,67	2,72	1,07
PROMEDIO				2,66	2,69	2,74	1,13

Fuente: Elaboración propia

El peso específico aparente está dentro del rango especificado por la norma ACI. (2.1-2.9gr/cm³)

$$P. E. A = 2.74 \text{ gr/cm}^3$$

La absorción de la grava está dentro del rango especificado por la norma ACI. (0.2 - 4 %)

$$\text{Absorción (\%)} = 1.13$$

3.4.4. Desgaste de los Ángeles

El Desgaste se realiza previamente lavando el material con el apoyo del ensayo de granulometría, con el fin de identificar cuál se asemeja más en el tipo de método según la norma para Pavimento Rígido.

Conociendo el método que corresponde a nuestro material, se podrá determinar el número de ciclos de la máquina de los Ángeles y el número de esferas a usar para realizar el desgaste al material.

Cuadro 3.6 Método de Desgaste en función a la Granulometría de la Grava

METODO		A	B	C	D
DIAMETRO		CANTIDAD DE MATERIAL A EMPLEAR (gr)			
PASA	RETENIDO				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
PESO TOTAL		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
NUMERO DE ESFERAS		12	11	8	6
N°DE REVOLUCIONES		500	500	500	500
TIEMPO DE ROTACION		30	15	15	15

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.6 Máquina del Desgaste los Ángeles



Fuente: Elaboración Propia

$$\% \text{ DESGASTE} = \frac{P_{INICIAL} - P_{FINAL}}{P_{INICIAL}}$$

Cuadro 3.7 Planilla de Resultado del Desgaste

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACION ASTM
A	5000	5000	0,00	35% MAX
B	5000	4255	14,90	35% MAX
C	5000	5000	0,00	35% MAX
D	5000	5000	0,00	35% MAX

Fuente: Elaboración Propia

La grava cumple con la especificación de desgaste del material, actividad que consistió en introducir a la máquina de los Ángeles el material, se lo zarandó por el tamiz 12, de esta forma, el material de desgaste es aquel que no debe pasar el 35% del total del material.

3.4.5. Granulometría de la arena

Gráfica 3.7: Granulometría agregado Fino



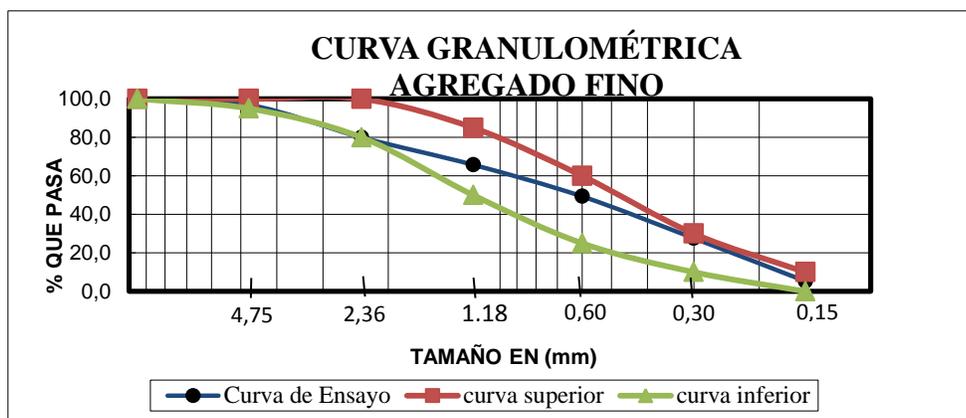
Fuente: Elaboración Propia

Cuadro 3.8. Granulometría de la arena

Tamiz	Peso retenido (gr)	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
N° 4	30,90	3,09	3,09	96,9
N° 8	169,30	16,93	20,02	80,0
N° 16	142,20	14,22	34,24	65,8
N° 30	164,20	16,42	50,66	49,3
N° 50	217,30	21,73	72,39	27,6
N° 100	223,30	22,33	94,72	5,3
Lo que Pasa	52,8	5,28	100,00	0,00
Total	1000			

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.9. Curva granulométrica de la arena



Fuente: Elaboración propia

La granulometría de la arena cumple con los parámetros especificados por la norma ASTM C-33.

3.4.5.1. Módulo de finura de la arena

Según la norma ACI se trata de una arena gruesa.

$$MF = \frac{(\%) \text{Ret. Acum} (3/8 + N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + N^{\circ}30 + N^{\circ}50 + N^{\circ}100)}{100}$$

$$MF = 2.75$$

3.4.6. Peso unitario de la arena

3.4.6.1. Método de golpeado

Se realizó en un molde 3 lts de volumen y se apisono en 3 capas, cada con 25 golpes con la varilla tal como especifican las normas ASTM.

Gráfica 3.8 Molde cilíndrico de 3 lt



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.10. Peso unitario de la arena (golpeado)

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	2605,00	3000,00	8151,50	5546,50	1,849
2	2605,00	3000,00	8162,30	5557,30	1,852
3	2605,00	3000,00	8148,70	5543,70	1,848
PROMEDIO					1,850

Fuente: Elaboración propia

3.4.6.2. Método de traspaleo

Se realizó dejando caer la arena desde una altura de 5cm por encima del molde.

Cuadro 3.11. Peso unitario de la arena (traspaleo)

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	2605,00	3000,00	7911,70	5306,70	1,769
2	2605,00	3000,00	7805,40	5200,40	1,733
3	2605,00	3000,00	7777,40	5172,40	1,724
PROMEDIO					1,742

Fuente: Elaboración propia

3.4.7. Peso específico y absorción de la arena

Para este procedimiento, se siguió lo especificado por las normas ASTM.

Gráfica 3.9 Matraz graduado para peso específico aparente de la arena



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.12. Peso Específico de la arena

MUESTRA N°	PESO MUESTRA (gr)	PESO DE MATRÁZ (gr)	MUESTRA + MATRAZ + AGUA (gr)	PESO DEL AGUA AGREGADO AL MATRÁZ "W" (ml) ó (gr)	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	VOLUMEN DEL MATRÁZ "V" (ml)	P. E. A GRANEL (gr/cm3)	P. E. SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm3)	P. E. APARENTE (gr/cm3)	% DE ABSORCIÓN
1	500	216,7	997,7	281,00	492,10	500,00	2,25	2,28	2,33	1,58
1	500	216,7	1000,3	283,60	492,00	500,00	2,27	2,31	2,36	1,60
1	500	216,7	999,5	282,80	492,50	500,00	2,27	2,30	2,35	1,50
PROMEDIO							2,26	2,30	2,35	1,56

Fuente: Elaboración propia

El peso específico aparente está dentro del rango especificado por la norma ACI.
(2.2-2.7gr/cm³)

$$P. E. A = 2,35 \text{ gr/cm}^3$$

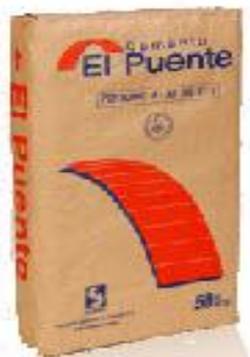
La absorción de la arena está dentro del rango especificado por la norma ACI. (0.2 - 2
%)

$$\text{Absorción (\%)} = 1,56$$

3.4.8. Peso específico del cemento

Para la obtención del peso, se empleó métodos estandarizados en laboratorio de suelos y hormigones de la carrera de ingeniería civil.

Gráfica 3.10. Cemento EL PUENTE IP-30



Fuente: Elaboración propia

PE = Peso Específico de la Muestra (gr/cm³)

V = Volumen desplazado (cm³)

P= Peso de la muestra (gr)

Cuadro 3.13. Peso Específico del Cemento

DESCRIPCIÓN	P (gr/cm ³)	Vi (cm ³)	Vf (cm ³)	V (cm ³)	PE (gr/cm ³)	PE- MEDIA (gr/cm ³)
CEMENTO EL PUENTE	64,00	0,00	20,4	20,40	3,14	3,15
		0,20	20,5	20,30	3,15	
		0,50	20,7	20,20	3,17	

Fuente: Elaboración propia

El peso específico del cemento está dentro del rango especificado por la norma ACI.
(3-3.15 gr/cm³)

$$P. E. C = 3.15\text{gr/cm}^3$$

3.5. PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS PARA EL HORMIGÓN POROSO

3.5.1. Granulometría de la grava

Para determinar la granulometría de la grava se utilizó los tamices especificados por la norma ASTM.

Gráfica 3.11 Juego de tamices hormigón poroso



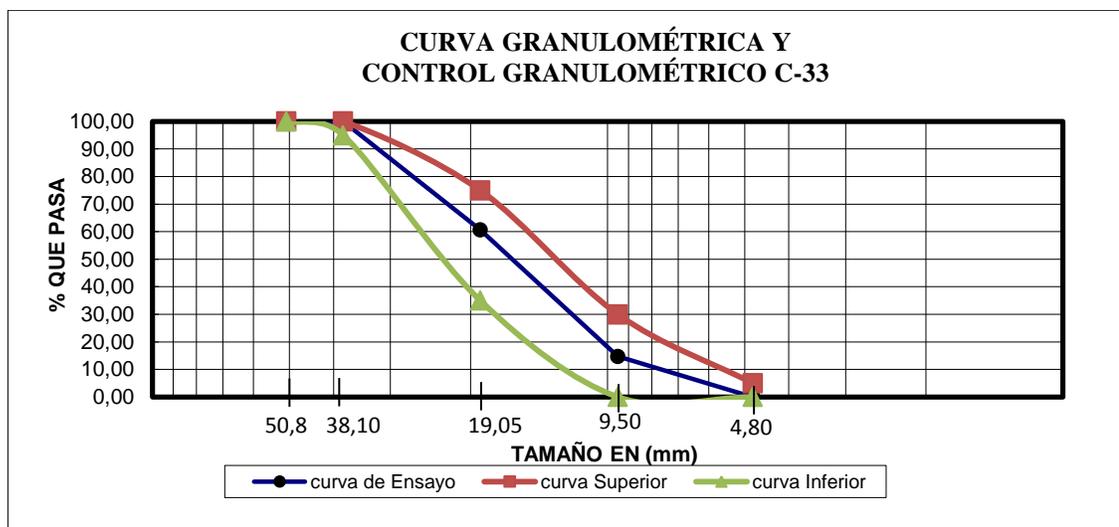
Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.14. Granulometría de la grava para hormigón poroso

Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Retenido Acumulado		% Que pasa del total
			(gr)	(%)	
2	50,8	0,00	0,00	0,00	100,0
1 1/2	38,10	0,00	0,00	0,00	100,0
1	25,40	0,00	0,00	0,00	100,0
3/4	19,05	3930,00	3930,00	39,30	60,7
1/2	12,50	2120,00	6050,00	60,50	39,5
3/8	9,50	2475,00	8525,00	85,25	14,8
N°4	4,80	1475,00	10000,00	100,00	0,0
BASE	0	0,00	10000,00	100,00	0,0

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.15. Curva granulométrica de la grava para hormigón poroso



Fuente: Elaboración propia

La granulometría de la grava cumple con los parámetros especificados por la norma ASTM C-33. (Ver anexos)

3.5.1.1. Tamaño máximo de la grava

$$TM = 1''$$

3.5.1.2 Tamaño máximo nominal de la grava

$$TMN = 3/4'' = N^{\circ}67 \quad (4.75-19)$$

3.5.1.3. Módulo de finura de la grava

El módulo de finura se encuentra dentro del rango especificado por la norma ACI. (5.5 – 8.5)

$$MF = \frac{(\%) \text{Ret. Acum} (1\frac{1}{2} + 3/4 + 3/8 + N^{\circ}4 + 500)}{100}$$

$$MF = 7.25$$

3.5.2. Peso unitario de la grava

3.5.2.1. Método de golpeado

Se realizó en un molde 14 lt de volumen y se apisono en 3 capas, cada con 25 golpes con la varilla tal como especifican las normas ASTM.

Gráfica 3.12 Molde cilíndrico de 14 lt



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.16. Peso unitario de la grava para hormigón poroso (golpeado)

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA COMPACTADA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
1	5660,00	10000,00	23120,00	17460,00	1,746
2	5660,00	10000,00	23125,00	17465,00	1,747
3	5660,00	10000,00	23108,00	17448,00	1,745
PROMEDIO					1,746

Fuente: Elaboración propia

3.5.2.2. Método de traspaleo

Para efectuar este método, se dejó caer la grava desde una altura de 5cm por encima del molde.

Cuadro 3.17. Peso unitario de la grava para hormigón poroso (traspaleo)

MUESTRA N°	PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm ³)	PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr)	PESO MUESTRA SUELTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm ³)
1	5660,00	10000,00	21890,00	16230,00	1,623
2	5660,00	10000,00	22007,00	16347,00	1,635
3	5660,00	10000,00	22190,00	16530,00	1,653
PROMEDIO					1,637

Fuente: Elaboración propia

3.5.3. Peso específico y absorción de la grava

Se lo realizó como se explica en la normas ASTM.

Gráfica 3.13. Equipo para peso específico grava para hormigón poroso



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.18. Peso Específico de la grava para hormigón poroso

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABSORCIÓN
1	5520,00	5579,00	3545,00	2,71	2,74	2,79	1,07
2	5510,00	5573,00	3526,00	2,69	2,72	2,78	1,14
3	5530,00	5588,00	3532,00	2,69	2,72	2,77	1,05
PROMEDIO				2,70	2,73	2,79	1,11

Fuente: Elaboración propia

El peso específico saturado con superficie seca está dentro del rango especificado por la norma ACI. (2.1-2.9gr/cm³)

La absorción de la grava está dentro del rango especificado por la norma ACI. (0.2 - 4 %)

$$\text{Absorcion (\%)} = 1.11$$

3.6. DOSIFICACIÓN ACI-211.1

La dosificación se diseñó para una resistencia de un hormigón H-21 y un asentamiento ideal para el vaciado de pavimentos de 5-10cm. de revenimiento. Mediante la dosificación ACI 211.

- **Hormigón convencional**

Cuadro 3.19: Dosificación Hormigón convencional

DOSIFICACION HORMIGÓN CONVENCIONAL				
DISEÑO EN ESTADO SECO			DISEÑO EN ESTADO HUMEDO	
Material	Unidad	Cantidad	Unidad	Cantidad
Agua	Kg/m ³	160,80	Kg/m ³	154,19
Cemento	Kg/m ³	349,57	Kg/m ³	349,57
Grava	Kg/m ³	1238,38	Kg/m ³	1257,95
Arena	Kg/m ³	649,22	Kg/m ³	660,39

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.20. Proporciones de Mezcla hormigón convencional

Cemento	Arena	Grava
1,0	1,9	3,5

	SECO	HUMEDO	SECO	HUMEDO
	(Kg) para 6 probetas	(Kg) para 6 probetas	(Kg) para 2 vigas	(Kg) para 2 vigas
CEMENTO	13,3	13,3	10,0	10,0
AGUA	6,1	5,9	4,6	4,4
GRAVA	47,2	48,0	35,4	36,0
ARENA	24,8	25,2	18,6	18,9

Fuente: Elaboración propia

- **Hormigón poroso**

Cuadro 3.21: Dosificación Hormigón poroso con 15% de vacíos

DOSIFICACION HORMIGON POROSO 15% VACIOS		
DISEÑO EN ESTADO HUMEDO		
Material	Unidad	Cantidad
Agua	Kg/m ³	111,6
Cemento	Kg/m ³	310,0
Grava	Kg/m ³	1747,7
Arena	Kg/m ³	----

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.22: Dosificación Hormigón poroso con 20% de vacíos

DOSIFICACION HORMIGON POROSO 20% VACIOS		
DISEÑO EN ESTADO HUMEDO		
Material	Unidad	Cantidad
Agua	Kg/m ³	85,0
Cemento	Kg/m ³	236,2
Grava	Kg/m ³	1747,7
Arena	Kg/m ³	----

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.23: Dosificación Hormigón poroso con 25% de vacíos

DOSIFICACION HORMIGON POROSO 25% VACIOS		
DISEÑO EN ESTADO HUMEDO		
Material	Unidad	Cantidad
Agua	Kg/m ³	58,5
Cemento	Kg/m ³	162,4
Grava	Kg/m ³	1747,7
Arena	Kg/m ³	----

Fuente: Elaboración propia

- **Fabricación de Moldes**

Los especímenes para este trabajo de Investigación incluían probetas de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto ($H=2D$) del laboratorio de hormigón de la UAJMS para el ensayo de Compresión; vigas de madera de 15*15*53 cm para el ensayo de Flexión y losas de madera de 100*100*10 cm para el ensayo de permeabilidad (infiltración).

Antes de realizar el vaciado de la mezcla en los moldes se aceitó previamente las superficies que estarán en contacto con la mezcla para evitar que ésta se quede adherida a los moldes.

Gráfica 3.14: Moldes para ensayos a compresión, Flexión y permeabilidad



Fuente: Elaboración propia

- **Mezclado**

Para el Mezclado de los materiales se utilizó una máquina mezcladora para lograr una distribución homogénea de los agregados

Gráfica 3.15. Mezcladora de Hormigón



Fuente: Elaboración Propia

Para la Dosificación se mezcló en seco los agregados donde el orden de colocación de los componentes fue del más grueso al más fino ósea desde la grava, arena, cemento y agua; también se inclinó la mezcladora para tener una mejor unión de los componentes de la mezcla de hormigón.

- **Asentamiento de la Mezcla**

Luego del Mezclado es necesario determinar el asentamiento que nuestra mezcla puede llegar a alcanzar, por lo que se realizó el ensayo del Cono de Abrams, como se dijo anteriormente, en la dosificación se debe respetar el revenimiento de 5 a 10 cm., la cual se emplea en la mezcla para pavimento rígido.

Gráfica 3.16. Asentamiento mediante el cono de Abrams



Fuente: Elaboración Propia

Cuadro 3.24: Asentamiento del Cono para Diferentes tipos de vibrados y compactación

Consistencia	Asentamiento del Cono	Forma de Compactación
Seca	0 a 2	Vibrado Energético en Taller
Plástica	3 a 5	Vibrado energético en Obra
Blanda	6 a 9	Vibrado o Apisonado
Fluida	10 a 15	Picado con Barra
Líquida	16	No apta para elementos resistentes

Fuente: Elaboración Propia

Como muestra la tabla, para este tipo de asentamiento se usará una mezcla que emplea la forma de compactación vibrada o apisonada, en el presente caso se usará la apisonada por medio de la varilla de compactación.

Para los asentamientos de las mezclas de concreto se compensó el volumen de 6 probetas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, en 2 vigas de 15*15*53 cm y 1 losa de 100*100*10 cm

Cuadro 3.25: Asentamiento de la Mezcla de hormigón convencional

N	Uso de Mezcla	Relación Agua/Cemento	Asentamiento (cm)	Asentamiento (pulg)
1	6 Probetas	0,46	7,9	3,11
2	6 Probetas	0,46	7,5	2,95
3	6 Probetas	0,46	7,8	3,07
4	1 Losa	0,46	8,1	3,19
5	2 Vigas	0,46	7,7	3,03
		Promedio	7,825	3,08

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.26: Asentamiento de la Mezcla de hormigón poroso con 15% de vacíos

N	Uso de Mezcla	Relación Agua/Cemento	Asentamiento (cm)	Asentamiento (pulg)
1	6 Probetas	0,38	2,9	1,14
2	6 Probetas	0,38	3	1,18
3	6 Probetas	0,38	3,1	1,22
4	1 Losa	0,38	2,8	1,10
		Promedio	2,95	1,16
5	3 Probetas	0,36	2,9	1,14
6	2 Vigas	0,36	2,8	1,10
7	1 Losa	0,36	2,8	1,10
		Promedio	2,83	1,12

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.27: Asentamiento de la Mezcla de hormigón poroso con 20% de vacíos

N	Uso de Mezcla	Relación Agua/Cemento	Asentamiento (cm)	Asentamiento (pulg)
1	6 Probetas	0,38	2,6	1,02
2	6 Probetas	0,38	2,3	0,91
3	6 Probetas	0,38	2,4	0,94
4	1 Losa	0,38	2,3	0,91
		Promedio	2,4	0,94
5	3 Probetas	0,36	2,3	0,91
6	2 Vigas	0,36	2,4	0,94
7	1 Losa	0,36	2,3	0,91
		Promedio	2,33	0,92

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.28: Asentamiento de la Mezcla de hormigón poroso con 25% de vacíos

N	Uso de Mezcla	Relación Agua/Cemento	Asentamiento (cm)	Asentamiento (pulg)
1	6 Probetas	0,38	1,1	0,43
2	6 Probetas	0,38	0,9	0,35
3	6 Probetas	0,38	0,9	0,35
4	1 Losa	0,38	1	0,39
Promedio			0,975	0,38
5	3 Probetas	0,36	0,9	0,35
6	2 Vigas	0,36	0,9	0,35
7	1 Losa	0,36	1	0,39
Promedio			0,93	0,37

Fuente: Elaboración propia

- **Vaciado y Apisonado**

Para el Vaciado y Apisonado del Hormigón se dispuso de los moldes en la que tanto como probetas, vigas y losas se distribuyeron por 3 capas iguales, cada capa de 25 golpes de la varilla; una vez al tope del molde se aplicó golpes a los costados para eliminar vacíos existentes y el acomodamiento de los componentes.

Antes del vaciado se realizó el lavado de los agregados, tanto grueso como fino para evitar que exista material limo o arcilla que evite la buena adherencia del cemento con los agregados.

Luego de enrasarlo se lo pondrá en un lugar donde no absorba mucha humedad, y luego se instalará en la parte superior un impermeable para que la mezcla no pierda humedad y esta no se deshidrate rápidamente, para así evitar que tenga fisuras prematuras y se fragüe normalmente.

Se desencofra pasando un día del vaciado donde la mezcla ya adquiere rigidez para ponerle al curado dentro de un estanque de agua hasta el día de la rotura.

Gráfica 3.17: Varillado y Compactación Manual de la Mezcla de Hormigón



Fuente: Elaboración Propia

- **Curado y Almacenamiento**

Pasado el día del vaciado de la mezcla se desencofró tanto probetas como vigas de sus moldes en donde la mezcla adquirió rigidez.

Una vez fuera de los moldes se los sumergió en tanques de agua limpia sin que tenga ningún químico o impurezas que perjudiquen el curado normal y la resistencia.

Las muestras se mantienen sumergidas hasta el día de la rotura ya sea 7, 14 o 28 días para que esta tenga una mejor resistencia.

Para el curado de la losa se roció con agua debido a su peso para colocarlo en un estanque.

Gráfica 3.18: Curado de los Especímenes



Fuente: Elaboración Propia

3.7. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL HORMIGÓN

Al finalizar las muestras de hormigón es necesario determinar las propiedades físicas mecánicas más importantes que rigen en el comportamiento de los especímenes.

- Porosidad absoluta de los hormigones

La porosidad es la propiedad del hormigón, que se define como el volumen de espacios en el volumen total del hormigón: Para determinar esta propiedad se trabajó en os especímenes seleccionados para determianr la resistencia a compresión. Se lo elaboró en un en equipo casero, que consiste de un balde graduado y utilizando un líquido (agua)

Gráfica 3.19: Porosidad de los hormigones



Fuente: Elaboración Propia

Cuadro 3.29: Resultados de ensayo de porosidad con una relación a/c 0.38

Probeta N°	ELEMENTO	Volumen	Volumen inicial (cm3)	Volumen final (cm3)	Volumen desplazado (cm3)	Volumen de poros (cm3)	Poros (%)	PROMEDIO
1	Convencional	5301,44	5000,00	10250,00	5250,00	51,44	0,97	0,92
2	Convencional	5301,44	5000,00	10255,00	5255,00	46,44	0,88	
3	Convencional	5301,44	5000,00	10253,00	5253,00	48,44	0,91	
4	15% Vacíos	5301,44	5000,00	9650,00	4650,00	651,44	12,29	12,07
5	15% Vacíos	5301,44	5000,00	9670,00	4670,00	631,44	11,91	
6	15% Vacíos	5301,44	5000,00	9665,00	4665,00	636,44	12,01	
7	20% Vacíos	5301,44	5000,00	9386,00	4386,00	915,44	17,27	17,26
8	20% Vacíos	5301,44	5000,00	9379,00	4379,00	922,44	17,40	
9	20% Vacíos	5301,44	5000,00	9395,00	4395,00	906,44	17,10	
10	25% Vacíos	5301,44	5000,00	9056,00	4056,00	1245,44	23,49	23,52
11	25% Vacíos	5301,44	5000,00	9048,00	4048,00	1253,44	23,64	
12	25% Vacíos	5301,44	5000,00	9060,00	4060,00	1241,44	23,42	

Fuente: Elaboración Propia

Cuadro 3.30: Resultados de ensayo de porosidad con una relación a/c 0.36

Probeta N°	ELEMENTO	Volumen	Volumen inicial (cm3)	Volumen final (cm3)	Volumen desplazado (cm3)	Volumen de poros (cm3)	Poros (%)	PROMEDIO
4	15% Vacíos	5301,44	5000,00	9510,00	4510,00	791,44	14,93	15,05
5	15% Vacíos	5301,44	5000,00	9495,00	4495,00	806,44	15,21	
6	15% Vacíos	5301,44	5000,00	9505,00	4505,00	796,44	15,02	
7	20% Vacíos	5301,44	5000,00	9250,00	4250,00	1051,44	19,83	19,99
8	20% Vacíos	5301,44	5000,00	9235,00	4235,00	1066,44	20,12	
9	20% Vacíos	5301,44	5000,00	9240,00	4240,00	1061,44	20,02	
10	25% Vacíos	5301,44	5000,00	8970,00	3970,00	1331,44	25,11	24,89
11	25% Vacíos	5301,44	5000,00	8985,00	3985,00	1316,44	24,83	
12	25% Vacíos	5301,44	5000,00	8990,00	3990,00	1311,44	24,74	

Fuente: Elaboración Propia

- Resistencia a la Compresión

La resistencia a la compresión es la propiedad más importante; en general, no solo define el nivel de su calidad estructural, sino también el nivel de su resistencia al intemperismo o cualquier otra causa de deterioro. Este ensayo se lo realizó en una prensa hidráulica en el Laboratorio de Suelos y Hormigones de la UAJMS.

Gráfica 3.20: Rotura de Testigos de Hormigón a Compresión



Fuente: Elaboración Propia

Una vez ensayados las probetas de hormigón es indispensable determinar la Resistencia Característica mediante el empleo de la estadística básica por el método de Student de la siguiente manera:

$$f_{ck} = f_{cm} - t * s$$

Dónde:

f_{ck} = Resistencia Característica (kg/cm²)

f_{cm} = Resistencia Promedio (kg/cm²)

t = Coeficiente de Student

s = Desviación estándar

Cuadro 3.31: Resistencia de 7, 14 y 28 días a Compresión del hormigón convencional

Probeta N°	Fecha de	Fecha de	Edad	Sección	Lectura	Carga	Resistencia	Proyección 28
	Vaciado	Rotura	(días)	(cm ²)	(KN)	(kg)	(Kg/cm ²)	días (kg/cm ²)
1	08/10/2014	15/10/2014	7	176,63	275,3	28080,60	158,98	220,70
2	08/10/2014	15/10/2014	7	176,63	275,8	28131,60	159,27	221,10
3	08/10/2014	15/10/2014	7	176,63	279,3	28488,60	161,29	223,90
4	08/10/2014	15/10/2014	7	176,63	280,1	28570,20	161,76	224,55
5	08/10/2014	15/10/2014	7	176,63	278,3	28386,60	160,72	223,10
6	08/10/2014	15/10/2014	7	176,63	272,2	27764,40	157,19	218,21
7	08/10/2014	15/10/2014	7	176,63	282,0	28764,00	162,85	226,07
8	08/10/2014	15/10/2014	7	176,63	280,1	28570,20	161,76	224,55
9	10/10/2014	24/10/2014	14	176,63	322,5	32895,00	186,24	219,11
10	10/10/2014	24/10/2014	14	176,63	325,3	33180,60	187,86	221,01
11	10/10/2014	24/10/2014	14	176,63	320,8	32721,60	185,26	217,95
12	10/10/2014	24/10/2014	14	176,63	322,1	32854,20	186,01	218,84
13	10/10/2014	24/10/2014	14	176,63	321,3	32772,60	185,55	218,29
14	10/10/2014	24/10/2014	14	176,63	319,2	32558,40	184,34	216,87
15	10/10/2014	24/10/2014	14	176,63	324,1	33058,20	187,17	220,20
16	10/10/2014	24/10/2014	14	176,63	323,2	32966,40	186,65	219,58
17	13/10/2014	10/11/2014	28	176,63	380,3	38790,60	219,62	219,62
18	13/10/2014	10/11/2014	28	176,63	375,6	38311,20	216,91	216,91
19	13/10/2014	10/11/2014	28	176,63	372,9	38035,80	215,35	215,35
20	13/10/2014	10/11/2014	28	176,63	375,0	38250,00	216,56	216,56
21	13/10/2014	10/11/2014	28	176,63	381,6	38923,20	220,37	220,37
22	13/10/2014	10/11/2014	28	176,63	379,1	38668,20	218,93	218,93
23	13/10/2014	10/11/2014	28	176,63	375,1	38260,20	216,62	216,62
24	13/10/2014	10/11/2014	28	176,63	380,0	38760,00	219,45	219,45
						PROMEDIO	188,20	219,91

Resistencia Promedio	219,91	kg/cm ²
Desviación Estándar	2,83
Coefficiente de Student	1,72
Resistencia Característica	215,04	kg/cm ²

Fuente: Elaboración Propia

Cuadro 3.32: Resistencia de 7, 14 y 28 días a Compresión del hormigón poroso con 15 % de vacíos

Probeta N°	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Sección (cm ²)	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Proyección 28 días (kg/cm ²)
1	09/10/2014	16/10/2014	7	176,63	194,9	19879,80	112,55	156,24
2	09/10/2014	16/10/2014	7	176,63	204,7	20879,40	118,21	164,10
3	09/10/2014	16/10/2014	7	176,63	199,0	20298,00	114,92	159,53
4	09/10/2014	16/10/2014	7	176,63	201,6	20563,20	116,42	161,62
5	09/10/2014	16/10/2014	7	176,63	203,5	20757,00	117,52	163,14
6	09/10/2014	16/10/2014	7	176,63	200,7	20471,40	115,90	160,89
7	09/10/2014	16/10/2014	7	176,63	199,8	20379,60	115,38	160,17
8	09/10/2014	16/10/2014	7	176,63	205,1	20920,20	118,44	164,42
9	14/10/2014	28/10/2014	14	176,63	239,6	24439,20	138,37	162,79
10	14/10/2014	28/10/2014	14	176,63	236,0	24072,00	136,29	160,34
11	14/10/2014	28/10/2014	14	176,63	235,3	24000,60	135,88	159,86
12	14/10/2014	28/10/2014	14	176,63	230,9	23551,80	133,34	156,87
13	14/10/2014	28/10/2014	14	176,63	236,8	24153,60	136,75	160,88
14	14/10/2014	28/10/2014	14	176,63	239,6	24439,20	138,37	162,79
15	14/10/2014	28/10/2014	14	176,63	245,8	25071,60	141,95	167,00
16	14/10/2014	28/10/2014	14	176,63	240,1	24490,20	138,66	163,13
17	16/10/2014	13/11/2014	28	176,63	289,5	29529,00	167,18	167,18
18	16/10/2014	13/11/2014	28	176,63	282,4	28804,80	163,08	163,08
19	16/10/2014	13/11/2014	28	176,63	275,5	28101,00	159,10	159,10
20	16/10/2014	13/11/2014	28	176,63	279,8	28539,60	161,58	161,58
21	16/10/2014	13/11/2014	28	176,63	281,6	28723,20	162,62	162,62
22	16/10/2014	13/11/2014	28	176,63	284,3	28998,60	164,18	164,18
23	16/10/2014	13/11/2014	28	176,63	281,9	28753,80	162,80	162,80
24	16/10/2014	13/11/2014	28	176,63	285,1	29080,20	164,64	164,64
						PROMEDIO	138,92	162,04

Resistencia Promedio	162,04	kg/cm ²
Desviación Estándar	2,7
Coefficiente de Student	1,72
Resistencia Característica	157,40	kg/cm ²

Fuente: Elaboración Propia

Cuadro 3.33: Resistencia de 7, 14 y 28 días a Compresión del hormigón poroso con 20 % de vacíos

Probeta N°	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Sección (cm ²)	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Proyección 28 días (kg/cm ²)
1	15/10/2014	22/10/2014	7	176,63	140,2	14300,40	80,96	112,39
2	15/10/2014	22/10/2014	7	176,63	135,3	13800,60	78,14	108,47
3	15/10/2014	22/10/2014	7	176,63	131,9	13453,80	76,17	105,74
4	15/10/2014	22/10/2014	7	176,63	134,3	13698,60	77,56	107,66
5	15/10/2014	22/10/2014	7	176,63	131,1	13372,20	75,71	105,10
6	15/10/2014	22/10/2014	7	176,63	135,6	13831,20	78,31	108,71
7	15/10/2014	22/10/2014	7	176,63	134,8	13749,60	77,85	108,06
8	15/10/2014	22/10/2014	7	176,63	140,2	14300,40	80,96	112,39
9	17/10/2014	31/10/2014	14	176,63	155,2	15830,40	89,63	105,44
10	17/10/2014	31/10/2014	14	176,63	162,3	16554,60	93,73	110,27
11	17/10/2014	31/10/2014	14	176,63	165,1	16840,20	95,34	112,17
12	17/10/2014	31/10/2014	14	176,63	165,9	16921,80	95,81	112,71
13	17/10/2014	31/10/2014	14	176,63	168,2	17156,40	97,13	114,28
14	17/10/2014	31/10/2014	14	176,63	164,6	16789,20	95,06	111,83
15	17/10/2014	31/10/2014	14	176,63	166,3	16962,60	96,04	112,99
16	17/10/2014	31/10/2014	14	176,63	169	17238,00	97,60	114,82
17	20/10/2014	17/11/2014	28	176,63	185,7	18941,40	107,24	107,24
18	20/10/2014	17/11/2014	28	176,63	183,8	18747,60	106,14	106,14
19	20/10/2014	17/11/2014	28	176,63	190,4	19420,80	109,95	109,95
20	20/10/2014	17/11/2014	28	176,63	185,2	18890,40	106,95	106,95
21	20/10/2014	17/11/2014	28	176,63	188,2	19196,40	108,68	108,68
22	20/10/2014	17/11/2014	28	176,63	184,9	18859,80	106,78	106,78
23	20/10/2014	17/11/2014	28	176,63	186,1	18982,20	107,47	107,47
24	20/10/2014	17/11/2014	28	176,63	192,3	19614,60	111,05	111,05
						PROMEDIO	93,76	109,47

Resistencia Promedio	109,47	kg/cm ²
Desviación Estándar	2,93
Coficiente de Student	1,72
Resistencia Característica	104,43	kg/cm²

Fuente: Elaboración Propia

Cuadro 3.34: Resistencia de 7, 14 y 28 días a Compresión del hormigón poroso con 25 % de vacíos

Probeta N°	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Sección (cm ²)	Lectura (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Proyección 28 días (kg/cm ²)
1	21/10/2014	28/10/2014	7	176,63	80,1	8170,20	46,26	64,21
2	21/10/2014	28/10/2014	7	176,63	81,5	8313,00	47,07	65,34
3	21/10/2014	28/10/2014	7	176,63	79,9	8149,80	46,14	64,05
4	21/10/2014	28/10/2014	7	176,63	81,9	8353,80	47,30	65,66
5	21/10/2014	28/10/2014	7	176,63	82,3	8394,60	47,53	65,98
6	21/10/2014	28/10/2014	7	176,63	79,8	8139,60	46,08	63,97
7	21/10/2014	28/10/2014	7	176,63	78,2	7976,40	45,16	62,69
8	21/10/2014	28/10/2014	7	176,63	77,6	7915,20	44,81	62,21
9	22/10/2014	05/11/2014	14	176,63	96,2	9812,40	55,55	65,36
10	22/10/2014	05/11/2014	14	176,63	95,5	9741,00	55,15	64,88
11	22/10/2014	05/11/2014	14	176,63	90,9	9271,80	52,49	61,76
12	22/10/2014	05/11/2014	14	176,63	95,6	9751,20	55,21	64,95
13	22/10/2014	05/11/2014	14	176,63	93,4	9526,80	53,94	63,46
14	22/10/2014	05/11/2014	14	176,63	92,8	9465,60	53,59	63,05
15	22/10/2014	05/11/2014	14	176,63	96,1	9802,20	55,50	65,29
16	22/10/2014	05/11/2014	14	176,63	90,1	9190,20	52,03	61,21
17	23/10/2014	20/11/2014	28	176,63	102,5	10455,00	59,19	59,19
18	23/10/2014	20/11/2014	28	176,63	112,7	11495,40	65,08	65,08
19	23/10/2014	20/11/2014	28	176,63	108,1	11026,20	62,43	62,43
20	23/10/2014	20/11/2014	28	176,63	107,6	10975,20	62,14	62,14
21	23/10/2014	20/11/2014	28	176,63	109,2	11138,40	63,06	63,06
22	23/10/2014	20/11/2014	28	176,63	105,9	10801,80	61,16	61,16
23	23/10/2014	20/11/2014	28	176,63	110,2	11240,40	63,64	63,64
24	23/10/2014	20/11/2014	28	176,63	108,6	11077,20	62,72	62,72
						PROMEDIO	54,30	63,48

Resistencia Promedio	63,48	kg/cm ²
Desviación Estándar	1,7
Coefficiente de Student	1,72
Resistencia Característica	60,55	kg/cm ²

Fuente: Elaboración Propia

- Resistencia a la Flexión

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 módulo 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 utilizará el equipo de dos puntos de carga.

Gráfica 3.21: Montaje de la viga en el Equipo de Flexión



Fuente: Elaboración Propia

La resistencia a flexión se calcula mediante la fórmula clásica:

$$f_{ctf} = \frac{Mr}{W} = \frac{6Mr}{a^3} = \frac{3F}{a^2}$$

Dónde: Mr.: Momento de la Rotura

W: Modulo resistente de la sección

F: Carga total aplicada en la rotura

a: Lado de la sección de la viga

Cuadro 3.35: Resistencia a Flexión a los 28 días con Hormigón convencional

N°	Fecha de	Fecha de	Edad	Dim. "a"	Carga "F"	Carga "F"	Res. Flexión
	Vaciado	Rotura	(días)	(cm)	(KN)	(kg)	(Kg/cm ²)
1	17/09/2015	15/10/2015	28	15	35,8	3651,60	48,69
2	17/09/2015	15/10/2015	28	15	36,2	3692,40	49,23
3	17/09/2015	15/10/2015	28	15	34,1	3478,20	46,38
PROMEDIO							48,10

Fuente: Elaboración Propia

Cuadro 3.36: Resistencia a Flexión a los 28 días con Hormigón poroso 15% vacíos

N°	Fecha de	Fecha de	Edad	Dim. "a"	Carga "F"	Carga "F"	Res. Flexión
	Vaciado	Rotura	(días)	(cm)	(KN)	(kg)	(Kg/cm ²)
1	17/09/2015	15/10/2015	28	15	8,4	856,80	11,42
2	17/09/2015	15/10/2015	28	15	8,1	826,20	11,02
3	17/09/2015	15/10/2015	28	15	8,3	846,60	11,29
PROMEDIO							11,24

Fuente: Elaboración Propia

Cuadro 3.37: Resistencia a Flexión a los 28 días con Hormigón poroso 20% vacíos

N°	Fecha de	Fecha de	Edad	Dim. "a"	Carga "F"	Carga "F"	Res. Flexión
	Vaciado	Rotura	(días)	(cm)	(KN)	(kg)	(Kg/cm ²)
1	17/09/2015	15/10/2015	28	15	7,1	724,20	9,66
2	17/09/2015	15/10/2015	28	15	7,4	754,80	10,06
3	17/09/2015	15/10/2015	28	15	7	714,00	9,52
PROMEDIO							9,75

Fuente: Elaboración Propia

Cuadro 3.38: Resistencia a Flexión a los 28 días con Hormigón poroso 25%
vacíos

Probeta N°	Fecha de	Fecha de	Edad	Dim. "a"	Carga "F"	Carga "F"	Res. Flexión
	Vaciado	Rotura	(días)	(cm)	(KN)	(kg)	(Kg/cm ²)
1	17/09/2015	15/10/2015	28	15	5,8	591,60	7,89
2	17/09/2015	15/10/2015	28	15	5,3	540,60	7,21
3	17/09/2015	15/10/2015	28	15	5,6	571,20	7,62
PROMEDIO							7,57

Fuente: Elaboración Propia

- Permeabilidad

Esta prueba tiene gran importancia ya que sus resultados indican si existe la posibilidad de que el agua proveniente de las lluvias o escurrimientos superficiales penetre a través de los poros que presenta el pavimento hormigón.

El equipo necesario es:

Una losa de hormigón, anillo de lámina de 10,16 cm (4 plg) de diámetro interior y 10 cm de altura, probetas graduadas de 200cc y de 1000cc, cemento o plastilina, un recipiente de agua,

Procedimiento

Se diseña una losa de hormigón (convencional, poroso) con su correspondiente dosificación de 1 m² de superficie y 10 cm de espesor.

Sobre la losa se coloca el anillo de lámina. Entre la pared exterior del anillo y la carpeta se coloca un cordón de 2 cm de diámetro del material que es utilizado para sellar (cemento, plastilina etc.) y se presiona con los dedos para que capture los huecos que quedan entre el anillo y la losa, y se impidan las fugas de agua que se vaciara posteriormente al anillo.

Se vacía rápidamente el agua de la probeta graduada al depósito para tener una lectura inicial de altura h_1 y el tiempo cero t_0 , de ahí se deja que se infiltre el agua hasta una altura h_2 y controlando el tiempo que tarda en descender hasta la h_2 .

Con las dimensiones del anillo y la diferencia de alturas se logra obtener el volumen infiltrado, con el tiempo se determina el caudal que se infiltra.

$$V = \frac{\pi D^2}{4} * (h_1 - h_2)$$

$$Q = \frac{V}{t}$$

Gráfica 3.22. Esquema del ensayo de permeabilidad



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.39: permeabilidad del hormigón convencional

Nº Ensayos	Altura Inicial (cm)	Altura Final (cm)	Tiempo Inicial (min)	Tiempo Final (min)	Diferencia de Alturas (cm)	Sección (cm ²)	Volumen cm ³	Caudal cm ³ /seg	Velocidad cm/seg
1	8,00	7,95	0,00	180,00	0,05	78,54	3,93	0,0004	0,0286
2	8,00	7,95	0,00	180,00	0,05	78,54	3,93	0,0004	0,0286
3	8,00	7,95	0,00	180,00	0,05	78,54	3,93	0,0004	0,0286
4	8,00	7,95	0,00	180,00	0,05	78,54	3,93	0,0004	0,0286
5	8,00	7,95	0,00	180,00	0,05	78,54	3,93	0,0004	0,0286
PROMEDIO								0,0004	0,0286

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.40: permeabilidad del hormigón poroso con 15% de vacíos

Nº Ensayos	Altura Inicial (cm)	Altura Final (cm)	Tiempo Inicial (min)	Tiempo Final (min)	Diferencia de Alturas (cm)	Sección (cm ²)	Volumen cm ³	Caudal cm ³ /seg	Velocidad cm/seg
1	8,00	7,73	0,00	30,00	0,27	78,54	21,21	0,0118	0,9253
2	8,00	7,68	0,00	30,00	0,32	78,54	25,13	0,0140	1,0966
3	8,00	7,65	0,00	30,00	0,35	78,54	27,49	0,0153	1,1994
4	8,00	7,70	0,00	30,00	0,30	78,54	23,56	0,0131	1,0281
5	8,00	7,65	0,00	30,00	0,35	78,54	27,49	0,0153	1,1994
PROMEDIO								0,0139	1,1309

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.41: permeabilidad del hormigón poroso con 20% de vacíos

Nº Ensayos	Altura Inicial (cm)	Altura Final (cm)	Tiempo Inicial (min)	Tiempo Final (min)	Diferencia de Alturas (cm)	Sección (cm ²)	Volumen cm ³	Caudal cm ³ /seg	Velocidad cm/seg
1	8,00	7,40	0,00	30,00	0,60	78,54	47,12	0,0262	2,0562
2	8,00	7,45	0,00	30,00	0,55	78,54	43,20	0,0240	1,8848
3	8,00	7,40	0,00	30,00	0,60	78,54	47,12	0,0262	2,0562
4	8,00	7,45	0,00	30,00	0,55	78,54	43,20	0,0240	1,8848
5	8,00	7,46	0,00	30,00	0,54	78,54	42,41	0,0236	1,8506
PROMEDIO								0,0248	1,9465

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.42: permeabilidad del hormigón poroso con 25% de vacíos

Nº Ensayos	Altura Inicial (cm)	Altura Final (cm)	Tiempo Inicial (min)	Tiempo Final (min)	Diferencia de Alturas (cm)	Sección (cm ²)	Volumen cm ³	Caudal cm ³ /seg	Velocidad cm/seg
1	8,00	7,28	0,00	30,00	0,72	78,54	56,55	0,0314	2,4674
2	8,00	7,25	0,00	30,00	0,75	78,54	58,90	0,0327	2,5702
3	8,00	7,30	0,00	30,00	0,70	78,54	54,98	0,0305	2,3989
4	8,00	7,35	0,00	30,00	0,65	78,54	51,05	0,0284	2,2275
5	8,00	7,32	0,00	30,00	0,68	78,54	53,41	0,0297	2,3303
PROMEDIO								0,0305	2,3989

Fuente: Elaboración propia

3.8. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA CALLE JUNÍN ESQUINA AVAROA

3.8.1. Descripción hidrológica del área de estudio

3.8.1.1 Intensidad de lluvia

Para el cálculo de la intensidad se utilizó la ecuación definida por Absalon Harmin Mamani Fita en su trabajo de tesis "Estimación y actualización de las ecuaciones Intensidad- Duración – Frecuencia para las principales ciudades y poblaciones del departamento de Tarija" basada en el modelo de Sherman, así para la ciudad de Tarija se tiene la siguiente ecuación:

$$I = \frac{896.1416 * T^{0.132751}}{(d + 3)^{0.8}}$$

Dónde:

I= Intensidad

d= Duración de la lluvia o tiempo de concentración en minutos.

T= Periodo de retorno en años (5 años)

Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es igual a la suma del tiempo de entrada y el tiempo de recorrido. Según la Norma Boliviana 688 el tiempo de entrada mínimo es de 10 min.

Para el cálculo de la intensidad se considerará un tiempo de concentración igual al tiempo de entrada.

$$T_c = T_e = 10\text{min}$$

Intensidad

$$I = \frac{896.1416 * 5^{0.132751}}{(10 + 3)^{0.8}} = 142.56 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$$

Se adoptará este valor de intensidad para toda el área en estudio por ser el valor más desfavorable.

3.8.1.2. Área de aporte

A partir de los planos de la zona en estudio se determinó las áreas de aporte para cada punto donde existen sumideros; por lo que, las áreas de aporte son las siguientes:

Cuadro 3.43. Áreas de aporte

Ubicación	Área de aporte Km ²
Calle Junín y La Madrid	0.0056838
Calle La Madrid y Junín	0.0074788
Calle Junín y 15 de abril	0.0048508
Calle Junín y Avaroa	0.0253765

Fuente: Elaboración Propia

3.8.1.3. Coeficiente de escurrimiento

Según las características del área de estudio, la Norma Boliviana 688 de diseño de sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial recomienda un coeficiente de escurrimiento que varía entre 0.7 y 0.90., de esta forma, se adoptará un valor de escurrimiento igual a 0.8.

3.8.1.3. Caudal de aporte.

La estimación del caudal de aporte se realizará a partir del método racional

$$Q = \frac{C * I * A}{3.6}$$

Dónde:

Q= Caudal en m³/s

C= Coeficiente de escurrimiento adimensional

I= Intensidad en mm/h.

A= Área de drenaje en Km².

- **Caudal de aporte calle Junín y La Madrid.**

$$Q = \frac{0.8 * 142.56 * 0.0056838}{3.6} = 0.1801 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

- **Caudal de aporte calle La Madrid y Junín.**

$$Q = \frac{0.8 * 142.56 * 0.0074788}{3.6} = 0.2369 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

- **Caudal de aporte calle Junín y 15 de abril.**

$$Q = \frac{0.8 * 142.56 * 0.0048508}{3.6} = 0.1537 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

- **Caudal de aporte calle Junín y Avaroa.**

$$Q = \frac{0.8 * 142.56 * 0.0253765}{3.6} = 0.8039 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

3.8.2. Descripción hidráulica del área de estudio

3.8.2.1 Capacidad de sumideros existentes en el área de aporte

Se realizó el cálculo de la capacidad hidráulica de sumideros a partir de la metodología propuesta por Héctor Alfonso Rodríguez Díaz en su libro "Drenaje

Urbano Elementos De Diseño''. El procedimiento de cálculo se presenta en anexos; a continuación se presenta la capacidad hidráulica de cada sumidero:

Cuadro 3.44. Capacidad de sumideros punto Junín y Avaroa

Capacidad de Sumidero "Lateral"		
Ubicación	Longitud metros	Capacidad m ³ /s
Junín y La Madrid (Izquierda)	0.74	0.00854
Junín y La Madrid (Derecha)	0.72	0.00890
La Madrid y Junín (Izquierda)	0.60	0.01269
La Madrid y Junín (Derecha)	0.62	0.00957
Junín y 15 de abril (Izquierda)	0.73	0.02757
Junín y Avaroa (Izquierda)	1	0.04138
Junín y Avaroa (Derecha)	0.97	0.03338
Fuente: Elaboración Propia		

3.8.2.2. Tirante de agua en la calzada

Para la determinar el tirante de agua en la calzada del punto en estudio, se realizó un arrastre de los caudales que no son captados por los sumideros.

Siendo el caudal igual a:

$$Q_c = Q_a - Q_s$$

Dónde:

Q_c= Caudal de cálculo m³/s

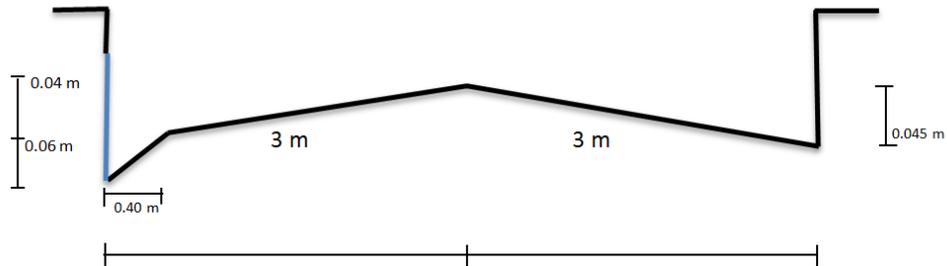
Q_a= Caudal de aporte m³/s

Q_s= Caudal captado por los sumideros m³/s

$$Q_c = 1.3746 - 0.1417 = 1.233 \frac{m^3}{s}$$

Con la utilización de la ecuación de Manning se determinó el tirante para la siguiente sección en estudio:

Sección de la calzada calle Junín



$$V = \frac{1}{n} * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Dónde:

V= Velocidad en m/s

R= Radio hidráulico en m.

S= Pendiente m/m

n= Coeficiente de rugosidad

Se aplicó la ecuación de la continuidad para establecer la ecuación de Manning en función del caudal, se tiene:

$$Q = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Dónde:

Q= Caudal en m³/s

A= Área de la sección en m²

El área hidráulica de la sección será igual a:

$$A = \frac{0.40 * 0.06}{2} + (0.40 * 0.04) + \frac{0.04 * 2.60}{2} + \frac{3 * 0.045}{2} + [(Y - 0.10) * 6]$$

$$A = 0.1475 + [(Y - 0.10) * 6]$$

El perímetro mojado de la sección es igual a:

$$P = Y + \sqrt{0.40^2 + 0.06^2} + \sqrt{2.60^2 + 0.04^2} + \sqrt{3^2 + 0.045^2} + (Y - 0.055)$$

$$P = 2Y + 5.9501$$

El radio hidráulico es igual a:

$$R = \frac{A}{P} = \frac{0.1475 + (Y - 0.10) * 6}{(2 * Y) + 5.9501}$$

La pendiente de la vía es igual a 2.11% dato que fue tomado para el cálculo de la capacidad de sumideros.

Remplazando los valores e iterando encontramos el tirante en la calzada.

El caudal de aporte considerando la captación de los sumideros es igual a 1.233 m³/s.

$$1.233 = \frac{1}{0.011} * (0.1475 + (Y - 0.10) * 6) * \left(\frac{0.1475 + (Y - 0.10) * 6}{2 * Y + 5.9501} \right)^{\frac{2}{3}} * 0.0211^{\frac{1}{2}}$$

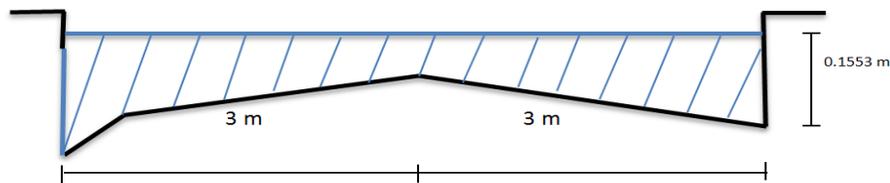
Iterando la ecuación se obtiene un tirante de 0.159 m. al ingreso del sumidero.

3.8.3. Características hidráulicas con variante de pavimento poroso

3.8.3.1. Tirante de agua en la calzada

El tirante producido en el punto de estudio es igual a 0.159 metros, por lo que el cual se reducirá debido a la infiltración que permite el pavimento poroso.

Sección de la calzada calle Junín



A aplicar pavimento poroso sobre la calle Junín entre Alejandro del Carpio y Avaroa, el tirante se reduciría por la infiltración de cada tipo de hormigón poroso, generando un tirante igual a:

$$T_r = T_n - I$$

Dónde:

Tr: Tirante reducido en metros

Tn: Tirante normal sin variante de pavimento poroso en metros.

I: Infiltración del pavimento poroso en metros.

A. Tirante reducido con la infiltración del pavimento poroso de 15% de vacíos

$$T_r = 0.159 - 0.011309 = 0.148\text{m}$$

El tirante producido con la utilización de pavimento poroso en el punto de estudio es igual a 0.148 metros.

B. Tirante reducido con la infiltración del pavimento poroso de 20% de vacíos

$$T_r = 0.159 - 0.019465 = 0.139\text{m}$$

El tirante producido con la utilización de pavimento poroso en el punto de estudio es igual a 0.139 metros.

C. Tirante reducido con la infiltración del pavimento poroso de 25% de vacíos

$$T_r = 0.159 - 0.023989 = 0.135\text{m}$$

El tirante producido con la utilización de pavimento poroso en el punto de estudio es igual a 0.135 metros.

3.8.4 Costo de construcción de pavimento poroso

La construcción del pavimento Poroso se ubicará sobre la calle Junín entre Alejandro del Carpio y Avaroa con una longitud de 8 metros y un ancho de calzada de 6m.

Las actividades a realizar en la construcción del pavimento Poroso y sus precios unitarios son los siguientes:

Cuadro 3.45. Precios unitarios para actividades de construcción de pavimento poroso (15% de vacíos)

Actividad	Unidad	Precio unitario. Bs
Demolición carpeta existente	m ²	40,60
Excavación	m ³	59.71
Conformación de capa sub base	m ³	117.17
Junta longitudinal	m	4.92
Junta transversal	m	80.29
Hormigón rígido	m ³	738,56
Corte y sello de juntas	m	23.23
Hormigón Poroso	m ³	710,89
Limpieza	m ²	16.36
Fuente: Elaboración propia		

Cuadro 3.46. Precios unitarios para actividades de construcción de pavimento poroso (20% de vacíos)

Actividad	Unidad	Precio unitario. Bs
Demolición carpeta existente	m ²	40.60
Excavación	m ³	59.71
Conformación de capa sub base	m ³	117.17
Junta longitudinal	m	4.92
Junta transversal	m	80.29
Hormigón rígido	m ³	738,56
Corte y sello de juntas	m	23.23
Hormigón Poroso	m ³	607,27
Limpieza	m ²	16.36
Fuente: Elaboración propia		

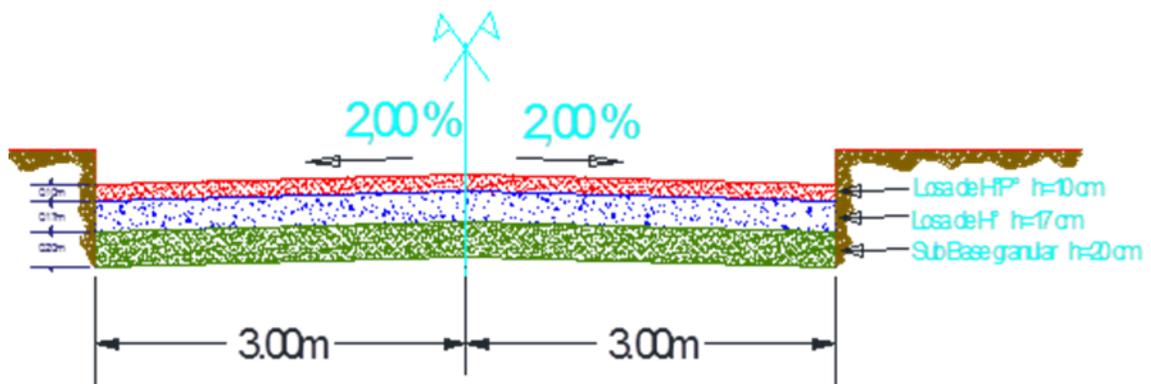
Cuadro 3.47. Precios unitarios para actividades de construcción de pavimento poroso (25% de vacíos)

Actividad	Unidad	Precio unitario. Bs
Demolición carpeta existente	m ²	40.60
Excavación	m ³	59.71
Conformación de capa sub base	m ³	117.17
Junta longitudinal	m	4.92
Junta transversal	m	80.29
Hormigón rígido	m ³	738,56
Corte y sello de juntas	m	23.23
Hormigón Poroso	m ³	504,21
Limpieza	m ²	16.36

Fuente: Elaboración propia

El detalle del precio unitario de cada actividad se encuentra adjunto en anexos.

Gráfica 3.23. Sección tipo de pavimento poroso



Las características de la sección de pavimento poroso se muestran en la anterior figura, con una capa subbase de 20 cm, losa de hormigón rígido de 17 cm y una losa de hormigón poroso de 10 cm.

Para las características de la sección se realizó el cómputo métrico para cada actividad, obteniendo el siguiente costo de ejecución para la alternativa de solución:

Cuadro 3.48. Costo de pavimento calle Junín entre Alejandro del Carpio y Abaroa (15% vacíos)

Actividad	Cantidad	Precio unitario	Costo en Bs
Demolición carpeta existente	480 m ²	40.60 Bs/ m ²	19488
Excavación	225.65 m ³	59.71 Bs/ m ³	13473,562
Conformación de capa sub base	96 m ³	117.17 Bs/ m ³	11248,32
Junta longitudinal	80 m	4.92 Bs/m	393,6
Junta transversal	80 m	80.29 Bs/m	6423,2
Hormigón rígido	81.60 m ³	738.56 Bs/ m ³	60266,496
Corte y sello de juntas	80 m	23.23 Bs/m	1858,4
Junta longitudinal	80 m	4.92 Bs/m	393,6
Hormigón Poroso	48 m ³	700.10 Bs/ m ³	33604,8
Corte y sello de juntas	80 m	23.23 Bs/m	1858,4
Limpieza	480 m ²	16.36 Bs/ m ²	7852,8
Costo total			156861,18
Fuente: Elaboración Propia			

Cuadro 3.49. Costo de pavimento calle Junín entre Alejandro del Carpio y Abaroa (20% vacíos)

Actividad	Cantidad	Precio unitario	Costo en Bs
Demolición carpeta existente	480 m ²	40.60 Bs/ m ²	19488
Excavación	225.65 m ³	59.71 Bs/ m ³	13473,562
Conformación de capa sub base	96 m ³	117.17 Bs/ m ³	11248,32
Junta longitudinal	80 m	4.92 Bs/m	393,6
Junta transversal	80 m	80.29 Bs/m	6423,2
Hormigón rígido	81.60 m ³	738.56 Bs/ m ³	60266,496
Corte y sello de juntas	80 m	23.23 Bs/m	1858,4
Junta longitudinal	80 m	4.92 Bs/m	393,6
Hormigón Poroso	48 m ³	607.27 Bs/ m ³	29148,96
Corte y sello de juntas	80 m	23.23 Bs/m	1858,4
Limpieza	480 m ²	16.36 Bs/ m ²	7852,8
Costo total			152405,34
Fuente: Elaboración Propia			

Cuadro 3.50. Costo de pavimento calle Junín entre Alejandro del Carpio y Abaroa (25% vacíos)

Actividad	Cantidad	Precio unitario	Costo en Bs
Demolición carpeta existente	480 m ²	40.60 Bs/ m ²	19488
Excavación	225.65 m ³	59.71 Bs/ m ³	13473,562
Conformación de capa sub base	96 m ³	117.17 Bs/ m ³	11248,32
Junta longitudinal	80 m	4.92 Bs/m	393,6
Junta transversal	80 m	80.29 Bs/m	6423,2
Hormigón rígido	81.60 m ³	738.56 Bs/ m ³	60266,496
Corte y sello de juntas	80 m	23.23 Bs/m	1858,4
Junta longitudinal	80 m	4.92 Bs/m	393,6
Hormigón Poroso	48 m ³	504.21 Bs/ m ³	24202,08
Corte y sello de juntas	80 m	23.23 Bs/m	1858,4
Limpieza	480 m ²	16.36 Bs/ m ²	7852,8
Costo total			147458,46
Fuente: Elaboración Propia			

3.9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se procederá a realizar un análisis minucioso de las propiedades pertenecientes a los diferentes hormigones, que fueron obtenidas en el desarrollo de la investigación. Así también se podrá comparar resultados de las propiedades del hormigón entre cada dosificación y mediante gráficos se analizará la influencia del porcentaje de vacíos (%) en las propiedades del hormigón utilizados para el pavimento rígido.

3.9.1. Análisis de la Influencia del % de vacíos en la Trabajabilidad de la Mezcla de Concreto Hidráulico

Los asentamientos de la mezcla de concreto se encuentran en función de la cantidad de agua que ésta tiene y la hidratación del cemento, como también en la relación agua/cemento, y en este estudio también se considera la ausencia del agregado fino.

Asentamiento (cm)	Consistencia (Tipo de Concreto)	Grado de Trabajabilidad	Tipo de Estructura y Colocación
0 - 2,0	Muy seca	Muy pequeño	Vigas o pilotes de alta resistencia con vibradores de encofrados.
2,0 - 3,5	Seca	Pequeño	Pavimentos vibrados y construidos con máquina extrusora.
3,5 - 5,0	Semi - seca	Pequeño	Construcción en masa voluminosa, losas medianamente reforzadas con vibración, fundaciones en concreto simple, pavimentos con vibradores normales.
5,0 - 10,0	Media	Medio	Losas medianamente reforzadas, pavimentos, compactados a mano, columnas vigas, fundaciones y muros, con vibración.
10,0 - 15,0	Húmeda	Alto	Secciones con mucho refuerzo, trabajos donde la colocación sea difícil, revestimiento de túneles, no recomendable para compactarlo demasiado.

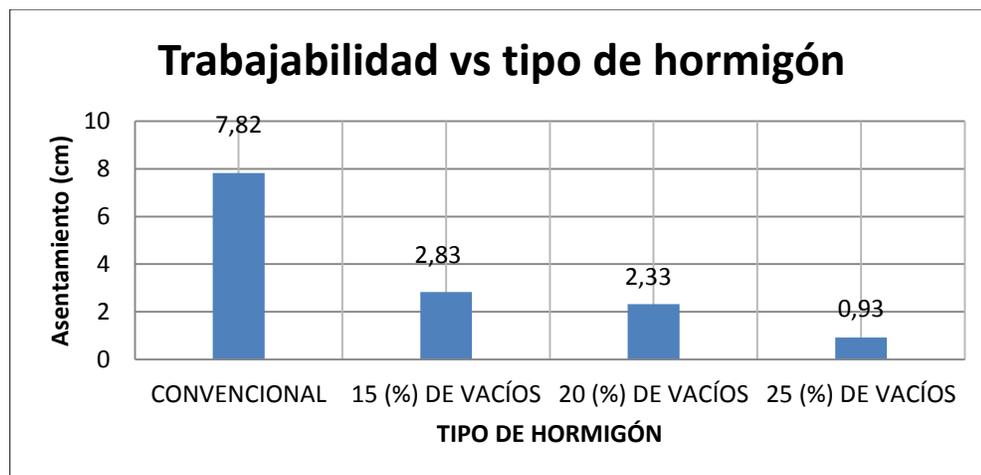
Cuadro 3.51: Resultados de la Prueba del Asentamiento

Mezcla de Concreto	Asentamiento Promedio (cm)	Relación Agua/Cemento	Grado de Trabajabilidad	Asentamiento para P. Rígido (2 – 10)
CONVENCIONAL	7,82	0,46	Medio	cumple
15 (%) DE VACÍOS	2,83	0,36	Pequeño	cumple
20 (%) DE VACÍOS	2,33	0,36	Pequeño	cumple
25 (%) DE VACÍOS	0,93	0,36	Muy Pequeño	no cumple

Fuente: Elaboración Propia

La trabajabilidad en obra es muy importante en cuanto a la mano de obra y su rendimiento; El cuadro 3.51 muestra, en primera instancia, las diferentes mezclas de concreto utilizadas en relación al asentamiento según la dosificación. Los resultados en cuanto al hormigón convencional cumplieron con las especificaciones de asentamiento para el Pavimento Rígido, la cual estuvo en el rango de 5 – 10 cm (mezcla media), las mezclas de hormigón con un porcentaje de vacíos de 15% y 20 %, también cumplieron el rango de las especificaciones para estas mezclas, se trata de un hormigón poroso de 2 – 3,5cm (mezcla seca). Mientras que la mezcla de hormigón con un porcentaje de vacíos de 25% no cumple la especificación para un pavimento rígido.

Cuadro 3.52: Gráfica de trabajabilidad vs tipo de hormigón



Fuente: Elaboración Propia

3.9.2. Análisis de la porosidad en los hormigones

Cuadro 3.53. Porosidad con una dosificación de 0.38 a/c

Especificación	% vacíos
Convencional	0,92
15 % de vacíos	12,07
20 % de vacíos	17,26
25 % de vacíos	23,52

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.54. Porosidad con una dosificación de 0.36 a/c

Especificación	% vacíos
15% Vacíos	15,05
20% Vacíos	19,99
25% Vacíos	24,89

Fuente: Elaboración propia

En estos resultados se puede apreciar que la dosificación con una relación a/c de 0.38 no representa el porcentaje de vacíos de la mezcla con la el que fue diseñada; mientras con una relación a/c de 0.36, ésta si brinda los resultados con los que se desea trabajar.

3.9.3. Análisis de la resistencia a compresión en los hormigones

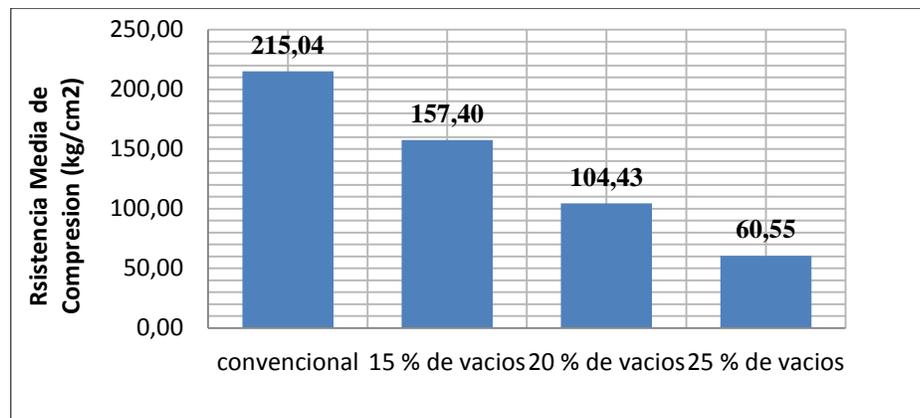
Aunque no es una propiedad importante de los pavimentos rígidos, se tendrá como parámetro o dato en la influencia del cemento sobre la mezcla de concreto. A continuación, se presentan los resultados obtenidos del ensayo de Rotura de Probetas a Compresión:

Cuadro 3.55. Resistencia a la Compresión De cada Hormigón a los 28 días

convencional	215,04 kg/cm²
15 % de vacíos	157,40 kg/cm ²
20 % de vacíos	104,43 kg/cm ²
25 % de vacíos	60,55 kg/cm ²

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.56. Gráfica de Resistencia a la Compresión De cada Hormigón a los 28 días



Fuente: Elaboración propia

La resistencia que se muestra en los cuadros, es la resistencia promedio de la roturas de probetas de hormigón de distinta clase de hormigón, cuyos resultados representan una clara diferencia de esfuerzo entre cada tipo de hormigón. Además, los resultados exponen claramente mejoras en cuestión de resistencia a la compresión del hormigón convencional dando un promedio de 215.04 kg/cm² de 24 muestras a rotura; mientras que el hormigón poroso alcanza muy bajas resistencias; así, a medida que va aumentando el porcentaje de vacíos en el hormigón va bajando la resistencia a la compresión.

Analizando los resultados del hormigón poroso con los diferentes porcentajes de vacíos, se evidencia que el hormigón poroso con un porcentaje de vacíos de 25%, no alcanza la resistencia requerida para el campo de aplicación, el cual es una capa de

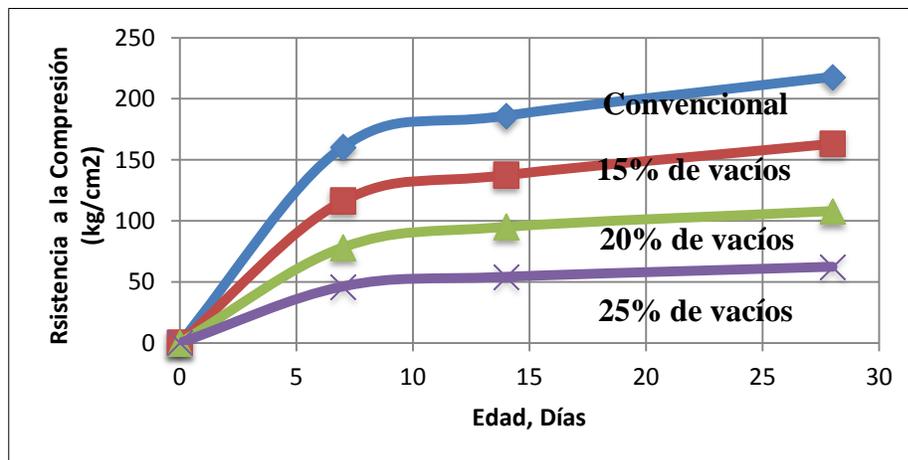
rodadura de calles y estacionamientos donde se requiere una resistencia a la compresión a los 28 días de 7 MPa, con lo cual se resiste el desgaste por abrasión del tráfico.

Cuadro 3.57. Evolución de las Resistencias a la Compresión a Diferentes Edades de cada Hormigón

HORMIGÓN	RESIST. PROMEDIO fcm (kg/cm ² .)			
	EVOLUCIÓN DE LAS PROBETAS (DIAS)			
	0	7	14	28
CONVENCIONAL	0	160,48	186,13	217,98
15 % VACÍOS	0	116,17	137,45	163,15
20 % VACÍOS	0	78,21	95,04	108,03
25 % VACÍOS	0	46,29	54,18	62,43

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.58. Gráfica de Evolución de las Resistencias a la Compresión a Diferentes Edades de cada Hormigón



Fuente: Elaboración propia

La evolución, como se ve en las gráficas, consta de diferentes resistencias a diferentes edades del hormigón, luego del vaciado de la mezcla en las probetas para someterlo a rotura. Como se puede apreciar en los primeros días el concreto aumenta rápidamente la resistencia hasta los 7 días, en donde se menciona teóricamente que a los 7 días de

edad el hormigón alcanza un 70% a 75% de la resistencia a la compresión, por lo que a partir de esta fecha ya el crecimiento o aumento de resistencia es menor hasta llegar a su resistencia al 100 % que viene ser a la edad de 28 días.

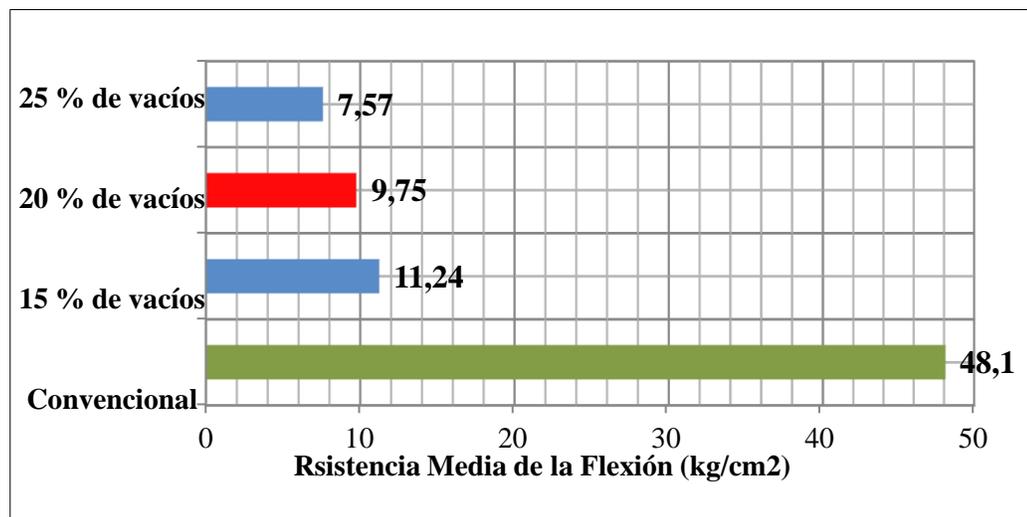
3.9.4. Análisis de la resistencia a la Flexión en los hormigones

Cuadro 3.59. Resistencia a la Flexión De cada Hormigón a los 28 días

HORMIGÓN	RESISTENCIA
Convencional	48.10 kg/cm ²
15 % de vacíos	11.24 kg/cm ²
20 % de vacíos	9.75 kg/cm ²
25 % de vacíos	7.57 kg/cm ²

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.60. Gráfica de la Resistencia a la Flexión De cada Hormigón a los 28 días



Fuente: Elaboración propia

Las resistencias a la flexión del hormigón poroso definitivamente son muy bajas, lo cual no permite un diseño de pavimento rígido de solamente hormigón poroso, siendo esta propiedad la más importante en el diseño de un pavimento rígido. Teniendo en cuenta esto, el hormigón poroso sólo se lo utiliza como una capa complementaria al

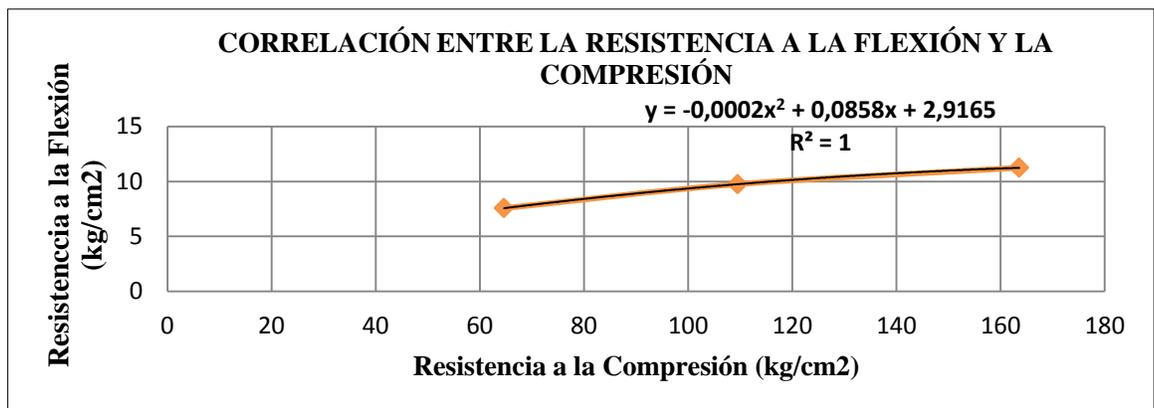
pavimento rígido con hormigón convencional, con la finalidad de evitar el escurrimiento superficial de las aguas pluviales.

Cuadro 3.61. Correlación entre la resistencia a la flexión y la compresión

Mezcla de Concreto	Resistencia Promedio a la Compresión (kg/cm ²)	Resistencia Promedio a la Flexión (kg/cm ²)
15 % de vacíos	163,6	11,24
20 % de vacíos	109,49	9,75
25 % de vacíos	64,66	7,57

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.62. Gráfica de la Correlación entre la resistencia a la flexión y la compresión



Fuente: Elaboración propia

La finalidad de esta correlación fue para observar el comportamiento de entre ambas resistencias.

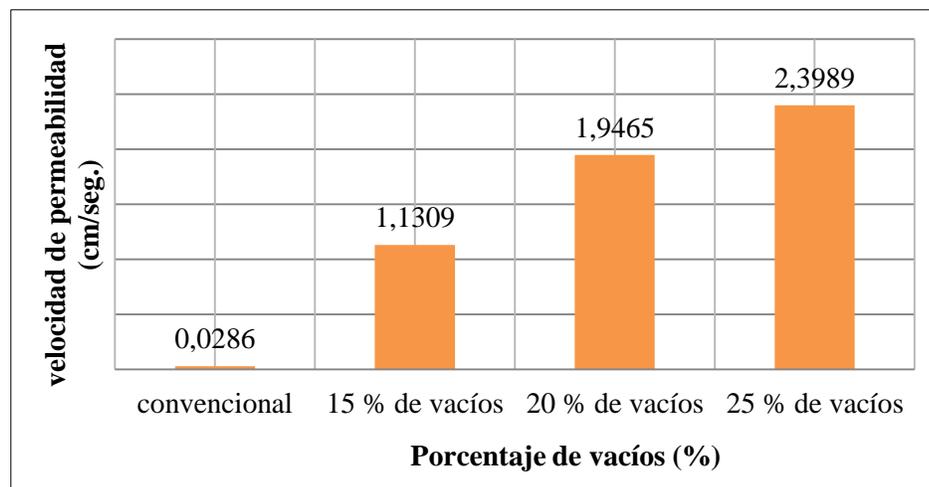
3.9.5. Análisis de la Permeabilidad

Cuadro 3.63. Permeabilidad de los diferentes hormigones

HORMIGÓN	PERMEABILIDAD
convencional	0,0286 cm/seg
15 % de vacíos	1,1309 cm/seg
20 % de vacíos	1,9465 cm/seg
25 % de vacíos	2,3989 cm/seg

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.64. Gráfica de Permeabilidad de los diferentes hormigones



Fuente: Elaboración propia

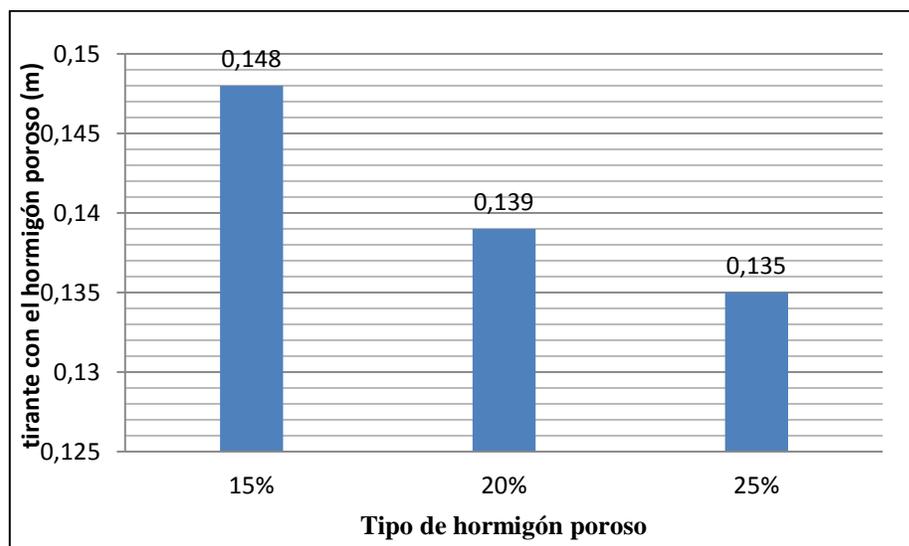
La permeabilidad depende mucho del agua de mezclado que se utiliza, porque un exceso de agua provocaría que la pasta sea muy fluida y tapanía los vacíos que se generan entre los agregados y, lo inverso, es decir, si falta de agua de mezclado provocaría una pobre adherencia entre la pasta y el agregado, lo cual se reflejaría en la baja resistencia a la compresión y un deterioro del concreto.

Al comparar la permeabilidad del concreto convencional y el concreto poroso, la diferencia es importante, ya que el coeficiente de permeabilidad del hormigón convencional se encuentra alrededor de 0.0286 cm/seg., casi impermeable; mientras que el hormigón poroso tiene una elevada permeabilidad, que permite fácilmente el escurrimiento entre sus poros.

3.9.6. Análisis del tirante de agua en la calzada

Con el pavimento convencional se genera un tirante de agua en la calzada de $Y = 0.159\text{m}$ por lo que, en el estudio se colocó diferentes tipos de hormigón poroso, y se obtuvieron nuevos tirantes.

Cuadro 3.65. Gráfica de los tirantes con el hormigón poroso

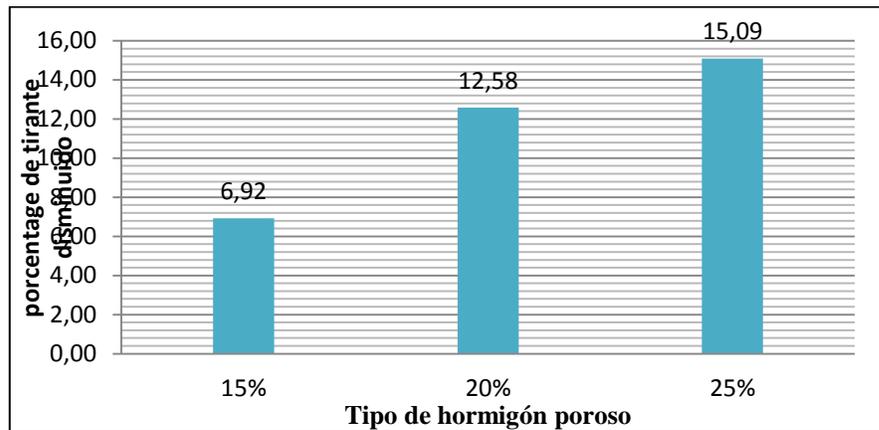


Fuente: Elaboración propia

Según la gráfica, si se coloca un hormigón poroso a la calzada, se puede disminuir el tirante de agua.

De igual forma, al obtener un hormigón poroso con mayor porcentaje de vacíos, menor será el tirante de agua en la superficie, por lo tanto con un menor tirante se disminuye los problemas de funcionalidad (como el hidroneo).

Cuadro 3.66. Gráfica de los porcentajes de tirantes disminuidos

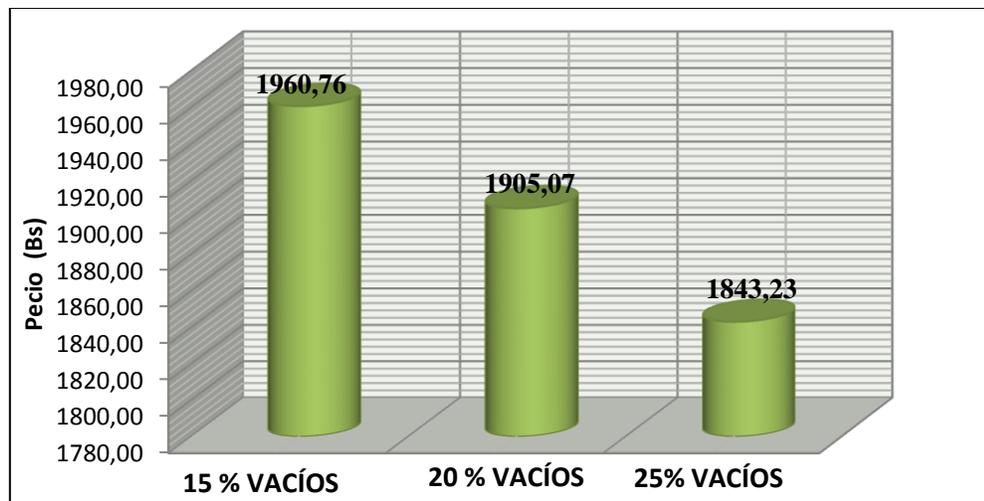


Fuente: Elaboración propia

El hormigón poroso al ser utilizado en el pavimento disminuye el tirante de agua existente en los porcentajes de 6.92, 12.58 y 15.09, correspondientes a los diferentes tipos de hormigón poroso de 15%, 20%, 25% de vacíos respectivamente.

3.9.7. Análisis de precio de construcción de un hormigón poroso para un metro cuadrado

Cuadro 3.67. Gráfica del precio del pavimento poroso para un metro cuadrado



De esta manera, mientras el hormigón poroso contenga mayor proporción de vacíos, es más económico para su construcción.

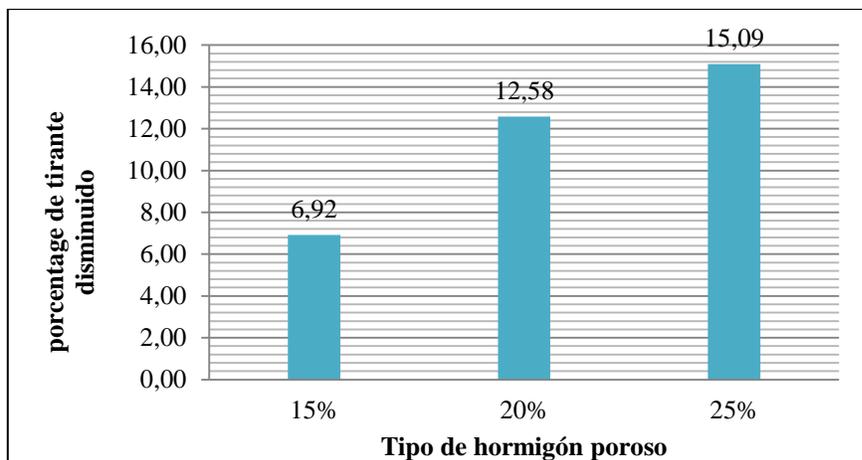
CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

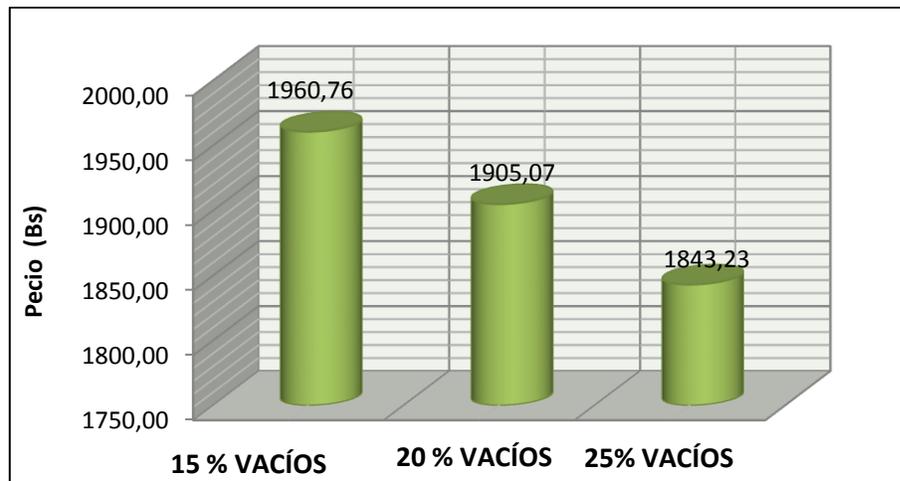
Luego del análisis de resultados e interpretación de gráficos, cumpliendo satisfactoriamente los objetivos tanto general como específicos, se puede garantizar resultados satisfactorios acordes a la investigación del tema en estudio; en donde así después de elaborar cuadros y gráficas se arribó a las las siguientes conclusiones:

- La consistencia en un hormigón poroso es seca, tiene un pequeño asentamiento. Mientras se va aumentando el porcentaje de vacíos, va bajando el grado de trabajabilidad al tratarse un hormigón más seco, por lo que tratándose de un hormigón poroso con un porcentaje de vacíos de 25% no cumple con el asentamiento requerido para ser aplicado, pero sí con 15 y 20 %
- La cantidad de vacíos en la mezcla influye en la trabajabilidad de la mezcla teniéndose que a mayor % de vacíos menor asentamiento; con el 15% tenemos 2,83 cm de asentamiento, mientras que en el 25%, se tiene 0,93 cm de asentamiento.
- Una dosificación con una relación a/c de 0.36 permite el mantenimiento del porcentaje de vacíos con el que se desea trabajar.
- Los resultados del hormigón poroso con los diferentes porcentajes de vacíos muestran que el hormigón poroso con un porcentaje de vacíos de 25%, teniendo una resistencia a compresión de 60,55 Kg/cm², no alcanza la resistencia requerida para el campo de aplicación, que es una capa de rodadura de calles y estacionamientos donde se requiere una resistencia a la compresión a los 28 días de 70 kg/cm², con lo cual se resiste al desgaste por abrasión del tráfico. Y las resistencias a la compresión de 157,40 kg/cm² y 104,43 kg/cm² correspondientes a los porcentajes de 15% y 20% de vacíos son favorables para su aplicación.

- La resistencia a flexión del hormigón poroso definitivamente son muy bajas, apenas alcanzando a un (11,24 kg/cm², 9,75 kg/cm², 7,57 kg/cm²) para los porcentajes de vacíos de 15%, 20% y 25% respectivamente
- La permeabilidad es una propiedad de los pavimentos porosos, por lo que es importante en este trabajo establecer los rangos de permeabilidad obtenidos en el presente trabajo, siendo estos (1,1309 cm/seg - 1,9465 cm/seg.) representando a los porcentajes del 15 y 20%, valores que muestran que el pavimento poroso cumplirá con su objetivo de infiltrar y evitar la película de agua en el pavimento.
- Con la utilización de pavimento poroso el tirante en la calzada se reduciría entre un 6.92 a 15.09 %.



- Se realizó un análisis económico para la construcción de un metro cuadrado de pavimento poroso, se concluye que mientras se va aumentando el porcentaje de vacíos, el costo es menor.



- Finalmente se llegó a una conclusión que el hormigón poroso, con los porcentajes de vacíos de 15% y 20% cumplen con todas las especificaciones técnicas para ser utilizados en el campo de aplicación de una capa de rodadura en pavimentos para nuestra zona.

4.2. RECOMENDACIONES

- Realizar dosificaciones de hormigón poroso con una relación agua/cemento de 0.36 con la que se pudo alcanzar la configuración adecuada de los porcentajes de vacíos.
- Tener cuidado al dosificar y preparar la mezcla de hormigón poroso por su baja trabajabilidad.
- Al trabajar con hormigones porosos, obtener una mezcla homogénea que garantice el porcentaje de vacíos adecuado para permitir la infiltración del agua superficial del pavimento.

- Seguir investigando sobre este tipo de material, ya que como se dijo al principio del trabajo, posee muchas ventajas y aplicaciones que se pueden desarrollar en nuestro medio.

- Se recomienda utilizar un hormigón poroso con un porcentaje de 20% de vacíos, que cumple con todas las exigencias mínimas y tiene un menor costo en comparación a los otros.

- Utilizar el hormigón poroso en estacionamientos vehiculares, calles de poco a mediano tráfico.