

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCION**

### **1.1 Antecedentes.-**

La disminución de la parte fina de los agregados en hormigones de pavimento fue experimentada desde hace muchas décadas, dando origen a la formación de hormigones porosos los que son utilizados en diferentes campos, principalmente en el diseño de pavimentos para tráfico liviano, por que retiene el agua de lluvia, disminuye el riesgo de inundaciones y optimiza la capacidad de los sistemas de drenaje.

Históricamente, el inicio de su aplicación data del año 1852, en la construcción de dos viviendas en Inglaterra; para el año 1940, su utilización se había expandido mediante la construcción de alrededor de novecientas viviendas en el mismo lugar.

Entre 1945 y 1950 se comenzó a experimentar con pavimentos porosos, basándose en nuevos principios: conseguir una estructura densa de agregados de granulometría equilibrada, ligados por una matriz discontinua de mortero de buena resistencia. Los estudios no merecieron demasiado impulso hasta la década del 70, cuando las sociedades concesionarias de autopistas con peaje y algunos municipios recurrieron a los pavimentos porosos, como una alternativa eficaz, para solucionar ciertos inconvenientes.

Ya en el siglo XXI podemos ver que la aplicación de superficies permeables hechas de hormigón pasa a tener una aplicación más relevante en zonas públicas y en diversos países.

En América del Sur, existe antecedentes de estudio de parte de Chile en conjunto con Estados Unidos, con el fin de mitigar los efectos de las aguas provenientes de las precipitaciones, dichos antecedentes fueron publicados en el 2002 y 2003 por la prestigiosa revista chilena “BIT”, que pertenece a la Corporación de Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción.

Perú es otro país que cuenta con antecedentes de estudios realizados sobre las mezclas de hormigón drenante, en el año 2007, estudiantes de la Universidad de Cajamarca se introdujeron en pruebas de diseño de mezclas de concreto poroso utilizando agregados de la zona y con la innovación de la adición de tiras de plástico.

En diciembre del 2009 el país vecino continuó con sus estudios sobre este campo, en esta ocasión trabajó en la deducción de una ecuación que permite dosificar hormigones porosos

en función de la relación agua-cemento y del porcentaje de vacíos interconectados, fabricando probetas en laboratorio con métodos que simulen el proceso constructivo en terreno.

En Brasil cada año las temporadas de lluvia se están haciendo más fuertes y ver crecer los niveles de agua hasta la cintura en tan sólo algunos minutos es muy común, es por esto que investigadores de la Universidad de Sao Pablo en el año 2010, dentro de los parqueaderos de la Universidad, experimentaron con pavimento de hormigón permeable que les permita almacenar agua de lluvia y disminuir el impacto de las inundaciones.

Otro país Sud Americano que se introdujo a la investigación sobre la fabricación de hormigón permeable fue Ecuador, aunque no ha tenido gran aplicación, en febrero del 2010, en la Facultad de Ingeniería y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional, han dado inicio a los estudios de este tipo de hormigón para ser utilizado en el revestimiento de taludes, que debido a su alto grado de permeabilidad, permite el desarrollo de vegetación, y que acompañado de un revestimiento, servirá para el trabajo de protección de taludes, evitando la erosión por agua de lluvia.

Canadá es uno de los países en la actualidad que más aprecia las cualidades y beneficios que tiene la aplicación de hormigones porosos, en abril del 2011 se usó este material como superficie del parqueadero de automóviles en el Centro Técnico Lafarge, distribuyendo en su superficie un volumen aproximado de  $24 \text{ m}^3$ , en el mes de mayo del siguiente año se dio inicio a la construcción del parque público de Toronto, un proyecto más grande donde se utilizaron  $1300 \text{ m}^3$  de este tipo de hormigón. En la actualidad continúan ampliando su uso en diferentes campos de aplicación, uno de ellos es en los complejos deportivos, donde se debe evitar la acumulación de agua en cualquier zona del mismo.

En el año 2012 México convierte en una realidad la fabricación de lo que años antes fue una investigación, el Ecocreto, fue la idea que tuvo el ingeniero Jaime Grau 16 años previos a su materialización, el desarrollo de este estudio está basado en el uso de aditivos que al mezclarse con cemento, agregados pétreos de granulometrías controladas y agua, sirve para fabricar pisos de pavimentos 100% permeables.

## **1.2 Justificación.-**

Debido a que la dificultad de poder conocer las características físicas internas de un hormigón sin dañar, ni alterar la forma final de este, es muy compleja, la presente investigación pretende obtener información gráfica sobre la existencia de vacíos y el contacto entre agregados en hormigones porosos de pavimento mediante la aplicación de la difracción de rayos X.

Una vez que se cuenten con las imágenes computarizadas de la tomografía se tendrá a disposición la información necesaria para llevar a cabo una valoración sobre la disposición interna de los componentes de un hormigón poroso de pavimento. La valoración se realizará mediante observaciones y cuantificaciones sobre las imágenes tomadas a una muestra que es resultado de un diseño teórico donde se establece previamente el porcentaje de vacíos que se pretende que la mezcla obtenga, la estimación realizada será analizada comparativamente con el valor inicial que se pretende alcanzar teóricamente. Es decir, las imágenes que se obtendrán mediante el tomógrafo de rayos X nos permitirán determinar la cantidad de puntos de contacto entre los agregados y el porcentaje de vacíos real en una muestra definida y así poder comparar con el valor inicial proyectado.

En todos los lugares y zonas donde hay mucha humedad es necesario la implementación de hormigones porosos para evacuar dicha humedad, ya sea superficial o subterránea que llegue al pavimento, puesto que nuestra ciudad se encuentra pasando por un periodo de crecimiento poblacional y consecuentemente de extensión de la mancha urbana, es propicio que las entidades competentes tomen en cuenta las alternativas del hormigón poroso para el diseño y construcción de las vías urbanas de tráfico liviano. Para que el funcionamiento de este material sea adecuado es necesario que los valores que se obtengan en campo sean, en lo posible, iguales a los establecidos en gabinete.

Los resultados de la evaluación que se realizarán sobre el hormigón poroso de pavimento, enfocado al contacto entre agregados y vacíos utilizando rayos X, serán valores que permitan a las entidades públicas evaluar el producto que han tenido u obtendrán sus mezclas de hormigones para ser utilizadas en pavimentos.

## **1.3 Diseño teórico**

### **1.3.1 Planteamiento del problema**

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

Dentro de las preocupaciones ambientales que generan inquietud en todos los países del mundo, la escasez de agua es lo que más afecta a nuestras ciudades. Esto se agrava por la pavimentación despreocupada de caminos, plataformas y áreas que rodean las edificaciones con concreto que no tiene nada de permeabilidad, lo que da como resultado fugas e inundaciones de un recurso tan valioso como el agua de lluvia, y la disminución de la capacidad de recarga natural de la misma.

Los pavimentos fabricados con hormigones, a los que se le quita gran parte del agregado fino, ofrecen una solución atractiva a problemas ambientales referidos a fugas de agua y a la recarga natural de esta. El problema radica en la práctica, aunque fabricamos hormigones porosos con mayor cantidad de vacíos no conocemos el comportamiento de estos internamente, si a través del diseño consideramos que estamos diseñando para un determinado porcentaje de vacíos y una cierta relación agregado-agregado, pero no los evaluamos, no sabemos en qué grado lo que está diseñado se produce en la mezcla real.

Es aquí, y debido a todo lo mencionado, donde se genera la necesidad de cuantificar con alta precisión los puntos de contacto de los agregados y el porcentaje de vacíos presente en hormigones porosos empleados en pavimentos.

#### **1.3.1.2 Problema**

Debido al impedimento de poder apreciar la estructura interna del hormigón poroso sin utilizar métodos destructivos que alteren la forma física del espécimen, ¿será posible realizar una evaluación que nos permita cuantificar el valor real del porcentaje de vacíos y el número de contactos entre las partículas de agregado-agregado presentes en el hormigón poroso a partir de tomografías de rayos X?

### **1.3.2 Objetivos**

#### **1.3.2.1 Objetivo general.-**

El objetivo principal es cuantificar el número y distribución del número de puntos de contacto agregado-agregado y determinar el porcentaje de vacíos presentes en especímenes de laboratorio, mediante el análisis de imágenes obtenidas a partir de Tomografía Computarizada con Rayos-X.

#### **1.3.2.2 Objetivos específicos.-**

- Realizar una sustentación de los aspectos teóricos que serán necesarios para el desarrollo de la investigación.
- Diseñar mezclas de hormigón poroso, con los diferentes porcentajes de vacíos establecidos teóricamente.
- Elaborar probetas de hormigón poroso con las especificaciones prescritas para los diferentes porcentajes de vacíos en cada una de las muestras.
- Tomar mediante un tomógrafo imágenes computarizadas de diferentes secciones de las probetas que nos permita observar la estructura interna de las muestras de hormigón poroso.
- Mediante las imágenes obtenidas realizar una determinación del valor real del porcentaje de vacíos presente en las muestras elaboradas.
- Realizar una comparación de los valores obtenidos con los teóricos que se utilizaron en el diseño de las mezclas.
- Determinar el número de contactos entre las partículas de agregado grueso que forman el esqueleto de las muestras.
- Establecer conclusiones y recomendaciones sobre la labor realizada al llevar a cabo la presente investigación.

### **1.3.3 Hipótesis**

Realizar la aplicación de tomografías computarizadas sobre probetas de hormigón poroso para obtener imágenes en diferentes secciones de los especímenes que muestren su estructura

interna, permitirá evaluar el verdadero porcentaje de vacíos presente y la cantidad de contactos existentes entre las partículas de agregado grueso en un espécimen de hormigón poroso de pavimento, datos que nos sirven para realizar un análisis comparativo entre los valores teóricos usados en el diseño y lo conseguido una vez materializadas las muestras.

#### **1.3.4 Variables**

**1.3.4.1 Variable Independiente.-** Tenemos como variables independientes el diseño y elaboración de probetas de hormigón poroso con agregado grueso y fino extraídos de bancos de nuestro medio y la dosificación de la mezcla porosa.

**1.3.4.2 Variable Dependiente.-** La variable dependiente de la investigación es la “evaluación del contacto agregado-agregado y la determinación del porcentaje de vacíos en muestras de hormigón poroso para pavimento a partir de la tomografía de rayos X”

El proceso consta en realizar ensayos con tomógrafo de rayos X sobre probetas de hormigón poroso elaboradas con agregados de nuestro medio y con dosificaciones diferentes y así poder contar con un instrumento que nos permita cuantificar la cantidad de contactos entre agregados y establecer el contenido de vacíos real en las muestras de hormigón poroso. El diseño y preparación de probetas se realizan para un determinado porcentaje de vacíos y una cierta relación agregado-agregado, el espécimen resultante será sometido a tomografías de rayos X para poder observar la situación interna de las partículas de agregado y el contenido de vacíos, con las imágenes conseguidas se logrará determinar con un mayor grado de exactitud las condiciones existentes en las que se encuentra la parte interior de la muestra y evaluar si la mezcla está de acuerdo a lo establecido en el diseño.

#### **1.3.5 Alcance**

Se presentará el origen del hormigón poroso, su evolución y como con el transcurrir del tiempo se fue expandiendo y adquiriendo importancia alrededor del mundo, conoceremos de qué manera se está aplicando en la actualidad y la aplicación que los ingenieros quieren que tenga en los próximos años. Para entender mejor la importancia de la investigación se mostrará las inquietudes que aquejan a muchos lugares del planeta por motivos ambientales, y así ver como el pavimento de hormigón poroso puede dar solución a las necesidades que se tienen con respecto a las fugas de agua y su conservación. Ya conociendo un poco más del hormigón poroso se planteará como objetivo de la investigación la determinación de la

cantidad de contactos que existen entre los agregados y la cuantía de vacíos presentes en mezclas de hormigón poroso, para cumplir con lo planteado se hará una revisión a conceptos que nos serán útiles; entre estos tenemos, al pavimento rígido y el hormigón con el que se fabrica las características de los agregados que se incluyen en estas mezclas, la dosificación para definir las características físicas de las muestras y la aplicación de rayos X. Cada uno de los puntos mencionados serán desglosados para poder obtener especificaciones que serán los límites bajo los cuales se desarrollará la investigación.

Una vez realizado todo el trabajo necesario con la sustentación teórica, pasamos al proceso de elaboración de probetas de hormigón poroso, éstas serán elaboradas conforme al diseño, que contará con tres tipos de mezclas, las cuales se diferenciarán por la relación de los agregados y el porcentaje de vacíos que se pretende obtener. Dichas probetas serán sometidas a pruebas de rayos X cuando estén completamente terminadas, adicionalmente se harán pruebas de resistencia y la determinación de la tasa de infiltración como complemento a la investigación.

Una vez que se cuente con las imágenes que muestren la estructura interna de las probetas de hormigón poroso se dará inicio a la cuantificación visual del número de contacto entre agregados y la cantidad de vacíos que contienen las muestras y así saber en qué grado lo que está diseñado se produce en la mezcla.

En el primer capítulo se hará una reseña histórica que nos introduzca en el surgimiento y desarrollo de las mezclas porosas y cuál es su aplicación actualmente. A continuación se desarrollará la justificación donde se exponen todas las razones que nos parezcan de importancia y nos motiven a realizar la investigación. Posteriormente, se expondrán las problemáticas originadas por la falta de un método de evaluación que se aplique a materiales con las características del hormigón poroso. Ya estando un poco más empapados con el tema del hormigón poroso pasamos a definir el objetivo general de la investigación y los objetivos específicos que representen los pasos que se deben realizar para alcanzar el objetivo general, consiguientemente se planteará la hipótesis que estará basada en la información previa e intentará dar solución al problema planteado, una vez que se encuentren definidos los puntos mencionados será posible establecer las variables que deberán ser determinadas en el transcurso del desarrollo de la investigación.

Para reforzar la investigación tenemos que repasar algunos conceptos que nos serán útiles para lograr un mejor desarrollo, en este sentido se hará una revisión de las características del pavimento rígido que cuenta como uno de sus componentes con el hormigón, a la vez se expondrán dos conceptos sobre tipos distintos de hormigón, nos referimos al hormigón convencional y al hormigón poroso, esto ayudará a ver de manera mucho más clara, cuales son las diferencias entre estas dos mezclas y las propiedades en los diferentes estados del hormigón poroso de pavimento .

Al momento de introducirnos en el tema de hormigón para pavimento, nos detendremos en el análisis de uno de sus componentes más esenciales, nos referimos a los agregados, donde se verá los parámetros que se utilizarán para elaborar mezclas de hormigón poroso y las propiedades físicas que poseen sus partículas. Otro punto que será observado será la presencia de vacíos en mezclas de hormigón y por último un repaso sobre la aplicación de rayos X en muestras de hormigón.

En cuanto a la aplicación práctica investigativa, es en el capítulo 3 donde se obtendrán datos y resultados para llevar a cabo la investigación, para esto, tendremos que definir los bancos de extracción de los materiales y sus características y así poder hacer posteriormente una caracterización individual de las gravas, arenas y el cemento. Con los resultados ya obtenidos se pasará a la definición de las distintas dosificaciones que se establecerán para la elaboración de probetas con tres diferentes tipos de mezclas, ya en el proceso constructivo, se tendrán en cuenta todos los pasos y cuidados para que las muestras obtengan las características deseadas. Una vez transcurrido el periodo de elaboración, se someterá los especímenes a la aplicación de rayos X mediante un tomógrafo para poder obtener imágenes en diferentes secciones que nos muestren la situación interna de las partículas de los agregaos y su contenido de vacíos

Ya terminados los procesos de fabricación y de recolección de datos, se procederá a evaluar los datos utilizando las imágenes computarizadas resultantes de la aplicación de rayos X, éstas serán los instrumentos sobre los cuales se evaluará el grado en que la mezcla cumple con lo establecido en el diseño y para continuar con esta evaluación será necesario realizar una cuantificación de los contactos entre agregados y el porcentaje de vacíos presentes en las mezclas de hormigón poroso producidas.

Una vez que se ha logrado cumplir con el objetivo de la investigación, corresponde al capítulo 4 dar a conocer las conclusiones que serán el resultado final de la evaluación realizada y las recomendaciones basadas en la experiencia adquirida durante este proceso.

## **1.4 Diseño Metodológico**

### **1.4.1 Unidad**

La unidad de análisis sobre la cual se realizarán los estudios correspondientes a la investigación serán los hormigones Porosos para pavimentos.

### **1.4.2 Población**

La población a la cual estará dirigida la investigación son los hormigones porosos para pavimentos rígidos utilizando agregados de nuestra región.

### **1.4.3 Muestra**

Se tendrá como muestra para realizar las pruebas de tomografía a 30 probetas de hormigón poroso elaborado con 3 distintos porcentajes de vacíos y consiguiente dosificación.

### **1.4.4 Medios**

Los medios que se utilizarán para lograr determinar las variables y cumplir con el objetivo principal son:

- Laboratorio de suelos.
  - Análisis granulométrico
  - Peso unitario y vacíos
  - Desgaste de los agregados
  - Gravedad específica y absorción
- Tomógrafo de rayos X
- Prensa de Hormigón

### **1.4.5 Métodos**

Debido a que la investigación depende de una ciencia que estudia los fenómenos observables y tiene que ser desarrollada con un método que parta de la experiencia, la investigación queda definida como experimental.

## **CAPÍTULO II: ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE LA EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE VACÍOS Y CONTACTO AGREGADO-AGREGADO EN HORMIGONES POROSOS PARA PAVIMENTO**

### **2.1 Generalidades**

El término Concreto Permeable, típicamente se describe como un concreto sin revenimiento (asentamiento), material con granulometría abierta que consiste de cemento portland, agregado grueso, poco o nada de agregado fino, aditivo y agua. La mezcla de estos ingredientes produce un material endurecido con alto contenido de poros interconectados con tamaños promedios de 2 a 8 mm que permite que el agua pase fácilmente a través de su estructura porosa. El contenido de vacíos puede variar de 15 a 25%, con distintos esfuerzos a la compresión.

Los ingenieros concluyeron que el escurrimiento ocasionado por el desarrollo de las urbes tiene el potencial de generar escurrimientos que fluyen en volúmenes y tasas más altas, dando lugar a inundaciones aguas abajo y erosionando los suelos.

El pavimento de concreto permeable reduce el impacto del desarrollo urbano mediante la reducción de las tasas de escurrimiento, la protección y conservación del agua de lluvia.

### **2.2 Características de los Pavimentos Rígidos.**

Por lo común, un pavimento rígido consta de una losa de concreto de cemento portland que se apoya sobre una capa subbase, esta última puede ser omitida cuando el material de la subrasante es granular, la losa posee características de viga que le permiten extenderse de un lado a otro de las irregularidades en el material subyacente. Cuando se diseñan y se construyen con propiedad, los pavimentos rígidos proporcionan muchos años de servicio con un mantenimiento relativamente bajo.

### **2.3 Hormigones en Pavimentos Rígidos**

El concreto es una mezcla de cemento, agua, arena y grava que se mantiene trabajable durante un determinado tiempo, generalmente dos horas y después comienza a endurecer hasta desarrollar la resistencia que soporta la estabilidad de las estructuras.

El concreto fresco, se puede definir como una suspensión concentrada de sólidos en una pasta cementante; algunos concretos pueden ser desmoldados inmediatamente después de su compactación y resistir pesadas cargas en estado fresco, ser elevados y colocados con bandas transportadoras, bombeados a largas distancias y alturas, ser neumáticamente esparcido, fluir a través de canalones, fluir como líquidos sin segregación en su estado fresco. Esto se puede lograr variando las características reológicas [estudio de los principios físicos que regulan el movimiento de los fluidos] del concreto fresco.

Existen diferentes tipos de concreto basados en su resistencia a la compresión:

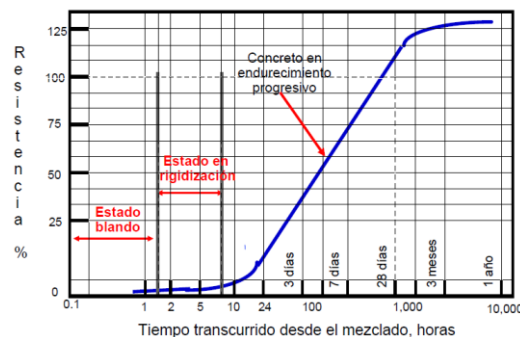
- resistencia baja (hasta  $200 \text{ kg/cm}^2$ )
- resistencia media ( $> 200$  a  $400 \text{ kg/cm}^2$ )
- resistencia alta (mayor de  $400 \text{ kg/cm}^2$ )

La calidad del concreto está en función de la calidad de la pasta de cemento, a su vez, ésta depende de cuatro factores fundamentales:

- relación agua/cemento
- contenido de cemento
- tipo de cemento
- curado

En la siguiente gráfica se ilustran los diferentes estados del concreto, con respecto al tiempo transcurrido y la resistencia que se alcanza.

**Figura 2. 1 Curva de resistencia en función del tiempo**



Ahora bien, las propiedades de resistencia en el concreto permeable dependen del contenido del material cementante, la relación agua-cemento, el nivel de compactación, la granulometría y la calidad del agregado. Aunque el concreto permeable se ha ocupado por más de 20 años, principalmente como pavimento, sus aplicaciones son de uso limitado, las investigaciones realizadas al respecto, hasta el momento han arrojado poca información relevante en el uso y aplicación de este material en problemas reales. Actualmente existen pocos procedimientos estándares para fabricar y ensayar especímenes de concreto permeable en el laboratorio o campo, sin embargo contamos con la disponibilidad del reporte del Comité 211 del Instituto Americano del Concreto “ACI”, por lo que se ha optado de manera práctica tomar como base de sustento de la investigación al Reporte ACI 211.3R-02 “Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete”

### **2.3.1 Hormigón Poroso**

El hormigón poroso es un tipo especial de concreto con una elevada porosidad, usado para aplicaciones en superficies de concreto que permite el paso de agua proveniente de precipitaciones y otras fuentes, reduciendo la escorrentía superficial de un sitio y recargando los niveles de agua subterránea. La alta porosidad se obtiene mediante un alto contenido de vacíos interconectados. Normalmente el concreto permeable tiene pocos o no tiene agregados finos y tiene la suficiente cantidad de pasta de cemento para cubrir las partículas de agregado grueso, preservando la interconectividad de los vacíos. El concreto permeable es usado tradicionalmente en áreas de estacionamiento, áreas con poco tráfico, pasos peatonales e invernaderos. Es una importante aplicación para la construcción sostenible.

#### **2.3.1.1 Propiedades en estado fresco**

El estado fresco del concreto permeable comprende desde el momento del mezclado del concreto hasta el momento del proceso de endurecimiento inicial, manteniendo las características de trabajabilidad, de tal manera que permiten realizar las operaciones del mezclado, transporte, colocación, compactación y acabado.

##### **2.3.1.1.1 Consistencia (Revenimiento)**

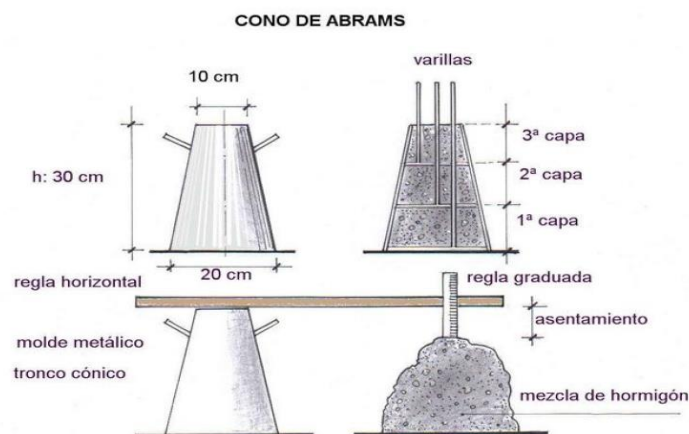
El revenimiento es la medida de la consistencia del concreto fresco en términos de disminución de altura. Para una proporción dada de cemento y agregado, sin aditivos, cuanto mayor sea el revenimiento, más húmeda es la mezcla. La mezcla de concreto permeable en

estado fresco, a diferencia del concreto convencional, es mucho más rígida, generando un revenimiento que varía entre 0 a 2 cm.

Para efectuar el ensayo de Asentamiento debemos colocar un Tronco de cono de chapa (de 30 cm de altura y 20 cm de diámetro de base inferior y 10 cm de diámetro de base superior) sobre una superficie lisa, plana y no absorbente, se lo mantiene afirmado contra el piso, apoyando los pies sobre las orejas inferiores del dispositivo. El molde Tronco- Cónico se llena con la mezcla en tres capas iguales, compactadas con la varilla (de acero común liso de 16 mm de diámetro y 60 cm de largo) mediante 25 golpes enérgicos por capa, que atraviesan la capa a compactar, pero no las inferiores. Cuando se llega a la base superior se enrasa con cuchara dejando la superficie de hormigón lisa. Se levanta el molde tomándolo por las manijas superiores hasta dejar libre totalmente la mezcla en estudio.

Esta operación se efectúa inmediatamente después de completada la compactación y en forma vertical y gradual. La medición del Asentamiento se efectúa colocando una regla apoyada sobre el molde, la regla establece un plano de comparación horizontal a 30 cm de altura sobre el piso. Se mide con otra regla graduada el descenso producido en el punto central de la base superior con respecto a la altura original. El valor determinado es el Asentamiento.

**Figura 2. 2 Cono de Abrams**



Es importante destacar que los valores obtenidos de este ensayo no deben ser utilizados en las tablas de consistencia para hormigones convencionales, sino para asegurarse que la consistencia de la mezcla porosa ocasione un revenimiento menor a 20 mm.

### 2.3.1.2 Propiedades en estado endurecido

Principales características del concreto permeable en su estado endurecido:

- Resistencia a la compresión
- Contenido de vacíos
- Peso Unitario
- Capacidad de filtración o permeabilidad

#### 2.3.1.2.1 Resistencia a la compresión

La máxima resistencia medida de un espécimen de concreto a carga axial se la conoce como resistencia a la compresión y se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado ( $kg/cm^2$ ) a una edad de 28 días. Ahora bien, para determinar la resistencia a la compresión, se realizaran ensayos sobre las mismas probetas cilíndricas que serán sometidas a pruebas de rayos X mediante tomografías, donde la altura de estas sean el doble de su diámetro, los ensayos se realizarán utilizando la prensa hidráulica del Laboratorio de Suelos de nuestra Universidad.

La resistencia a la compresión de este tipo de concreto está determinada por fracción gruesa de los agregados.

La relación agua-cemento de la mezcla de concreto permeable de pavimento es vital para el desarrollo y la sustentabilidad de la resistencia a la compresión y la consolidación de la red de vacíos. Asimismo, es necesario considerar que entre más alta sea la relación agua-cemento, puede dar como resultado una adherencia reducida entre las partículas del agregado y puede presentar problemas durante su colocación.

Si en una mezcla de concreto permeable se presenta un alto contenido de pasta dará como resultado una estructura de porosidad baja. Un contenido de material cementante bajo dará como resultado una capa endurecida de pasta envolviendo al agregado y resistencia a la compresión reducida. El contenido óptimo de cementante depende del tamaño y granulometría del agregado por lo que será definido una vez establecido el tamaño de agregado que se empleará en la elaboración de las mezclas.

Para el ensayo de resistencia a la compresión los especímenes cilíndricos elaborados estarán previamente sumergidos en agua durante 28 días cumpliendo así el método de curado

húmedo, se removerán del sitio de curado para luego permitir que el agua drene por su estructura porosa. Finalizado este proceso, se procede a la colocación de las almohadillas en los extremos del espécimen, este se ubica en la máquina de ensayo a la compresión y se acciona el equipo, tomando el valor de carga máxima en la que falla el espécimen a la compresión, todo el procedimiento debe realizarse una vez que hayan transcurrido 24 horas después de sacarlos de la piscina de curado.

### **2.3.1.2.2 Contenido de Vacíos**

El contenido de vacíos es una propiedad elemental para que un pavimento fabricado a base de hormigón poroso cumpla con su labor primordial que es la de permitir el paso de agua a través de su estructura. Para que un hormigón de pavimento sea considerado poroso debe tener más del 15% de vacíos, se recomienda que este valor no exceda a 25% para que no afecte en la estabilidad de la mezcla, ya que un valor del porcentaje de vacíos incluidos en una mezcla de hormigón es inversamente proporcional a su resistencia.

El contenido de vacíos de las mezclas porosas será cuantificado mediante la aplicación de rayos X, adicionalmente se realizará un ensayo de contrastación que nos sirva como parámetro para poder observar la diferencia que existe entre la pruebas con tomografías y el ensayo.

El procedimiento del ensayo para determinar el porcentaje de vacíos en un hormigón poroso de pavimento en su estado endurecido se sujeta a los valores de la gravedad específica, relacionando la gravedad específica bulk o peso unitario con la gravedad específica máxima teórica, que es la relación entre la masa de un volumen de mezcla sin compactar y sin tener en cuenta los vacíos que quedan entre las partículas, que a la vez éstas tienen que ver con la densidad del agua a ciertas temperaturas.

$$Va = 100\left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right)$$

Dónde:

*Va*: Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada respecto al volumen del espécimen.

*Gmm*: Gravedad específica máxima teórica.

*Gmb*: Gravedad específica bulk del espécimen compactado.

### 2.3.1.2.3 Peso Unitario

El Peso Unitario de las mezclas de concreto permeable es aproximadamente 70% del peso volumétrico de las mezclas de concreto convencional, de esta manera el peso volumétrico del concreto depende del porcentaje de vacíos por lo que varía entre los 1600 a 2300  $kg/m^3$  dependiendo el tipo de mezcla.

Para poder establecer el peso unitario de la mezcla porosa de pavimento una vez que esté endurecida, se procederá prácticamente de la misma manera que para la determinación del peso unitario de la mezcla en estado fresco, nos referimos a que tendremos que determinar, el volumen total, equivalente al volumen interno del molde donde se elaboran los especímenes y el peso de cada uno de ellos para establecer el peso por unidad de volumen para cada una de las tres mezclas que se realizarán. Con el equipo necesario disponible en laboratorio se hará uso de las siguientes ecuaciones:

$$V_t = \left[ \frac{\pi}{4} D^2 \right] * h \qquad P.U. = \frac{P_e}{V_t}$$

Dónde:

*V<sub>t</sub>*: Volumen del molde ( $m^3$ )

*D*: Diámetro del molde (m)

*h*: altura del molde (m)

*P<sub>e</sub>*: Peso del espécimen (kg)

*P.U.*: Peso unitario del hormigón poroso en estado endurecido ( $kg/m^3$ )

### 2.3.1.2.4 Capacidad de filtración o permeabilidad

La capacidad que presenta un material de permitir que un fluido lo atravesase sin alterar su estructura interna, se conoce como capacidad de filtración o porosidad, sin embargo, es necesario resaltar que al realizar el proceso de filtración la estructura interna del material no se altera y permanece sin ningún cambio en su estructura original.

Para que un material sea poroso debe contener espacios vacíos o poros que permitan la absorción del fluido, a su vez, tales espacios deben estar interconectados para que el fluido disponga de caminos para pasar a través del material.

Una de las características más importantes del concreto permeable es su capacidad para filtrar el agua a través de su estructura. La capacidad de filtración del concreto permeable está relacionada directamente con el contenido de huecos de aire. Estudios y pruebas han demostrado que se requiere un contenido mínimo de huecos de aire de aproximadamente 15% para lograr una filtración significativa. Puesto que la capacidad de filtración se incrementa a medida que se incrementa el contenido de huecos de aire, consecuentemente, disminuye la resistencia a la compresión, por lo que el proporcionamiento de la mezcla debe satisfacer un equilibrio entre una capacidad de filtración y resistencia a la compresión aceptable.

La permeabilidad es la aplicación más importante que tiene el hormigón poroso de pavimento, y puesto que la investigación se enfoca por una parte a la evaluación del porcentaje de vacíos en este tipo de mezclas, es necesario determinar la tasa de infiltración que puede atravesar los especímenes elaborados en laboratorio. La prueba tiene como objetivo determinar la tasa de infiltración para un flujo de agua a través de una mezcla de hormigón poroso y se deben seguir los pasos puntualizados a continuación.

1. Primeramente se colocan en una probeta de 3.80 cm. de diámetro un volumen de 250 ml de agua.
2. Se colocan los especímenes de concreto A, B, C, por ser mezclas con distintas dosificaciones y consecuentemente distinto porcentaje de vacíos, sobre dos superficies planas.
3. Se sellará con parafina en una de las caras externas un anillo de lámina de 15 cm de diámetro interior y 5 cm de altura
4. Se comienza a vaciar el agua a velocidad constante sobre cada mezcla, midiendo con un cronómetro, el tiempo en que se filtra el agua al 100%.

Teniendo registrado el tiempo que tarda en escurrir el total del agua se puede calcular la tasa de filtración de la siguiente manera:

$$Tf = \frac{Vw}{t}$$

Dónde:

*Tf*: Tasa de filtración (lt/min/m<sup>2</sup>)

*Vw*: Volumen de Agua (lt.)

*t*: Tiempo que tarda en escurrir el 100% del agua (seg.)

## **2.4 Aplicación del Hormigón Poroso en pavimentos**

La principal ventaja del hormigón poroso en comparación con el concreto convencional es su porosidad y su consecuente permeabilidad, aunque su comportamiento físico es superior en muchos aspectos, el hormigón poroso tiene limitaciones que deben ser tomadas en cuenta al considerar su aplicación en pavimentos, en especial debemos saber que la resistencia de enlace entre sus partículas es más baja que en el concreto convencional y por lo tanto proporciona una resistencia a la compresión reducida.

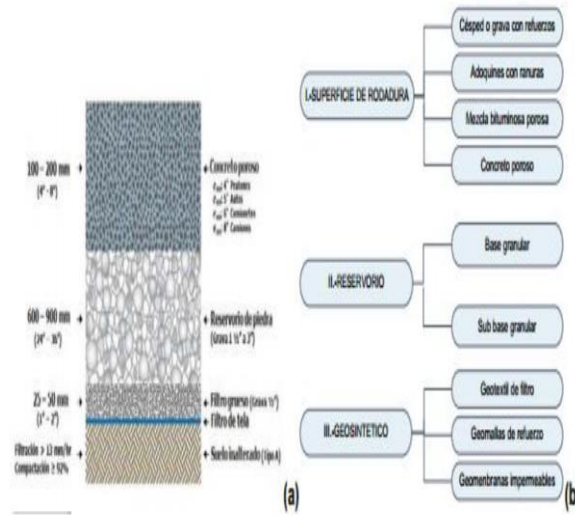
Puesto que el uso del hormigón poroso en el Mundo es bastante reciente y se siguen realizando experimentaciones de su uso en pavimentos, hay una gran incertidumbre sobre la eficacia de su aplicación, sin embargo existen antecedentes que demuestran buenos resultados de su aplicación en pavimentos de vías urbanas de tráfico liviano. El aumento de la fricción, la eliminación del hidroneo, la disminución del ruido, el mejoramiento del drenaje para conducir aguas pluviales, la eliminación de la reflexión y la óptima permeabilidad son las características funcionales más importantes que brinda el hormigón poroso empleado en pavimentos.

El concreto permeable se utiliza sin refuerzo, debido a que su porosidad le propenso al acero a la oxidación por agentes externos. Se debe tener una limpieza periódica de este material para prevenir el atascamiento incrementando los costos de mantenimiento.

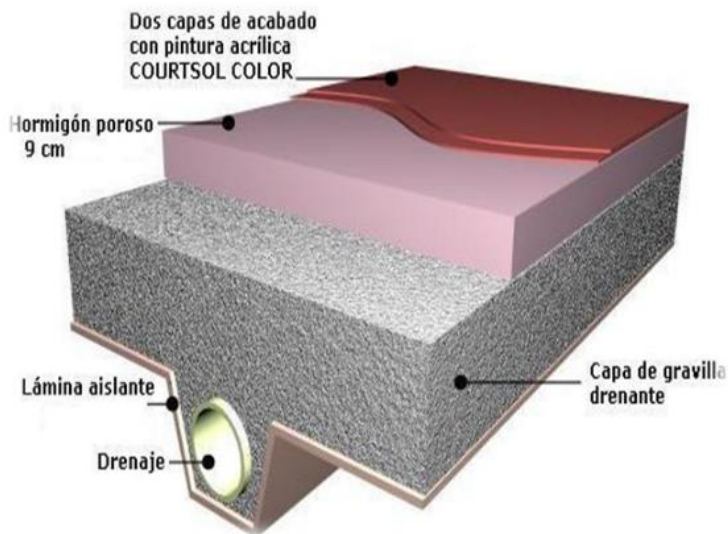
La Asociación Norteamericana de Pavimentos de Concreto (American Concrete Pavement Association, ACPA) recomienda, para que el funcionamiento de los pavimentos de hormigón poroso sea el más óptimo, que cuente con una capa subyacente de piedra triturada que funciona como reservorio, recoge las aguas lluvias y las almacena hasta que se infiltren en el subsuelo. El uso de este sistema de pavimento requiere estar compuesto por tres partes, superficie de rodadura de hormigón poroso con un espesor que puede variar entre 10cm y

20cm, debajo sigue la base granular que varía de 60cm a 90cm de espesor que puede ser utilizado como reservorio del agua que se infiltra y finalmente un geosintético que dependerá si queremos infiltrar el agua al suelo (filtro de tela o geomalla) o almacenar el agua (geomembrana).

**Figura 2. 3 Composición un sistema estructural de una superficie permeable**



**Figura 2. 4 Elementos de un sistema estructural de superficies permeables**



Los ingenieros han utilizado el concreto permeable en pavimentos para:

- Capas de rodadura (Superficies de pavimento).-
- Base permeable y borde de desagües
- Hombros.
- Bases y Sub-bases para pavimentos
- Pavimentos de estacionamientos de poco tráfico cuando se desea que sea drenante.
- Pavimentos de plazas y parques.
- Andenes
- Filtros y drenajes para pavimentos de altas solicitudes de tráfico

### **Superficies de rodadura**

El concreto permeable puede ser utilizado como una superficie de rodadura para estacionamiento vehiculares o pequeños tramos de vías carreteras. Su uso está enfocado a lugares que tengan el requerimiento debido a tres factores:

- 1.- Zonas donde frecuentemente ocurren muchas tormentas que producen una rápida acumulación de volúmenes de agua lluvia, el uso de concreto permeable reduce el volumen de escorrentía.
- 2.- El agua retenida en el sitio recarga los mantos acuíferos; y
- 3.- El costo efectivo de utilizar concreto permeable sobre pavimentos convencionales es altamente mejorado con la disminución o eliminación de alcantarillas de agua lluvia

### **Estacionamientos vehiculares.**

El concepto de utilizarlo para estacionamientos es el de aprovechar la gran cantidad de agua lluvia precipitada y además de la escorrentía al área adyacente del lugar de estacionamiento. El hormigón poroso permite al agua infiltrarse al suelo. En Estados

Unidos la Agencia de Protección Medioambiental (Environmental Protection Agency, EPA) adoptó una política que recomienda el uso de pavimentos permeables como parte de sus Mejores Prácticas de Manejo (Best Management Practices, BMPs) para mitigar el problema de la escorrentía de agua lluvia en las comunidades.

El pavimento de concreto permeable en estacionamientos vehiculares también ha sido seleccionado en otros países como una solución integral al problema de pavimentos que

generan calor y que serviría para una Programa de Comunidades Frescas. La temperatura del aire sobre la superficie del pavimento de concreto permeable del estacionamiento es más fresca que la de un pavimento asfáltico. Además está considerado como no contaminante al medio ambiente.

### **Carreteras**

El concreto permeable para carreteras es usualmente considerado para dos aplicaciones como son:

- a) Bases drenantes o material de sub base
- b) Superficie de carretera o superficie de fricción.

En ambas categorías aunque las características de drenaje son propiedades necesarias, los requisitos de resistencia pueden variar dependiendo de la ubicación del material en la sección del pavimento. Una base de concreto permeable drena el agua que normalmente acumularía debajo de un pavimento. Este tipo de construcción ayuda a reducir el bombeo de material fino de la subrasante que podría llevar a la falla en el pavimento.

### **Drenajes laterales**

En algunos estados de EEUU, los departamentos de transporte han creado estándares para la construcción de bases drenantes y drenajes laterales usando concreto permeable.

California, Illinois, Oklahoma y Wisconsin tienen dichas especificaciones estándar. En estas aplicaciones el concreto permeable usualmente es de muy baja resistencia (70 kg/cm<sup>2</sup> [1000 psi]), y es utilizado juntamente con un geotextil no tejido.

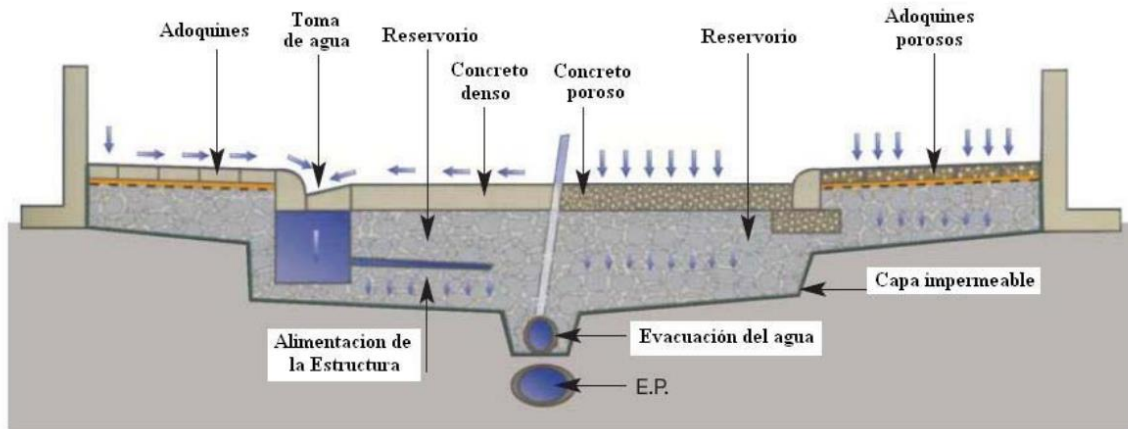
Un sistema similar utilizado en estabilización de taludes.

### **Hombros**

Los hombros de concreto permeable han sido utilizados en Francia en un esfuerzo por reducir el bombeo debajo de los pavimentos de concreto. Los aditivos incorporadores de aire son utilizados para incrementar la resistencia al hielo – deshielo. Se ha experimentado que la porosidad cercanamente al orden del 15 a 25% elimina el riesgo debido a deshielo, a menos que el concreto permita que se sature. Las resistencias a la compresión a menudo son menores que 140 kg/cm<sup>2</sup> (2000 psi) a 28 días.

Enfocados en la aplicación de los hormigones porosos como superficie permeable ya sea para peatones o vehículos, también se puede conformar un sistema completo conjugando distintos elementos como aceras y pavimentos para formar conjunto unificado que cumpla una misma función.

*Figura 2. 5 Sistema permeable compuesto por diversos elementos porosos*



## 2.5 Agregados para pavimento Rígido

El agregado ocupa un volumen de entre el 70% a 80% de la masa del hormigón, es por ello que sus características tendrán un fuerte impacto en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido del mismo, así como en la durabilidad del pavimento. Se debe tener en cuenta no sólo la calidad de los componentes, sino la uniformidad en el tiempo de sus propiedades. Una variación en la granulometría o en el contenido de polvo, producirá un cambio en el contenido de agua de la mezcla para mantener la consistencia, y un incremento en el agua redundará en una pérdida de resistencia.

Básicamente, se puede indicar que los aspectos que definen el desempeño de un pavimento de hormigón están dados por la ausencia de fisuras y fallas, la rugosidad o confort de marcha, y la textura superficial que nos debe proveer adecuadas características de fricción con bajos niveles de ruido. Muchas de estas propiedades están directamente relacionadas con las características de los agregados.

### **2.5.1 Propiedades físicas de los agregados y del cemento**

A continuación se resumen las propiedades principales de los agregados que impactan en la calidad del hormigón y en el desempeño del pavimento en servicio, las cuales son las que usualmente se evalúan al momento de definir una fuente de provisión.

La forma y la textura superficial de las partículas de un agregado influyen en las propiedades del concreto fresco más que las del concreto endurecido. Las partículas con textura áspera, angulares o elongadas requieren más agua para producir un concreto trabajable que agregados lisos, redondeados y compactos. Además, las partículas de agregado angulares requieren más cemento para mantener la misma relación agua-cemento. Sin embargo, con la granulometría satisfactoria, tanto los agregados triturados como los no triturados (de un mismo tipo de roca), generalmente, producen concretos con la misma resistencia, si se mantiene el contenido de cemento. Los agregados angulares o con granulometría pobre también pueden ser más difíciles de bombear. La adherencia entre la pasta de cemento y un determinado agregado generalmente aumenta con el cambio de partículas lisas y redondeadas por las ásperas y angulares. Cuando la resistencia a flexión es importante o cuando se necesite alta resistencia a compresión, se debe considerar este aumento de la adherencia al elegirse el agregado para el concreto. La cantidad de vacíos de los agregados fino y grueso compactados se puede usar como un índice de las diferencias en la forma y la textura de los agregados con la misma granulometría. La demanda de agua y cemento para la mezcla normalmente aumentan con el aumento de la cantidad de vacíos. Los vacíos entre las partículas de agregados aumentan con la angulosidad del agregado. El agregado debe ser relativamente libre de partículas planas y elongadas. Las partículas planas y elongadas se deben evitar o, por lo menos, limitar a cerca del 15% de la masa total del agregado. Este requisito es igualmente importante para el agregado grueso y para el agregado fino triturado, pues el agregado fino obtenido por la trituración de la roca frecuentemente contiene partículas planas y elongadas. Estas partículas de agregado requieren un aumento del agua de mezcla y, por lo tanto, pueden afectar la resistencia del concreto, principalmente a flexión, si no se ajusta la relación agua-cemento.

En cuanto a los ensayos de laboratorio que se realizarán sobre los agregados a utilizar en el diseño de la mezcla porosa para pavimento, se utilizarán las guías vigentes del laboratorio de suelos y serán los siguientes:

### **2.5.1.1 Análisis granulométrico del agregado grueso**

Dentro del análisis de los suelos, se encuentra el de la granulometría, que no es más que obtener la distribución porcentual de los tamaños de partículas que conforman un suelo. Esto se realiza con ayuda de un juego de mallas, que tienen un tamaño graduado establecido por las normas ASTM y AASHTO, en donde se obtienen los pesos retenidos para luego realizar posteriores cálculos y la curva granulométrica.

El objetivo es obtener el porcentaje de material que pasa en cada tamiz, para luego graficar una curva granulométrica y así tener una visión de la distribución del tamaño de los granos presentes en una masa de suelo

Si bien se realiza una distribución de tamaños, esto no incide en la forma que puedan tener los granos del suelo, ya que al retener material en una malla se observa diferentes tamaños y el porcentaje que se calcula está basado estrictamente en los pesos que se retiene en la malla, referido al peso total que se utiliza en el ensayo.

El factor fundamental del ensayo es la curva granulométrica, que se dibuja en una escala logarítmica, ya que de no ser así, la representación gráfica tendría que usar una escala demasiado grande.

La muestra para realizar este ensayo deberá ser representativa, la cual se obtiene mediante cuarteo. El peso de la muestra de agregado fino necesario para el ensayo deberá ser de unos 500 gramos y para el agregado grueso deberá estar de acuerdo con el siguiente cuadro:

***Cuadro N° 1: Peso de la muestra para granulometría del agregado grueso***

<b>Tamaño máximo de partículas en pulgadas</b>	<b>Peso mínimo de la muestra en gramos</b>
3/8	1000
1/2	2500
3/4	5000
1	10000

1 1/2	15000
2	20000
2 1/2	25000
3	30000
3 1/2	35000

*fuentes: Guía de ensayos del Laboratorio de Suelos U.A.J.M.S.*

Para realizar correctamente el ensayo hay que seguir el procedimiento descrito a continuación.

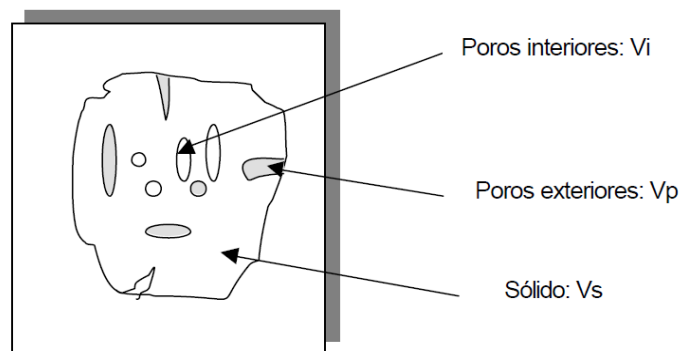
- Se debe poner a secar la muestra en el horno a 105° durante al menos 12 horas. Se deja enfriar a temperatura ambiente y se pesa la cantidad requerida para hacer la prueba.
- Se desmoronan los grumos del material con un rodillo de madera.
- Se coloca el juego de tamices desde el tamaño correspondiente al tamaño máximo hasta el tamiz N°200 y al final la base.
- Se agita todo el juego de mallas, horizontalmente con movimientos de rotación y verticalmente con golpes de vez en cuando. El tiempo de agitado depende de la cantidad de finos en la muestra pero por lo general debe ser mayor a 15 minutos.
- Para el agitado de las mallas es muy conveniente el uso de un agitador mecánico (Rop-Tap).
- Se quita la tapa y se separa la malla, vaciando la fracción de suelo que haya sido retenida en ella sobre papel bien limpio, a las partículas que han quedado trancadas en los hilos de la malla no hay que forzarlos a pasar a través de ella; inviertase el tamiz y con la ayuda de una brocha o cepillo de alambre despréndase y agréguese a las depositadas en el papel.
- Se pesa cuidadosamente la fracción de la muestra obtenida anteriormente, se pone en una cápsula, se guarda esta fracción de muestra hasta el final de la prueba, para poder repetir las pesadas en caso de error.
- Se hacen las pesadas de las fracciones retenidas en cada malla y en la base del fondo, procediendo en la forma indicada. Todos los pesos de anotan en el registro.

### 2.5.1.2 Peso específico y Absorción del agregado grueso

La determinación de las relaciones peso - volumen de un material representan uno de los factores principales en la dosificación de las mezclas de hormigón.

En el caso de los agregados es importante considerar que debido a su constitución interna y externa el volumen de las partículas no es el de un sólido ya que el material posee tanto vacíos interiores (poros no saturables) como vacíos exteriores (poros saturables) como indica la figura II.3.

*Figura 2. 6 Constitución interna y externa de un agregado*



Para la realización de los cálculos de las mezclas es de gran utilidad utilizar solo los valores numéricos de las densidades de los agregados para lo cual éstas se dividen por la densidad del agua. Esta relación se conoce como densidad relativa o gravedad específica o peso específico.

El porcentaje de absorción se define como la capacidad que tiene el agregado para almacenar agua en sus poros saturables y no saturables; también se define como la cantidad de agua absorbida por el agregado después de ser sumergida durante 24h en agua, expresada como un porcentaje del material seco.

La porosidad está relacionada con la capacidad de absorción de agua de los agregados y varía de acuerdo con el tamaño de los poros, su continuidad y su volumen total. Para cuantificar la influencia de la porosidad dentro del agregado se mide su capacidad de absorción la cual tiene que ver con el estado en que se encuentra el material al momento de la medición.

Experimentalmente se comprueba que un agregado puede estar en una de las siguientes condiciones de humedad: a) seco totalmente, b) saturado internamente y seco superficialmente, c) saturado tanto interna como externamente y d) totalmente húmedo. En el primer caso, la capacidad de absorción es máxima y su determinación indica la absorción total del material. En el segundo caso la absorción es superficial, en el tercero no absorbe agua y en el cuarto aporta agua superficial. Una absorción total demasiado alta puede ser indicio de un desempeño inadecuado del agregado en el hormigón.

El equipo necesario para la realización de este ensayo es:

1. Una balanza que tenga 5 kg. de capacidad o más, y sensibilidad de 0.5 gr.
2. Cesto cilíndrico de tela metálica (la cesta deberá ser hecha de malla metálica N°4) de 20 cm. de diámetro y de 20 cm de altura.
3. Un recipiente en el que se pueda sumergir la cesta de alambre y un aparato para suspender la cesta cuando se sumerge, con el fin de obtener el peso de la muestra sumergida.

El procedimiento del ensayo debe realizarse con una muestra de aproximadamente 5 Kg de material que quede retenido en el tamiz 3/8" y contempla los siguientes pasos:

- Se lava el material con el fin de remover el polvo o cualquier impureza que cubra la superficie de las partículas, luego se sumerge la muestra con agua por un periodo de 24 horas.
- Se saca la muestra del agua y se secan las partículas con una toalla hasta que la película de agua haya desaparecido de la superficie. Se deberá evitar la evaporación durante esta operación.
- Se obtiene después el peso de la muestra con sus partículas saturadas.
- La muestra se vuelve a sumergir después de ser pesada y se determina el peso de la muestra así sumergida.
- Se seca la muestra en un horno a temperatura constante (105°) y luego se deja enfriar y se pesa.

Habiendo anotado los pesos en las distintas condiciones se pasa a determinar el peso específico a granel, en condición saturado y superficie seca, aparente y el porcentaje de absorción utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\text{Peso Específico a granel} = \frac{A}{B - C}$$

Dónde:

A: Peso de la muestra secada en Horno (gr)

B: Peso de la muestra saturada pero con superficie seca (gr)

C: Peso de la muestra saturada dentro del agua (gr)

$$\text{Peso Específico en condición Saturado y superficie seca} = \frac{B}{B - C}$$

(-C): Este término es la pérdida de peso de la muestra sumergida y significa por lo tanto el volumen de agua desplazado o sea el volumen de la muestra

$$\text{Peso Específico Aparente} = \frac{A}{A - C}$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{B - A}{A} * 100$$

### 2.5.1.3 Peso unitario del agregado grueso

El peso unitario se define como la relación entre el peso sólido y el volumen ocupado por el material cuando se coloca dentro de un recipiente estándar de peso y volumen conocidos. Para un mismo agregado si el peso unitario disminuye es porque hay más espacios vacíos que se deben llenar con pasta lo que afecta el costo y el comportamiento del hormigón en el tiempo.

El peso unitario depende de la granulometría del agregado, la forma de las partículas y del nivel de compactación utilizado para colocar el material en el molde.

Este ensayo tiene como objeto describir cómo se puede obtener el peso unitario de los agregados y de las mezclas de agregados a temperatura ambiente. Se debe utilizar una muestra representativa del agregado, por ningún motivo esta debe secarse en el horno, es decir a humedad ambiente

El equipo que se requiere consta de:

1. Balanza sensible al 0.5% del peso de la muestra
2. Una varilla de 5/8" de diámetro y unos 60 cm de largo
3. Un juego de moldes cilíndricos. El tamaño del molde cilíndrico que se debe usar depende del tamaño máximo de las partículas.

Para agregados con partículas de un diámetro  $\leq 1/2$ " se usa un molde de 1/10 de pie cúbico. Para agregados con partículas de un diámetro entre  $1/2$ " y  $1 1/2$ " se usa el molde de  $1/2$  pie cúbico

Para agregados con partículas de un diámetro  $\geq 1 1/2$ " se usa un molde de 1 de pie cúbico. Los pasos a seguir para realizar correctamente el ensayo se encuentran a continuación

- Se llena el molde hasta una tercera parte de su capacidad, nivelándose el agregado con las manos. Luego por medio de la varilla se apisona esta capa uniformemente 25 veces, sin golpear el fondo del molde
- Se repite el procedimiento anterior dos veces hasta llenar el molde. Las partículas de la superficie se deben enrasar con la varilla teniendo como guía el borde del molde.
- Se pesa el molde junto con el agregado.

Conocidos los pesos del molde, del molde junto al agregado y el volumen del molde se reemplaza en la siguiente ecuación

$$P.U. \text{ del agregado grueso} = \frac{P_{ma} - P_m}{V_m}$$

Siendo:

*Pma*: Peso del molde con el agregado (kg)

*Pm*: Peso del molde

*Vm*: Volumen del Molde (transformar las unidades a m<sup>3</sup>)

#### 2.5.1.4 Porcentaje de desgaste del agregado grueso

La determinación del porcentaje de desgaste del agregado grueso se realizará por medio de la máquina de los ángeles. La máquina de desgaste de los ángeles consiste de un cilindro o tambor hueco de acero, cerrado en ambos extremos, este cilindro tiene las siguientes dimensiones interiores: 70 cm (28") y 50 cm (20") de largo. El tambor además tiene una puerta lateral pequeña por donde se introduce la muestra, el tambor debe ser montado en forma adecuada y acoplado a un motor de 1 HP de potencia aproximadamente, en forma tal que el número de revoluciones del tambor sea de 30 a 33 por minuto. Además de esta máquina se requiere de otros equipos para el ensayo.

1. Máquina de desgaste de los ángeles
2. Un juego de tamices de abertura cuadrada de la serie standard de los siguientes tamaños: 3", 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub>", 2", 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub>", <sup>3</sup>/<sub>4</sub>", <sup>3</sup>/<sub>8</sub>", y números 4, 8 y 12.
3. Horno de temperatura constante 105°C
4. Balanza con capacidad de 5 kg y sensibilidad de 0.1 gr.

La carga de desgaste que debe llevar la máquina de los ángeles consistirá de bolas o esferas de acero de 1 <sup>7</sup>/<sub>8</sub>" de diámetro y cuyo peso puede variar entre 390 y 445 gr.

El número de bolas de acero que se usará depende de la gradación de la muestra de ensayo y será como sigue:

**Cuadro N° 2: Número de esferas y peso de la muestra en función a la gradación para el ensayo de desgaste con la máquina de los ángeles**

Gradación	N° de esferas	Peso de la carga (gr.)
A	12	5000+25
B	11	4584+25

C	8	3330+20
D	6	2500+15
E	12	5000+25
F	12	5000+25
G	12	5000+25

*fuentes: Guía de ensayos del Laboratorio de Suelos U.A.J.M.S.*

La muestra de ensayo consistirá en un agregado limpio que ha sido secado en un horno a 105°C hasta tener un peso constante y tendrá una de las gradaciones que indica el cuadro siguiente. La gradación que se usa será la que más se aproxima a la del agregado bajo ensayo.

**Cuadro N° 3: Gradación de la muestra para el ensayo de desgaste con la máquina de los ángulos**

Tamaño del tamiz		Gradación y peso de la muestra de ensayo (gr)						
Pasa	Retenido sobre	A	B	C	D	E	F	G
3	2 1/2"	-	-	-	-	2500	-	-
2 1/2"	2"	-	-	-	-	2500	-	-
2"	1 1/2"	-	-	-	-	5000	5000	-
1 1/2"	1"	1250	-	-	-	-	5000	-
1"	3/4"	1250	-	-	-	-	-	-
3/4"	1/2"	1250	2500	-	-	-	-	5000
1/2"	3/8"	1250	2500	-	-	-	-	5000
3/8"	N°3	-	-	2500	-	-	-	-
N°3	N°4	-	-	2500	-	-	-	-
N°4	N°8	-	-	-	5000	-	-	-

*fuentes: Guía de ensayos del Laboratorio de Suelos U.A.J.M.S.*

A continuación se puntualiza el procedimiento del ensayo

- La muestra de ensayo y la carga se colocará en la máquina de desgaste de los ángeles y se pondrá en funcionamiento la máquina a una velocidad de 30 a 33 revoluciones por minuto. Para las gradaciones A, B, C la máquina se hará girar durante 500 revoluciones, para las gradaciones E, F y G se hará girar durante 1000 revoluciones, al final del ensayo el material será descargado de la máquina y se hará una separación preliminar en un tamiz N°12.
- El material que queda retenido en el tamiz N°12 deberá lavarse, secarse hasta que el peso sea constante en un horno de 105 a 110°C y pesarse con una aproximación al gramo.

Para el cálculo la diferencia entre el peso original (P) y el peso (Pf) de la muestra de ensayo será expresado como un porcentaje del peso original de la muestra de ensayo. Este valor será consignado como porcentaje de desgaste.

$$\text{Porcentaje de Desgaste} = \frac{P - Pf}{P} * 100$$

#### **2.5.1.5 Peso específico y absorción del agregado fino**

El ensayo que se describe a continuación tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua que absorbe el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje de peso.

La muestra se debe colocar dentro de un recipiente lleno de agua y se deja allí por un periodo de 24 horas, esta debe tener un peso de 1 kg. y que puede ser obtenida por cuarteo.

Para la realización del ensayo se debe contar con el siguiente equipo:

1. Balanza con capacidad de un kilogramo y sensibilidad de 0.1 gr.
2. Matraz de 500 ml de capacidad.
3. Molde cónico y una varilla.

El procedimiento para llevar a cabo un ensayo correcto viene descrito a continuación:

- Se saca la muestra del recipiente y se seca de manera uniforme.
- Con el fin de inspeccionar que tan seca está la muestra, se coloca primero en el molde cónico y luego se retira este. Si la humedad de la superficie de la muestra ha sido eliminada, la arena rodará libremente cuando se levante el cono.
- Por lo general, si la arena rueda libremente la primera vez que se coloca el cono, esto indica que la muestra ha sido secada más de lo necesario y que ha perdido su condición de saturada; por consiguiente, se deberá rociar con agua y dejarla reposar por 30 minutos antes de volver a colocarla en el cono.
- Se colocan 500 gr. de la muestra en el matraz y luego se llena este con agua hasta el tope. Con el fin de eliminar burbujas de aire presentes en el matraz, se rueda el matraz sobre si mismo y luego se coloca en un baño a temperatura constante de 20°C, luego se obtiene el peso del matraz lleno.
- Se vacía el peso del matraz en un recipiente y se pone a secar en el horno a una temperatura constante de 105°C y se pesará.

Teniendo registrado todos los datos, se procederá a calcular el peso específico en condición de saturado superficialmente seco y el porcentaje de absorción para la arena mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Peso Específico a granel} = \frac{A}{V - W}$$

Donde:

A: Peso en el aire de la muestra secada al Horno (gr).

V: Volumen del frasco (ml).

W: Peso en gramos o volumen en ml del agua agregado al frasco.

$$\text{Peso Específico en condición Saturado y superficie seca} = \frac{500}{V - W}$$

$$\text{Peso Específico} = \frac{A}{(V - W) - (500 - A)}$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{500 - A}{A} * 100$$

### 2.5.1.6 Modulo de finura de la arena

Los agregados constituyen alrededor del 75% en volumen, de una mezcla típica de concreto. El tamaño máximo y módulo de finura del agregado fino son importantes debido a su efecto en la dosificación, trabajabilidad, economía, porosidad y contracción del concreto. El ensayo tiene como objetivo determinar el módulo de finura del agregado fino para poder realizar su clasificación de acuerdo a los resultados. La muestra de agregado se deberá pesar después del secado y será aproximadamente 500 gramos.

El equipo necesario es el siguiente:

1. Balanza con sensibilidad de 0.001 gr.
2. Un juego de tamices de abertura cuadrada de la serie standard de los siguientes tamaños: # 4, # 8, # 16, # 30, # 50, # 100, # 200 y fondo.
3. Horno de secado de 110°C.
4. Cepillo para mallas.
5. Cucharon metálico.
6. Agitador mecánico Rop-Tap.

El procedimiento correcto para llevar un ensayo de manera adecuada está descrito a continuación:

- Secar la muestra a peso constante a una temperatura de 110 más menos 5 grados centígrados.
- Pesar la cantidad necesaria de muestra
- Acoplar los tamices en forma manual con la muestra y agitar mediante algún aparato mecánico (sacudidor de mallas) por un periodo suficiente.
- Registrar los pesos retenidos en cada malla.
- Efectuar cálculos de determinación de módulo de finura y clasificar al agregado fino.

MF < 2,3 Arena Fina
2,3 < MF < 3,1 Arena Mediana
MF > 3,1 Arena Gruesa

El módulo de finura es un indicador de la finura de un agregado, en este caso de la arena, cuanto mayor sea el módulo de finura, más grueso es el agregado.

El módulo de finura de la arena se calcula sumando los porcentajes retenidos acumulados en las mallas hasta el tamiz #100 y dividiendo el total entre cien.

$$MF_{arena} = \frac{\sum \% \text{ retenido acumulado}}{100}$$

### **2.5.1.7 Peso específico del cemento**

El cemento es un aglomerante hidráulico muy importante que amasado con agua fragua y endurece, tanto expuesto al aire como sumergido en agua, esto porque los compuestos resultantes de su hidratación son estables en esas condiciones. El objetivo de este ensayo es determinar el peso específico del cemento, valor que será utilizado específicamente para el diseño y control de la producción de mezcla de hormigón poroso de pavimento.

El equipo que se necesita es:

1. Un matraz normal de Le Chatelier
2. Kerosene (sin agua) o nafta que no sean más livianos que 62° A.P.I.
3. Balanza sensible al 0.001 gr.

El procedimiento del ensayo queda descrito a continuación

- Se llena el matraz con cualquiera de los líquidos ya especificados hasta que el nivel del líquido coincida con la graduación de 300 ml.
- Se coloca el matraz en un baño maría de temperatura constante, se lee en el cuello del matraz la graduación correspondiente al nivel del líquido (300 ml), una vez que éste se encuentre a temperatura constante.
- Se toma aproximadamente 64 gramos de la muestra de cemento y se van introduciendo poco a poco en el matraz teniendo cuidado de que estén a la misma temperatura del líquido, se debe evitar que el líquido salpique cuando se introduzca el cemento.

- Después de que todo el cemento haya sido introducido en el matraz se tapa este y se hace rodar en posición inclinado con el fin de eliminar el aire del cemento, se continúa hasta que se eliminen las burbujas de aire.
- Se coloca de nuevo el matraz en el baño maría a temperatura constante, el cual debe estar aproximadamente del ambiente, y se hace la nueva lectura cuando se haya observado que la temperatura en el líquido del matraz es constante.
- Se lee en el matraz la graduación correspondiente al nuevo nivel del líquido y se anota el dato.

Dentro del cálculo, la diferencia entre las cantidades que representa el nivel final y el nivel inicial del líquido nos da el volumen de líquido desplazado por el cemento usado en el ensayo, luego se aplica la fórmula:

$$P.E. \text{ cemento} = \frac{\text{Peso del cemento en gramos}}{\text{Volumen desplazado en ml}}$$

## **2.6 Porcentaje de Vacíos presente en el Hormigón**

El porcentaje de vacíos presentes en una muestra de hormigón poroso resulta fundamental para las propiedades que va a tener la mezcla, pues este define la tasa de infiltración o permeabilidad que se va a obtener, para asegurar que el agua escurra a través de la estructura, el comité 211 de la ACI establece que el porcentaje de vacíos debe ser igual o mayor al 15%, sin embargo nos recomienda que no exceda el 25% por motivos de estabilidad estructural

## **2.7 Diseño de mezcla para hormigón poros de pavimento**

En el apéndice 6 del Comité ACI 211.3R-02, 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. La investigación basará su metodología de dosificación en este reporte.

La relación agua/cemento es una importante consideración para mantener la resistencia y la estructura de vacíos del concreto. Una alta relación Agua/Cemento reduce la adhesión de la

pasta al agregado, y causa que la pasta fluya y llene los vacíos. Una baja relación Agua/Cemento tiende a causar bolas en el mezclador y evita una distribución uniforme. Los experimentos del comité muestran que un rango de 0.35 a 0.45 provee el mejor recubrimiento del agregado y estabilidad en la pasta, por lo que las mezclas de la investigación mantendrán una relación agua/cemento dentro de estos parámetros.

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. La cantidad de agregado depende de la densidad seca varillada y los valores  $b/b_0$  seleccionados de la Tabla 2.6.

**Cuadro N° 4: Volumen seco varillado de agregado en una unidad de volumen de hormigón**

Porcentaje de Agregado fino	$b/b_0$	
	ASTM C 33 Tamaño N°8	ASTM C 33 Tamaño N° 67
0	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

*fuentes: Guide for selecting proportions for No-Slump Concrete ACI*

El Método  $b/b_0$  para diseñar mezclas de concreto permeable puede ser dividido en una serie de ocho pasos:

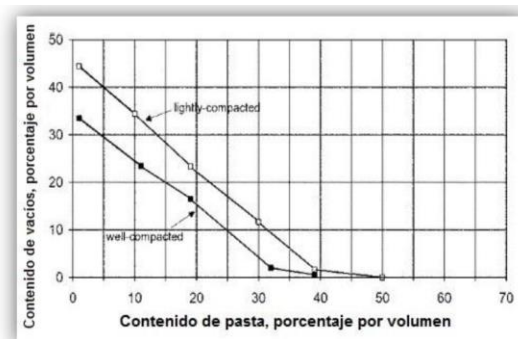
1. Determinación del peso del agregado ( $W_a$ )

$$W_a = \text{Densidad seca varillada} * \frac{b}{b_0}$$

2. Ajustar el peso en estado Saturado Superficialmente Seco (SSS) ( $W_{ssd}$ )

$$W_{ssd} = W_a * \% \text{ de absorción}$$

### 3. Determinación del volumen de la pasta (Vp)



Fuente: Comité ACI 211.3. Apéndice 6

Figura 2.6: Contenido de pasta en función al contenido de vacíos

### 4. Determinación del contenido cementante (C)

De la ecuación de Volumen de Pasta y relación agua/cemento:

$$Vp = \frac{c}{P.E.c} + \frac{W}{P.E.w} \quad ; \quad (w/c) = \frac{w}{c}$$

Dónde:

C: Cantidad de cemento dentro de la pasta (kg)

W: Cantidad de agua dentro de la pasta (kg)

P.E.c: Peso específico del cemento (kg/m<sup>3</sup>)

P.E.w: Peso específico del agua (kg/m<sup>3</sup>)

(w/c): Relación agua/cemento

Se despeja “w” de la ecuación de relación agua/cemento y se reemplaza en la fórmula de volumen de pasta, como ya está definida el valor de (w/c) y el volumen de pasta solo queda como variable incógnita “C”

### 5. Determinación del contenido de agua (W)

$$(w/c) = \frac{w}{c} \quad ; \quad w = (w/c) * c$$

### 6. Determinación del volumen sólido (Va)

$$V_a = \frac{W_{ssd}}{G.E. \text{ del agregado grueso}}$$

7. Determinación del volumen total de sólidos ( $V_s$ )

$$V_s = V_a + V_c + V_w$$

8. Evaluar el contenido de vacíos (%V)

Se restará el volumen total de sólidos al volumen de producción y se comprobará el porcentaje de vacíos.

$$\%V = \frac{V_p - V_s}{V_p} * 100$$

Dónde:

%V: Porcentaje de vacíos

$V_p$ : Volumen de producción

$V_s$ : Volumen total de sólidos

## 2.8 Elaboración de especímenes cilíndricos

Aquí se describe la manera de preparar las muestras de hormigón poroso de pavimento en laboratorio, para que después sean sometidas a la aplicación de rayos X, pruebas de permeabilidad y resistencia a la compresión, teniendo un control rígido tanto en el proceso de elaboración como en las cantidades de materiales usado. El equipo necesario para realizar esto es:

1. Balanza.
2. Varilla para apisonar el hormigón poroso de 5/8" de diámetro y 60 cm de longitud.
3. Moldes para los especímenes que se van a usar en los ensayos de compresión: cilíndricos de 6" de diámetro y 12" de longitud con placa de soporte.
4. Piscina para el curado de especímenes.

## 5. Mezcladora para preparar la mezcla.

Los materiales deben estar listos para ser mezclados y deben tener una temperatura igual a la del ambiente de laboratorio, aproximadamente entre 18 y 24°C.

El procedimiento del ensayo es el siguiente:

- Los materiales se pueden mezclar ya sea manualmente o por medio de una mezcladora; la cantidad de hormigón que se prepare debe ser tal que sobre aproximadamente en 10% después de llenar los moldes.
- Se mezcla el agregado fino con el cemento, luego se agrega el agregado grueso y se mezclan estos tres materiales completamente dentro de la mezcladora.
- Se agrega el agua y se mezcla con los otros materiales hasta obtener una mezcla homogénea de la consistencia deseada.
- Se vacía la primera capa dentro de los moldes con ayuda de las herramientas menores para no desperdiciar material, posteriormente se apisona la primera capa con el extremo redondeado de la varilla utilizando 25 golpes por capa en toda su profundidad y se distribuye uniformemente en la sección transversal del molde.
- Se golpea en los bordes de los moldes suavemente con el martillo de 10 a 15 veces con el fin de tapar cualquier orificio que haya quedado y sacar las burbujas de aire atrapadas.
- Se repite el mismo proceso con las demás capas, permitiendo que la varilla penetre hasta 12 mm de la capa inferior.
- Cuando se haya agregado la capa final y después de la compactación se debe adicionar la cantidad de concreto permeable necesario para llenar el molde
- Una vez que el molde este lleno, se enrasa la superficie utilizando la varilla de compactación quitando el exceso de concreto y dando una superficie homogénea y lisa evitando depresiones mayores a 3 milímetros.
- Si se quiere evitar la segregación en el hormigón, el contenido de la mezcladora se debe depositar en un recipiente con el objeto de remezclarlo por medio de un palustre o una pala.

- La consistencia se debe medir inmediatamente después de que se termine de preparar la mezcla basándose en el ensayo de asentamiento

## **2.9 Rayos X en muestras de hormigón**

La tomografía industrial computarizada es una técnica que permite el análisis no destructivo de piezas y materiales en todo su volumen.

En general, es una técnica que genera una imagen de una sección delgada transversal de una pieza. El haz de energía habitualmente de Rayos X y el detector están en el mismo plano que la superficie de la que se va a obtener la imagen.

La señal del detector se obtiene mientras la muestra gira en el eje perpendicular al plano considerado. Mediante un procedimiento de cómputo se calcula y representa la atenuación relativa de la energía del haz que pasa a través de las estructuras de la sección delgada de la pieza.

Posteriormente las imágenes de TC pueden ser procesadas mediante programas de análisis de imagen plana o tridimensional. Se puede utilizar un conjunto de imágenes de TC para caracterizar el volumen de la pieza, geometría, porosidad, fases materiales, grietas.

En este trabajo se presenta la aplicación de esta técnica a dos diferentes tipos de estudios:

- Determinación de porcentajes de vacíos en mezclas de hormigón poroso de pavimento.
- Cuantificación del número de contactos entre agregados y su distribución en especímenes de hormigón poroso de pavimento.

La aplicación de esta técnica es de gran interés para diferentes tipos de estudios no sólo en el campo de aplicación industrial sino también en investigaciones que permitan obtener información más detallada, de forma menos costosa y a veces imposible de obtener por otros medios.

La tomografía industrial computarizada puede ser una herramienta de gran ayuda para el investigador o el ingeniero a la hora de caracterizar o simular el comportamiento mecánico de materiales y piezas.

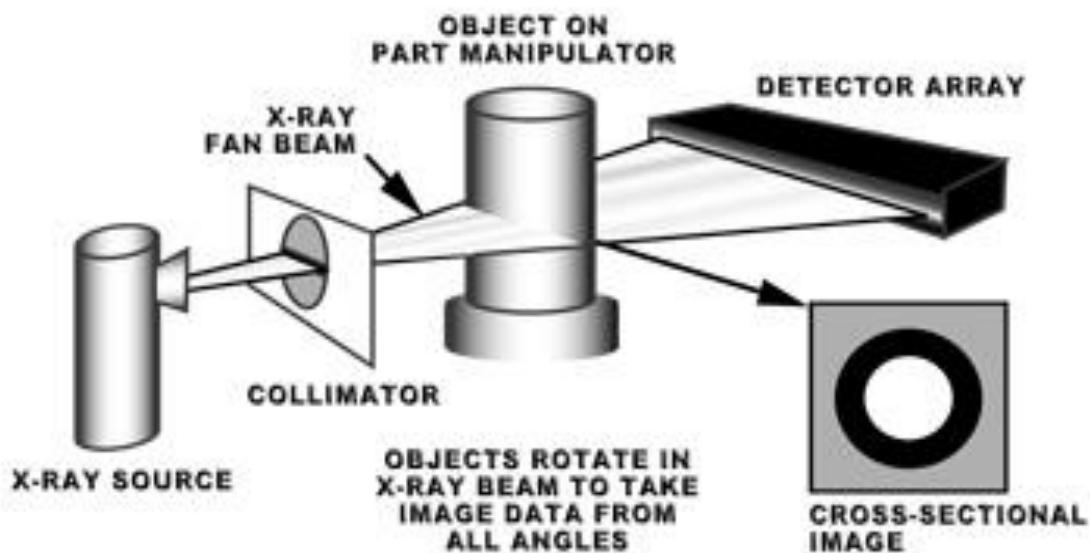
Las propiedades mecánicas de los materiales y de los diseños fabricados con ellos dependen directamente de su estructura, de su composición y de los defectos inducidos por el proceso de fabricación.

Desde el punto de vista de inspección y control de calidad esta técnica permite obtener un mapa de porosidad de toda la pieza analizada pudiendo observarse su distribución dentro de la pieza y la medida del tamaño de los diferentes poros observados.

### 2.9.1 Tomografía industrial computarizada de rayos X

La tomografía computarizada (TC) es una técnica que genera imágenes de secciones transversales de una pieza. Esta técnica difiere de la radiografía en que el haz de energía y el detector están en el mismo plano que la superficie de la que se va a obtener la imagen

*Figura 2. 7 Esquema de la tomografía computarizada*



Esta técnica para generar imágenes de la estructura interna de los materiales de forma no destructiva, a partir de la radiación será aplicada en la presente investigación para la evaluación del hormigón poroso de pavimento, debido a que en nuestro medio no se cuenta con equipos que sean fabricados específicamente para la evaluación de materiales de construcción con rayos x, usaremos como herramienta principal un tomógrafo con fines medicinales, el uso de este tomógrafo no causará ningún tipo de alteración en las imágenes

puesto que trabajan bajo el mismo principio. El tomógrafo que se usará será contratado de la clínica privada Santísima Trinidad donde el técnico operador deberá calcular el nivel de radiación para que el haz de energía sea capaz de atravesar la densidad de la mezcla.

Ya teniendo todo preparado para la aplicación de los rayos X, se extraerán imágenes de las probetas de laboratorio, que miden 30 cm de largo, con una separación entre imágenes de 5 cm a partir de los primeros 2.5 cm, para que así se obtenga una cantidad representativa, es decir 6 imágenes por cada probeta analizada.

## CAPÍTULO III: INVESTIGACIÓN

### 3.1 Ubicación del área de estudio

El área de estudio considerado para esta investigación es la ciudad de Tarija considerando sus bancos de préstamo de materiales pétreos para elaboración de hormigón poroso de pavimento.

Los resultados de la investigación serán parámetros que podrán utilizarse para posteriores investigaciones o estudios que se realicen en la ciudad de Tarija, puesto que las características de los materiales empleados son propias de esta región.

*Figura 3. 1 Área de estudio*



### 3.2 Características de los bancos de materiales

Los materiales pétreos que se utilizaron para la elaboración de las probetas de hormigón poroso de pavimento fueron grava de tipo canto rodado de  $\frac{3}{4}$ " provisto por la seleccionadora San Luis que extrae el árido del río Guadalquivir a unos 100 metros a la redonda de la ubicación de la planta a la altura de zona San Luis.

*Figura 3. 2 Ubicación del Banco de extracción del agregado grueso*



En cuanto al agregado fino se empleó arena gruesa proveniente del río Tolomosa de la misma zona.

*Figura 3. 3 Ubicación del Banco de extracción del agregado fino*



### **3.3 Caracterización de materiales**

A continuación se describen los resultados de los ensayos que se realizaron en cada uno de los materiales utilizados para los diseños de mezcla de hormigón poroso de pavimento

### **3.3.1 Caracterización de la grava redondeada**

Los ensayos que se debieron realizar sobre el agregado grueso redondeado para obtener los datos requeridos en la dosificación fueron los de granulometría, Peso Específico y Absorción, Peso Unitario y Desgaste con la máquina de los ángeles

En cuanto a las dimensiones de las partículas del agregado grueso y su distribución se adquirió grava de  $\frac{3}{4}$  de pulgada (19 mm) la cual presentó partículas de dimensiones mayores llegando a utilizar un agregado con tamaño máximo de 1 pulgada, obteniendo una granulometría con los porcentajes retenidos en cada una de las mallas que se muestra a continuación.

## Análisis granulométrico



**Universidad Autónoma Juan Misael Saracho**  
**Laboratorio de Suelos**  
 Barrio El Tejar Av. Jaime Paz Zamora y España

### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

PROYECTO: EVALUACIÓN DEL CONTACTO AGREGADO AGREGADO Y VACIOS EN  
 HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO APLICANDO RAYOS X  
 MUESTRA: GRAVA 3/4"  
 PROCEDENCIA: Río Guadalquivir Zona San Luis  
 F. DE ENSAYO: 15-Sep-14  
 LABORATORISTAS: Gilmar H. Mancilla Velasquez  
 REVISÓ: Téc.  
 OBSERVACIONES:

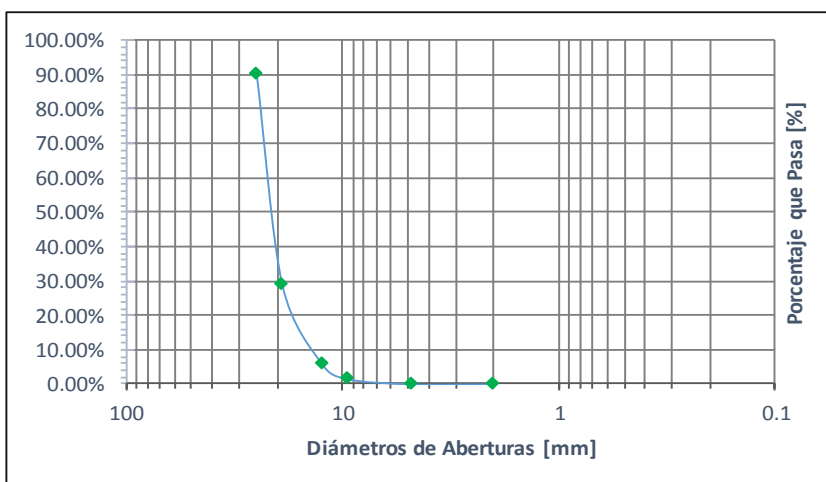
### HOJA DE LABORATORIO

MASA RECIPIENTE (kg) = 0.225

MASA REC. + MUESTRA (kg) = 10

MASA MUESTRA (kg) = 9.775

MAILLA	ABERTURA (mm)	M. RETENIDO PARCIAL (kg)	MASA RETENIDA (%)	RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
1"	25	0.95	9.71%	9.71%	90.29%
3/4"	19	5.995	61.27%	70.98%	29.02%
1/2"	12.5	2.23	22.79%	93.77%	6.23%
3/8"	9.5	0.445	4.55%	98.31%	1.69%
Nº4	4.75	0.15	1.53%	99.85%	0.15%
Nº10	2	0	0.00%	99.85%	0.15%
Nº200	0.075	0.005	0.05%	99.90%	0.10%
FONDO	0	0.01	0.10%	100.00%	0.00%
SUMAS		9.785	100%		



**Peso Específico y Absorción del agregado grueso**



**Universidad Autónoma Juan Misael Saracho**  
**Laboratorio de Suelos**  
 Barrio El Tejar Av. Jaime Paz Zamora y España

**PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO**

PROYECTO: EVALUACIÓN DEL CONTACTO AGREGADO AGREGADO Y VACIOS EN  
HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO APLICANDO RAYOS X  
 MUESTRA: GRAVA 3/4"  
 PROCEDENCIA: Río Guadalquivir Zona San Luis  
 F. DE ENSAYO: 15-Sep-14  
 LABORATORISTAS: Gilmar H. Mancilla Velasquez  
 REVISÓ: Téc.  
 OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

**HOJA DE LABORATORIO**

MASA RECIPIENTE/sss (gr)	223
MASA MUESTRA SATURADA W <sub>sss</sub> + MASA RECIPIENTE (gr)	5219.7
MASA SATURADA W <sub>sss</sub> (gr)	4996.7
MASA CESTO METÁLICO SUMERGIDO (gr)	817
MASA MUESTRA SUMERGIDA. W <sub>sum</sub> + CESTO METÁLICO SUM (gr)	3892.4
MASA SUMERGIDA NETA. W <sub>sum</sub> (gr)	3075.4
MASA RECIPIENTE/ seca (gr)	223
MASA MUESTRA SECA. W <sub>seca</sub> + MASA RECIPIENTE (gr)	5136.6
MASA MUESTRA SECA. W <sub>seca</sub> (gr)	4913.6
AGUA (gr)	83.1
<b>FORMULAS</b>	<b>Unidades</b>
$Agua = W_{sss}(gr) - W_{seca}(gr)$	gr
$Absorción = \left( \frac{W_{sss}(g) - W_{seca}(g)}{W_{seca}(g)} \right) * 100$	%
$P. E. a\ granel = \frac{W_{seca}(g)}{W_{sss}(g) - W_{sum}(g)}$	adimensional
$P. E. SSS = \frac{W_{sss}(g)}{W_{sss}(g) - W_{sum}(g)}$	adimensional
$P. E. aparente = \frac{W_{seca}(g)}{W_{seca}(g) - W_{sum}(g)}$	adimensional
PESO ESPECIFICO A GRANEL	2.56
PESO ESPECIFICO EN CONDICION SATURADO SUPERFICIALMENTE SECO	2.60
PESO ESPECIFICO APARENTE	2.67
ABSORCION (%)	1.69

## Peso Unitario del agregado grueso



Universidad Autónoma Juan Misael Saracho

Laboratorio de Suelos

Barrio El Tejar Av. Jaime Paz Zamora y España

**PESO UNITARIO DEL AGREGADO GRUESO**

PROYECTO: EVALUACIÓN DEL CONTACTO AGREGADO AGREGADO Y VACIOS EN  
HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO APLICANDO RAYOS X

MUESTRA: GRAVA 3/4"

PROCEDENCIA: Río Guadalquivir Zona San Luis

F. DE ENSAYO: 15-Sep-14

LABORATORISTAS: Gilmar H. Mancilla Velasquez

REVISÓ: Téc.

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

**HOJA DE LABORATORIO**

SUELTO		VARILLADO	
MASA RECIPIENTE VACÍO (kg)	8.890	MASA RECIPIENTE VACÍO (kg)	8.890
VOLUMEN RECIPIENTE VACÍO (m <sup>3</sup> )	0.0139	VOLUMEN RECIPIENTE VACÍO (m <sup>3</sup> )	0.0139
MASA RECIPIENTE + AGREGADO 1 (kg)	29.712	MASA RECIPIENTE + AGREGADO 1 (kg)	30.951
MASA RECIPIENTE + AGREGADO 2 (kg)	29.802	MASA RECIPIENTE + AGREGADO 2 (kg)	30.868
MASA RECIPIENTE + AGREGADO 3 (kg)	29.976	MASA RECIPIENTE + AGREGADO 3 (kg)	31.076
MASA DEL AGREGADO 1 (kg)	20.822	MASA DEL AGREGADO 1 (kg)	22.061
MASA DEL AGREGADO 2 (kg)	20.912	MASA DEL AGREGADO 2 (kg)	21.978
MASA DEL AGREGADO 3 (kg)	21.086	MASA DEL AGREGADO 3 (kg)	22.186
MASA DE AGREGADO PROMEDIO (kg)	20.940	MASA DE AGREGADO PROMEDIO (kg)	22.075
DIÁMETRO RECIPIENTE (m)	0.236	DIÁMETRO RECIPIENTE (m)	0.236
ALTURA RECIPIENTE (m)	0.319	ALTURA RECIPIENTE (m)	0.319
MASA DE AGUA QUE LLENA EL MOLDE (kg)	13.840	MASA DE AGUA QUE LLENA EL MOLDE (kg)	13.840
TEMPERATURA DEL AGUA (°C)	22	TEMPERATURA DEL AGUA (°C)	22
DENSIDAD AGUA A TEMPERATURA. (kg/m <sup>3</sup> )	997.860	DENSIDAD AGUA A TEMPERATURA. (kg/m <sup>3</sup> )	997.860
VOLUMEN molde 1	0.01395	VOLUMEN molde 1	0.01395
VOLUMEN molde 2	0.01387	VOLUMEN molde 2	0.01387
<b>FORMULAS:</b>			<b>Unidades</b>
$\text{Masa del agregado} = (\text{MASA RECIPIENTE} + \text{AGREGADO}) - \text{MASA RECIPIENTE VACIO}$			kg
$\text{Masa agregado Promedio} = \frac{\text{Masa agregado 1} + \text{Masa agregado 2} + \text{Masa agregado 3}}{3}$			kg

$Volumen_{molde1} = \frac{\pi}{4} * D^2 * h$		$Volumen_{molde2} = \frac{Masa\ de\ agua\ que\ llena\ el\ molde}{\rho_{agua\ (22^{\circ}C)}}$		$m^3$
$Volumen\ molde = \frac{Volumen\ 1\ molde + volumen\ 2\ molde}{2}$				$m^3$
$Peso\ Unitario = \frac{MASA\ DEL\ AGREGADO}{VOLUMEN\ DEL\ RECIPIENTE}$				$kg/m^3$
PESO UNITARIO SUELTO(kg/m <sup>3</sup> ) =	1505.18	PESO UNITARIO VARILLADO (kg/m <sup>3</sup> ) =	1586.77	

**Porcentaje de desgaste del agregado grueso**



**Universidad Autónoma Juan Misael Saracho**  
**Laboratorio de Suelos**  
 Barrio El Tejar Av. Jaime Paz Zamora y España

**PORCENTAJE DE DESGASTE DEL AGREGADO GRUESO**

PROYECTO: EVALUACIÓN DEL CONTACTO AGREGADO AGREGADO Y VACIOS EN  
HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO APLICANDO RAYOS X  
 MUESTRA: GRAVA 3/4"  
 PROCEDENCIA: Río Guadalquivir Zona San Luis  
 F. DE ENSAYO: 15-Sep-14  
 LABORATORISTAS: Gilmar H. Mancilla Velasquez  
 REVISÓ: Téc.  
 OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**HOJA DE LABORATORIO**

TIPO DE GRADACIÓN DEL AGREGADO GRUESO	A
MASA DE AGREGADO RETENIDO EN TAMIZ 1" (gr)	1250.4
MASA DE AGREGADO RETENIDO EN TAMIZ $\frac{3}{4}$ " (gr)	1250.5
MASA DE AGREGADO RETENIDO EN TAMIZ $\frac{1}{2}$ " (gr)	1250.3
MASA DE AGREGADO RETENIDO EN TAMIZ $\frac{3}{8}$ " (gr)	1250.5
PESO ORIGINAL DE LA MUESTRA (gr)	5001.7
NEMERO DE ESFERAS	12
PESO RECIPIENTE (gr)	159.4
PESO RECIPIENTE + PESO MUESTRA SECA DESGASTADA (gr)	3718.5
PESO FINAL DE LA MUESTRA (gr)	3559.1
<b>FORMULAS</b>	<b>Unidades</b>
$\% \text{ DESGASTE} = \frac{\text{PESO ORIGINAL DE LA MUESTRA} - \text{PESO FINAL DE LA MUESTRA}}{\text{PESO ORIGINAL DE LA MUESTRA}} * 100$	
	%
<b>Porcentaje de desgaste del agregado grueso</b>	<b>28.84%</b>

A continuación se resume los resultados obtenidos de los ensayos sobre el agregado grueso redondeado que serán utilizados en el procedimiento de dosificación y determinación de las cantidades necesarias para elaborar las mezclas.

**Cuadro N° 1: Resumen de resultados de los ensayos realizados sobre el agregado grueso redondeado**

<b>AGREGADO GRUESO REDONDEADO</b>	
<b>ENSAYO</b>	<b>RESULTADO</b>
Peso Específico (sss)	2.6
Absorción	1.69 %
Peso Unitario suelto	1505.18 Kg/m <sup>3</sup>
Peso Unitario Varillado	1586.77 Kg/m <sup>3</sup>
Desgaste	28.84%

*fuelle: Elaboración propia*

### 3.3.2 Caracterización de la grava triturada

La presencia de los agregados influyen en las propiedades físicas y mecánicas de un concreto como la durabilidad y la resistencia a la compresión, además sabemos que los agregados con diferentes características producen resistencias distintas, de esta manera el agregado grueso puede ser considerado como un componente crítico en el hormigón poroso cuyo comportamiento genera un efecto significativo en el comportamiento del mismo.

La grava triturada produce resistencias mayores en el hormigón que una de tipo canto rodado esto se debe la trabazón mecánica que se desarrolla en las partículas angulosas sin embargo se debe evitar una angulosidad excesiva debido al aumento de agua y principalmente a la disminución de vacíos, siendo este último la propiedad física más importante de un hormigón poroso.

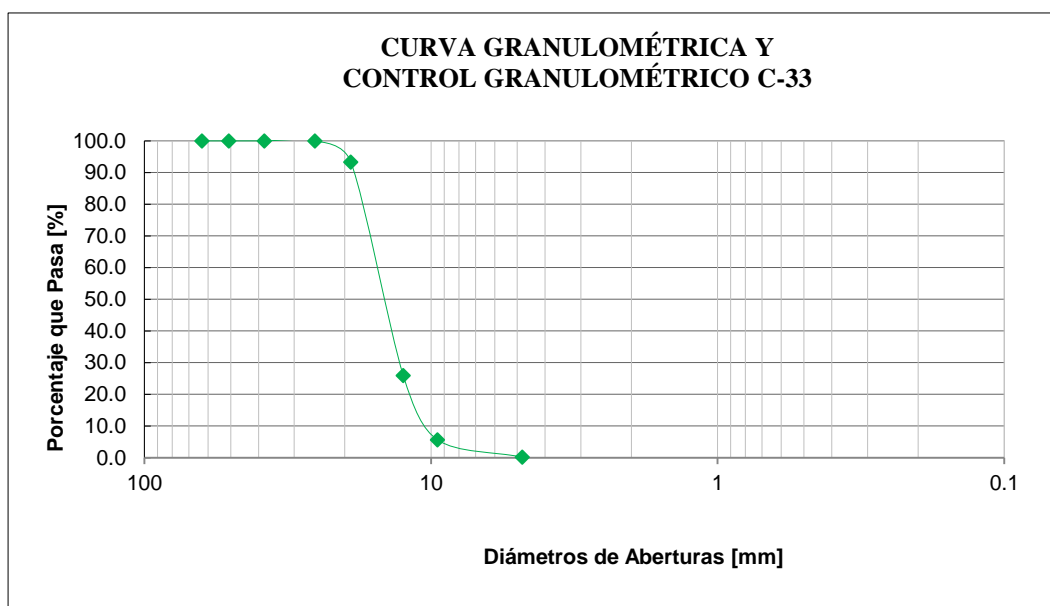
Con la finalidad de poder llevar a cabo una comparación entre las resistencia a la compresión que tiene un hormigón poroso de pavimento que utilice agregado grueso de tipo canto rodado

con otro que contenga grava triturada, se fabricará un pastón compuesto por tres probetas para cada tipo de mezcla con sus diferentes porcentajes de vacíos, utilizando el mismo método de dosificación y elaboración que fueron empleados en las primeras mezclas. Con este fin se realizaron los ensayos de laboratorios correspondientes para determinar el peso unitario, porcentaje de absorción y peso específico saturado superficialmente seco y así dosificar las proporciones de materiales para la fabricación de las tres mezclas con material chancado, los resultados de estos ensayos se encuentran a continuación.

## GRANULOMETRÍA - AGREGADO GRUESO TRITURADO

Proyecto: EVALUACIÓN DEL CONTACTO AGREGADO AGREGADO Y VACÍOS EN HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO APLICANDO RAYOS X.							
Procedencia del material: EL RANCHO							
Solicitante: Univ. David Galarza lozano					Fecha:		
Peso Total (gr.) =				<b>5000</b>			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Retenido Acumulado		% Que pasa del total	% Que pasa s/g Especif. ASTM	
			(gr)	(%)			
2 1/2"	63	0,00	0,00	0,00	<b>100,0</b>	100	100
2	50,8	0,00	0,00	0,00	<b>100,0</b>	100	100
1 1/2	38,10	0,00	0,00	0,00	<b>100,0</b>	95	100
1	25,40	0,00	0,00	0,00	<b>100,0</b>		
3/4	19,05	333,30	333,30	6,67	<b>93,3</b>	35	70
1/2	12,50	3370,30	3703,60	74,07	<b>25,9</b>		
3/8	9,50	1014,60	4718,20	94,36	<b>5,6</b>	10	30
Nº4	4,80	273,70	4991,90	99,84	<b>0,2</b>	0	5
BASE	0	7,80	4999,70	99,99	<b>0,0</b>		

### CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA GARVA



## Peso Específico y Absorción del agregado grueso

<b>PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO TRITURADO</b>
--

PROYECTO: EVALUACIÓN DEL CONTACTO AGREGADO AGREGADO Y VACIOS EN  
HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO APLICANDO RAYOS X

MUESTRA: GRAVA 3/4"

PROCEDENCIA: Río Guadalquivir Zona San Luis

F. DE ENSAYO: 15-Sep-14

LABORATORISTAS: Gilmar H. Mancilla Velasquez

REVISÓ: Téc.

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

## HOJA DE LABORATORIO

MASA RECIPIENTE/sss (gr)	197
MASA MUESTRA SATURADA W <sub>sss</sub> + MASA RECIPIENTE (gr)	4940.2
MASA SATURADA W <sub>sss</sub> (gr)	4743.2
MASA CESTO METÁLICO SUMERGIDO (gr)	823
MASA MUESTRA SUMERGIDA. W <sub>sum</sub> + CESTO METÁLICO SUM (gr)	3670.5686
MASA SUMERGIDA NETA. W <sub>sum</sub> (gr)	2847.5686
MASA RECIPIENTE/ seca (gr)	197
MASA MUESTRA SECA. W <sub>seca</sub> + MASA RECIPIENTE (gr)	4841.396
MASA MUESTRA SECA. W <sub>seca</sub> (gr)	4644.396
AGUA (gr)	98.804
<b>FORMULAS</b>	<b>Unidades</b>
$Agua = W_{sss}(gr) - W_{seca}(gr)$	gr
$Absorción = \left( \frac{W_{sss}(g) - W_{seca}(g)}{W_{seca}(g)} \right) * 100$	%
$P. E. a\ granel = \frac{W_{seca}(g)}{W_{sss}(g) - W_{sum}(g)}$	adimensional
$P. E. SSS = \frac{W_{sss}(g)}{W_{sss}(g) - W_{sum}(g)}$	adimensional
$P. E. aparente = \frac{W_{seca}(g)}{W_{seca}(g) - W_{sum}(g)}$	adimensional
PESO ESPECIFICO A GRANEL	2.45
PESO ESPECIFICO EN CONDICION SATURADO SUPERFICIALMENTE SECO	2.50
PESO ESPECIFICO APARENTE	2.58
ABSORCION (%)	2.13

**Peso Unitario del agregado grueso**

**PESO UNITARIO DEL AGREGADO GRUESO**

PROYECTO: EVALUACIÓN DEL CONTACTO AGREGADO AGREGADO Y VACIOS EN  
HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO APLICANDO RAYOS X  
MUESTRA: GRAVA 3/4"  
PROCEDENCIA: Río Guadalquivir Zona San Luis  
F. DE ENSAYO: 15-Sep-14  
LABORATORISTAS: Gilmar H. Mancilla Velasquez  
REVISÓ: Téc.  
OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

**HOJA DE LABORATORIO**

<b>SUELTO</b>		<b>VARILLADO</b>	
MASA RECIPIENTE VACÍO (kg)	8.890	MASA RECIPIENTE VACÍO (kg)	8.890
VOLUMEN RECIPIENTE VACÍO (m <sup>3</sup> )	0.0140	VOLUMEN RECIPIENTE VACÍO (m <sup>3</sup> )	0.0140
MASA RECIPIENTE + AGREGADO 1 (kg)	30.076	MASA RECIPIENTE + AGREGADO 1 (kg)	31.234
MASA RECIPIENTE + AGREGADO 2 (kg)	30.167	MASA RECIPIENTE + AGREGADO 2 (kg)	31.15
MASA RECIPIENTE + AGREGADO 3 (kg)	30.344	MASA RECIPIENTE + AGREGADO 3 (kg)	31.361
MASA DEL AGREGADO 1 (kg)	21.186	MASA DEL AGREGADO 1 (kg)	22.344
MASA DEL AGREGADO 2 (kg)	21.277	MASA DEL AGREGADO 2 (kg)	22.260
MASA DEL AGREGADO 3 (kg)	21.454	MASA DEL AGREGADO 3 (kg)	22.471
MASA DE AGREGADO PROMEDIO (kg)	21.306	MASA DE AGREGADO PROMEDIO (kg)	22.358
DIÁMETRO RECIPIENTE (m)	0.236	DIÁMETRO RECIPIENTE (m)	0.236
ALTURA RECIPIENTE (m)	0.319	ALTURA RECIPIENTE (m)	0.319
MASA DE AGUA QUE LLENA EL MOLDE (kg)	13.980	MASA DE AGUA QUE LLENA EL MOLDE (kg)	13.980
TEMPERATURA DEL AGUA (°C)	26	TEMPERATURA DEL AGUA (°C)	26
DENSIDAD AGUA A TEMPERATURA. (kg/m <sup>3</sup> )	996.860	DENSIDAD AGUA A TEMPERATURA. (kg/m <sup>3</sup> )	996.860
VOLUMEN molde 1	0.01395	VOLUMEN molde 1	0.01395
VOLUMEN molde 2	0.01402	VOLUMEN molde 2	0.01402
<b>FORMULAS:</b>			<b>Unidades</b>
$\text{Masa del agregado} = (\text{MASA RECIPIENTE} + \text{AGREGADO}) - \text{MASA RECIPIENTE VACIO}$			kg
$\text{Masa agregado Promedio} = \frac{\text{Masa agregado 1} + \text{Masa agregado 2} + \text{Masa agregado 3}}{3}$			kg

$Volumen_{molde1} = \frac{\pi}{4} * D^2 * h \quad Volumen_{molde2} = \frac{Masa\ de\ agua\ que\ llena\ el\ molde}{\rho_{agua}\ (22^{\circ}C)}$		$m^3$
$Volumen\ molde = \frac{Volumen\ 1\ molde + volumen\ 2\ molde}{2}$		$m^3$
$Peso\ Unitario = \frac{MASA\ DEL\ AGREGADO}{VOLUMEN\ DEL\ RECIPIENTE}$		$kg/m^3$
PESO UNITARIO SUELTO( $kg/m^3$ ) =	1523.02	PESO UNITARIO VARILLADO ( $kg/m^3$ ) = 1598.27

A continuación se resume los resultados obtenidos de los ensayos sobre el agregado grueso triturado que serán utilizados en el procedimiento de dosificación y determinación de las cantidades necesarias para elaborar las mezclas.

**Cuadro N° 2 Resumen de resultados de los ensayos realizados sobre el agregado grueso triturado**

<b>AGREGADO GRUESO TRITURADO</b>	
<b>ENSAYO</b>	<b>RESULTADO</b>
TAMAÑO NOMINAL	¾"
PESO UNITARIO VARILLADO	1598.27 kg/m <sup>3</sup>
PESO ESPECIFICO	2,45 gr/cm <sup>3</sup>
PESO ESPECIFICO S.S.S.	2,50 gr/cm <sup>3</sup>
ABSORCIÓN DE AGUA	2,13 %

*fuelle: Elaboración propia*

### 3.3.3 Caracterización de las arenas

Para el agregado fino se realizaron los ensayos de módulo de finura para clasificar la arena resultando ser una "Arena Media" y el de Peso Específico y Absorción ya que es el único ensayo necesario para conseguir los datos requeridos en el proceso de dosificación, obteniendo un resultado de 1.11% y 2.36 en condición de saturada y superficialmente seca respectivamente.

**Peso Específico y Absorción del agregado fino**



**Universidad Autónoma Juan Misael Saracho**  
**Laboratorio de Suelos**  
 Barrio El Tejar Av. Jaime Paz Zamora y España

**PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO**

PROYECTO: EVALUACIÓN DEL CONTACTO AGREGADO AGREGADO Y VACIOS EN  
HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO APLICANDO RAYOS X  
 MUESTRA: ARENA GRUESA  
 PROCEDENCIA: Tolomosa  
 F. DE ENSAYO: 15-Sep-14  
 LABORATORISTAS: Gilmar H. Mancilla Velasquez  
 REVISÓ: Téc.  
 OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**HOJA DE LABORATORIO**

MASA MATRAZ (gr)	181.2
MASA ARENA SATURADA W <sub>sss</sub> + MASA MATRAZ (gr)	681.2
MASA ARENA SATURADA W <sub>sss</sub> (gr)	500
MASA MATRAZ + MASA ARENA SATURADA + MASA AGUA (gr)	969
TEMPERATURA (°C)	24
VOLUMEN DEL MATRAZ (ml)	500
MASA RECIPIENTE/ seca (gr)	159.4
MASA ARENA SECA. W <sub>seca</sub> + MASA RECIPIENTE/ seca (gr)	653.9
PESO EN EL AIRE DE LA MUESTRA SECADA AL HORNO. W <sub>seca</sub> (gr)	494.5
PESO DEL AGUA AGREGADA AL FRASCO. W <sub>agua</sub> (gr)	287.8
<b>FORMULAS</b>	<b>Unidades</b>
$Absorción = \left( \frac{500 - W_{seca} (gr)}{W_{seca} (gr)} \right) * 100$	%
$P. E. a\ granel = \frac{W_{seca} (g)}{Vol. frasco (ml) - W_{agua} (gr)}$	adimensional
$P. E. SSS = \frac{500}{Vol. frasco (ml) - W_{agua} (g)}$	adimensional
$P. E. = \frac{W_{seca} (g)}{(Vol. frasco (ml) - W_{agua} (g)) - (500 - W_{seca}(gr))}$	adimensional
PESO ESPECIFICO A GRANEL	2.33
PESO ESPECIFICO EN CONDICION SATURADO SUPERFICIALMENTE SECO	2.36
PESO ESPECIFICO	2.39
ABSORCION (%)	1.11%

## GRANULOMETRÍA-AGREGADO FINO

**Proyecto:** "Evaluación del contacto agregado agregado y vacíos en hormigón poroso de pavimento"

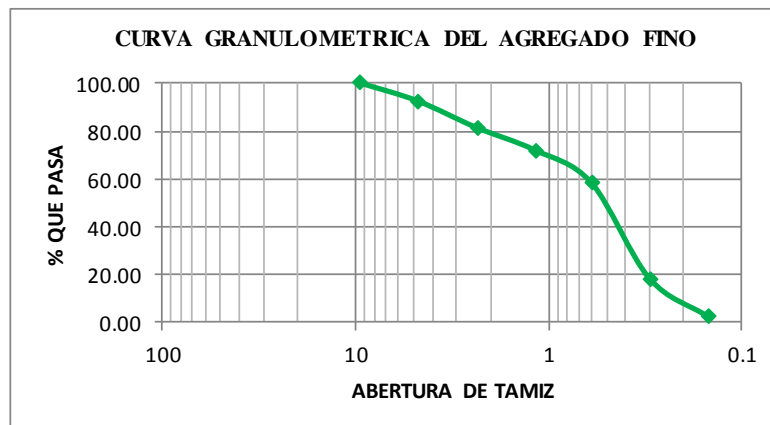
**Yacimiento:** Rio Tolomosa

**Fecha de ensayo:** 08-12-2014

Tamices	Tamaño [mm]	Peso Total [gr]= 2000	Peso Ret. [gr]	Ret. Acum [gr]	% Ret	% Que Pasa del Total	Especificación ASTM C-33	
3/8"	9.5	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
Nº4	4.75	151.80	151.80	7.59	92.41	95	100	
Nº8	2.36	221.80	373.60	18.68	81.32	80	100	
Nº16	1.18	187.40	561.00	28.05	71.95	50	80	
Nº30	0.60	273.40	834.40	41.72	58.28	25	60	
Nº50	0.30	800.30	1634.70	81.74	18.27	10	30	
Nº100	0.15	316.40	1951.10	97.56	2.45	2	10	
Base	-	48.9	2000.00	100.00	0.00	-	-	

SUMA= 2000.00  
PÉRDIDAS= 0.00

$$MF_{arena} = \frac{\sum \% \text{ retenido acumulado}}{100}$$



**Modulo de Finura=** 2.75

**Tipo de arena =** Media

A continuación se resume los resultados obtenidos del ensayo de Módulo de finura y de peso específico y absorción del agregado fino que serán utilizados para el proceso de dosificación y determinación de las cantidades requeridas para elaborar las mezclas.

**Cuadro N° 3: Resumen de resultados del ensayo realizado sobre el agregado fino**

<b>RESUMEN - AGREGADO FINO</b>	
<b>ENSAYO</b>	<b>RESULTADO</b>
Absorción	1.11%
Peso Específico (sss)	2.36
Clasificación según el módulo de finura	Media

*fuentes: Elaboración propia*

### 3.3.4 Caracterización del cemento

En cuanto al cemento la prueba de laboratorio que se realizó fue la de Peso Específico, alcanzando un resultado de 3.14, valor muy aceptable para el cemento utilizado, El Puente IP30.

**Cuadro N° 4 Resumen de resultados del ensayo realizado sobre el cemento**

<b>RESUMEN - CEMENTO</b>	
<b>ENSAYO</b>	<b>RESULTADO</b>
Peso Específico	3.14

*fuentes: Elaboración propia*

### Peso específico del cemento



**Universidad Autónoma Juan Misael Saracho**  
**Laboratorio de Suelos**  
 Barrio El Tejar Av. Jaime Paz Zamora y España

#### PESO ESPECÍFICO DEL CEMENTO

PROYECTO: EVALUACIÓN DEL CONTACTO AGREGADO AGREGADO Y VACIOS EN  
HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO APLICANDO RAYOS X

MUESTRA: Cemento IP 30

PROCEDENCIA: EL PUENTE

F. DE ENSAYO: 15-Sep-14

LABORATORISTAS: Gilmar H. Mancilla Velasquez

REVISÓ: Téc.

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

#### HOJA DE LABORATORIO

PESO DE LA MUESTRA DE CEMENTO (gr)	64
VOLUMEN DEZPLAZADO (ml)	20.4
$P.E.cemento = \frac{\text{Peso de la muestra de cemento (kg)}}{\text{Volumen desplazado (m}^3\text{)}}$	$kg/m^3$
PESO ESPECIFICO DEL CEMENTO (kg/m <sup>3</sup> )	3.14

### 3.4 Dosificación

#### 3.4.1 Dosificación de mezclas utilizando agregado grueso redondeado

Los diseños de mezcla fueron realizados según el procedimiento establecido por la guía del comité 211 del ACI (Instituto Americano del Concreto) por sus siglas en inglés, “Guía para seleccionar proporciones de concreto sin revenimiento”, con el objetivo de elaborar tres tipos de mezclas, diferenciándose entre ellas en el porcentaje de vacíos que tendrán dentro de su estructura, los porcentajes a los que nos referimos son de 15%, 20% y 25%, esto con el objeto de tener 3 parámetros diferentes a la hora de llevar a cabo la evaluación con rayos X. En todas las dosificaciones se empleó un 20% de agregado fino, una relación agua-cemento igual a 0.4, ya que la experiencia ha mostrado buenos resultados con valores que se encuentren dentro de un rango de 0,35 y 0,45, y un nivel de compactación ligero, haciendo uso de la varilla de 5/8” en vez del pisón, este último dato interesa para definir el contenido de pasta en porcentaje de volumen en función al contenido de vacíos mediante la tabla 3.4.1, proporcionada por el comité 211 del ACI.

El procedimiento de dosificación y el cálculo de las cantidades de material necesario para producir un metro cúbico de hormigón poroso de pavimento está descrito de la siguiente manera:

#### **Dosificación para la producción de hormigón poroso de pavimento con 15% de vacíos utilizando agregado grueso redondeado**

Primera Dosificación de mezcla porosa de pavimento con los siguientes parámetros:

##### **Parámetros**

Porcentaje de Vacíos (%V)	15%
Tamaño de agregado grueso	3/4
Porcentaje de agregado fino	20%
Relación Agua Cemento (w/c)	0.4
Nivel de compactación	Ligeramente compactado

##### **Datos**

Densidad seca varillada (Peso Unitario)	1586.77	kg/m <sup>3</sup>
Porcentaje de Absorción	1.69%	%
P.E. saturado superficialmente seca	2600	kg/m <sup>3</sup>
Peso Específico del cemento	3140	kg/m <sup>3</sup>
Peso específico del agregado fino	2360	kg/m <sup>3</sup>

Volumen seco varillado de agregado grueso (b/bo)

Porcentaje de agregado Fino	b/bo	
	ASTM C 33 Tamaño N°8	ASTM C 33 Tamaño N° 67
0	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

$$b/b_o = 0.86$$

Determinación del peso de agregado ( $W_a$ ) por metro cúbico

$$W_a = \text{Densidad seca varillada} * b/b_o$$

$$W_a = 1364.62 \text{ kg}$$

Ajuste al peso en estado Saturado Superficialmente Seco ( $W_{ssd}$ )

$$W_{ssd} = W_a * \% \text{ de absorción}$$

$$W_{ssd} = 1387.68 \text{ kg}$$

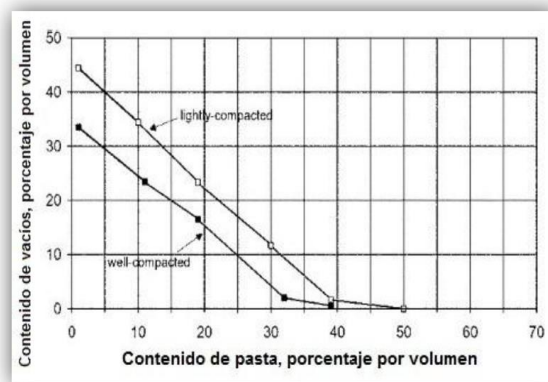
Volumen sólido de agregado ( $V_a$ ) por m<sup>3</sup>

$$V_a = \frac{W_{ssd}}{P.E \text{ saturado y superficie seca}}$$

$$V_a = 0.53 \text{ m}^3$$

$$V_a - 20\% \text{ fino} = 0.43 \text{ m}^3$$

Determinación del volumen de porcentaje de pasta por  $\text{m}^3$



$$\%V_p = 32.00\%$$

$$V_p = 0.314 \text{ m}^3$$

Determinación del contenido de cemento ( $c$ ) por  $\text{m}^3$

$$c = \frac{V_p}{\frac{1}{P.E. \text{ cemento}} + \frac{(w/c)}{P.E. \text{ agua}}}$$

$$c = 436.5 \text{ kg}$$

Determinación del contenido de agua ( $w$ ) para un  $\text{m}^3$

$$\left(\frac{w}{c}\right) = \frac{w}{c} \quad w = c * \left(\frac{w}{c}\right)$$

$$w = 174.6 \text{ kg}$$

Cálculo del volumen de cemento y agua por  $\text{m}^3$

$$V_c = \frac{c}{P.E. \text{ cemento}}$$

$$V_w = \frac{w}{P.E. \text{ agua}}$$

$$V_c = 0.139 \text{ m}^3 \qquad V_w = 0.175 \text{ m}^3$$

Cantidades finales de los materiales en peso para producir 1 m<sup>3</sup> de hormigón poroso

Cemento ( <i>c</i> ) =	436.5	kg/m <sup>3</sup>
Agua ( <i>w</i> ) =	174.6	kg/m <sup>3</sup>
Agregado grueso =	1110.1	kg/m <sup>3</sup>
Agregado fino =	277.5	kg/m <sup>3</sup>
Masa Total =	1721.2	kg/m <sup>3</sup>
Peso Específico =	1721.2	kg/m <sup>3</sup>

Cantidades finales de los materiales en volumen para producir 1 m<sup>3</sup> de hormigón poroso

Cemento ( <i>c</i> ) =	0.139	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agua ( <i>w</i> ) =	0.1745929	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agregado grueso =	0.427	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agregado fino =	0.107	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
% de vacíos =	15.27%	

### **Dosificación para la producción de hormigón poroso de pavimento con 20% de vacíos utilizando agregado grueso redondeado**

Segunda Dosificación de mezcla porosa de pavimento con los siguientes parámetros:

#### **Parámetros**

Porcentaje de Vacíos (% V)	20%
Tamaño de agregado grueso	3/8
Porcentaje de agregado fino	20%
Relación Agua Cemento (w/c)	0.4
Nivel de compactación	Bien compactado

#### **Datos**

Densidad seca varillada (Peso Unitario)	1586.77	kg/m <sup>3</sup>
Porcentaje de Absorción	1.69%	%
P.E. saturado superficialmente seca	2600	kg/m <sup>3</sup>
Peso Específico del cemento	3140	kg/m <sup>3</sup>
peso específico del agregado fino	2360	

Volumen seco varillado de agregado grueso (b/b<sub>o</sub>)

Porcentaje de agregado Fino	b/b <sub>o</sub>	
	ASTM C 33 Tamaño N°8	ASTM C 33 Tamaño N° 67
0	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

$$b/b_o = 0.86$$

Determinación del peso de agregado (W<sub>a</sub>) por metro cúbico

$$W_a = \text{Densidad seca varillada} * b/b_o$$

$$W_a = 1364.62 \text{ kg}$$

Ajuste al peso en estado Saturado Superficialmente Seco (W<sub>ssd</sub>)

$$W_{ssd} = W_a * \% \text{ de absorción}$$

$$W_{ssd} = 1387.68 \text{ kg}$$

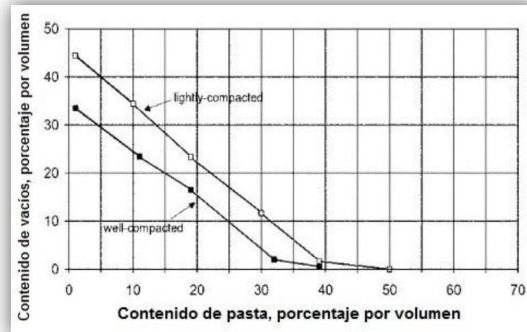
Volumen sólido de agregado (V<sub>a</sub>) por m<sup>3</sup>

$$V_a = \frac{W_{ssd}}{P.E. \text{ saturado y superficie seca}}$$

$$V_a = 0.53$$

$$V_a - 20\% \text{ fino} = 0.43$$

Determinación del volumen de porcentaje de pasta por m<sup>3</sup>



$$\%V_p = 27.00\%$$

$$V_p = 0.265 \text{ m}^3$$

Determinación del contenido de cemento (c) por m<sup>3</sup>

$$c = \frac{V_p}{\frac{1}{P.E. \text{ cemento}} + \frac{(w/c)}{P.E. \text{ agua}}}$$

$$c = 368.3 \text{ kg}$$

Determinación del contenido de agua (w) para un m<sup>3</sup>

$$\left(\frac{w}{c}\right) = \frac{w}{c} \quad w = c * \left(\frac{w}{c}\right)$$

$$w = 147.3 \text{ kg}$$

Cálculo del volumen de cemento y agua por m<sup>3</sup>

$$V_c = \frac{c}{P.E. \text{ cemento}}$$

$$V_w = \frac{w}{P.E. \text{ agua}}$$

$$V_c = 0.117 \text{ m}^3$$

$$V_w = 0.147 \text{ m}^3$$

Cantidades finales de los materiales en peso para producir 1 m<sup>3</sup> de hormigón poroso

Cemento ( $c$ ) =	368.3	kg/m <sup>3</sup>
Agua ( $w$ ) =	147.3	kg/m <sup>3</sup>
Agregado grueso =	1110.1	kg/m <sup>3</sup>
Agregado fino=	277.5	kg/m <sup>3</sup>
Masa Total =	1625.7	kg/m <sup>3</sup>
Peso Específico =	1625.7	kg/m <sup>3</sup>

Cantidades finales de los materiales en volumen para producir 1 m<sup>3</sup> de hormigón poroso

*	Cemento ( $c$ ) =	0.117	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
	Agua ( $w$ ) =	0.147	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
	Agregado grueso =	0.427	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
	Agregado fino=	0.107	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
	% de vacíos=	20.2%	

### **Dosificación para la producción de hormigón poroso de pavimento con 25% de vacíos utilizando agregado grueso redondeado**

Tercera Dosificación de mezcla porosa de pavimento con los siguientes parámetros:

#### **Parámetros**

Porcentaje de Vacíos (%V)	25%
Tamaño de agregado grueso	3/8
Porcentaje de agregado fino	20%
Relación Agua Cemento (w/c)	0.4
Nivel de compactación	Bien compactado

#### **Datos**

Densidad seca varillada (Peso Unitario)	1586.77	kg/m <sup>3</sup>
Porcentaje de Absorción	1.69%	

P.E. saturado superficialmente seca	2600	kg/m <sup>3</sup>
Peso Específico del cemento	3140	kg/m <sup>3</sup>
Peso específico del agregado fino	2360	

Volumen seco varillado de agregado grueso (b/b<sub>o</sub>)

Porcentaje de agregado Fino	b/b <sub>o</sub>	
	ASTM C 33 Tamaño N°8	ASTM C 33 Tamaño N° 67
0	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

$$b/b_o = 0.86$$

Determinación del peso de agregado (W<sub>a</sub>) por metro cúbico

$$W_a = \text{Densidad seca varillada} * b/b_o$$

$$W_a = 1364.62 \text{ kg}$$

Ajuste al peso en estado Saturado Superficialmente Seco (W<sub>ssd</sub>)

$$W_{ssd} = W_a * \% \text{ de absorción}$$

$$W_{ssd} = 1387.68 \text{ kg}$$

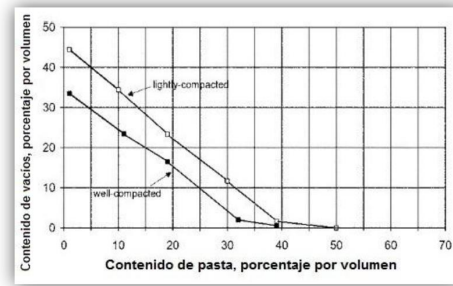
Volumen sólido de agregado (V<sub>a</sub>) por m<sup>3</sup>

$$V_a = \frac{W_{ssd}}{P. E \text{ saturado y superficie seca}}$$

$$V_a = 0.53$$

$$V_a - 20\% \text{ fino} = 0.43$$

Determinación del volumen de porcentaje de pasta por  $\text{m}^3$



$$\%V_p = 22.00\%$$

$$V_p = 0.216 \text{ m}^3$$

Determinación del contenido de cemento ( $c$ ) por  $\text{m}^3$

$$c = \frac{V_p}{\frac{1}{P.E. \text{ cemento}} + \frac{(w/c)}{P.E. \text{ agua}}}$$

$$c = 300.1 \text{ kg}$$

Determinación del contenido de agua ( $w$ ) para un  $\text{m}^3$

$$\left(\frac{w}{c}\right) = \frac{w}{c} \quad W = c * \left(\frac{w}{c}\right)$$

$$w = 120.0 \text{ kg}$$

Cálculo del volumen de cemento y agua por  $\text{m}^3$

$$V_c = \frac{c}{P.E. \text{ cemento}}$$

$$V_w = \frac{w}{P.E. \text{ agua}}$$

$$V_c = 0.096 \text{ m}^3$$

$$V_w = 0.120 \text{ m}^3$$

Cantidades finales de los materiales en peso para producir  $1 \text{ m}^3$  de hormigón poroso

$$\text{Cemento } (c) = 300.1 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Agua } (w) = 120.0 \text{ kg/m}^3$$

Agregado grueso =	1110.1	kg/m <sup>3</sup>
Agregado fino =	277.5	kg/m <sup>3</sup>
Masa Total =	1530.3	kg/m <sup>3</sup>
Peso Específico =	1530.3	kg/m <sup>3</sup>

Cantidades finales de los materiales en volumen para producir 1 m<sup>3</sup> de hormigón poroso

Cemento ( <i>c</i> ) =	0.096	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agua ( <i>w</i> ) =	0.120	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agregado grueso =	0.427	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agregado fino =	0.107	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
% de vacíos =	25.1%	

Las tablas de resúmenes con las cantidades, tanto en peso como en volumen, resultantes para la producción de un metro cúbico de hormigón poroso de pavimento para cada una de las mezclas, y su porcentaje de vacíos teórico se muestran a continuación.

**Cuadro N° 5: Proporción en peso de los materiales para elaborar 1m<sup>3</sup> de H<sup>o</sup>P<sup>o</sup> con 15% de vacíos**

<b>DOSIFICACIÓN EN PESO DE HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO CON 15% DE VACÍOS</b>		
Cemento ( <i>c</i> ) =	436.5	kg/m <sup>3</sup>
Agua ( <i>w</i> ) =	174.6	kg/m <sup>3</sup>
Agregado grueso =	1110.1	kg/m <sup>3</sup>
Agregado fino =	277.5	kg/m <sup>3</sup>

*fuentes: Elaboración propia*

**Cuadro N° 6: Proporción en volumen de los materiales para elaborar 1m<sup>3</sup> de H<sup>o</sup>P<sup>o</sup> con 15% de vacíos**

<b>DOSIFICACIÓN EN VOLUMEN DE HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO CON 15% DE VACÍOS</b>
--

Cemento (c) =	0.139	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agua (w) =	0.174	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agregado grueso =	0.427	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agregado fino=	0.107	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
% de vacíos=	15.27	%

*fuelle: Elaboración propia*

**Cuadro N° 7: Proporción en peso de los materiales para elaborar 1m<sup>3</sup> de H<sup>o</sup>P<sup>o</sup> con 20% de vacíos**

<b>DOSIFICACIÓN EN PESO DE HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO CON 20% DE VACÍOS</b>		
Cemento (c) =	368.3	kg/m <sup>3</sup>
Agua (w) =	147.3	kg/m <sup>3</sup>
Agregado grueso =	1110.1	kg/m <sup>3</sup>
Agregado fino=	277.5	kg/m <sup>3</sup>

*fuelle: Elaboración propia*

**Cuadro N° 8: Proporción en volumen de los materiales para elaborar 1m<sup>3</sup> de H<sup>o</sup>P<sup>o</sup> con 20% de vacíos**

<b>DOSIFICACIÓN EN VOLUMEN DE HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO CON 20% DE VACÍOS</b>		
Cemento (c) =	0.117	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agua (w) =	0.147	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agregado grueso =	0.427	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agregado fino=	0.107	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
% de vacíos=	20.2	%

*fuelle: Elaboración propia*

**Cuadro N° 9: Proporción en peso de los materiales para elaborar 1m<sup>3</sup> de H<sup>o</sup>P<sup>o</sup> con 25% de vacíos**

<b>DOSIFICACIÓN EN PESO DE HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO CON 25% DE VACÍOS</b>		
Cemento (c) =	300.1	kg/m <sup>3</sup>
Agua (w) =	120.0	kg/m <sup>3</sup>
Agregado grueso =	1110.1	kg/m <sup>3</sup>
Agregado fino =	277.5	kg/m <sup>3</sup>

*fuelle: Elaboración propia*

**Cuadro N° 10: Proporción en volumen de los materiales para elaborar 1m<sup>3</sup> de H<sup>o</sup>P<sup>o</sup> con 25% de vacíos**

<b>DOSIFICACIÓN EN VOLUMEN DE HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO CON 25% DE VACÍOS</b>		
<i>Cemento (c) =</i>	<i>0.096</i>	<i>m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup></i>
<i>Agua (w) =</i>	<i>0.120</i>	<i>m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup></i>
<i>Agregado grueso =</i>	<i>0.427</i>	<i>m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup></i>
<i>Agregado fino=</i>	<i>0.107</i>	<i>m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup></i>
<i>% de vacíos=</i>	<i>25.1</i>	<i>%</i>

*fuelle: Elaboración propia*

Se estimaron 10 probetas para cada una de las mezclas llegando a necesitar 0.067 m<sup>3</sup> por mezcla para poder realizar los ensayos correspondientes al hormigón poroso. La cantidad de material para cada mezcla es la siguiente:

<b>MEZCLA 1 (15% DE VACÍOS)</b>				
<b>MATERIAL</b>	<b>Peso por m<sup>3</sup> [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Volumen necesario para la mezcla [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Cantidad utilizada [Peso por m<sup>3</sup> x Vol. Necesario]</b>	<b>Unidades</b>
<b>CEMENTO</b>	436.5	0.067	29.244	Kg
<b>AGREGADO FINO</b>	277.5	0.067	74.380	Kg
<b>AGREGADO GRUESO</b>	1110.1	0.067	18.595	Kg
<b>AGUA</b>	174.6	0.067	11.698	litros

<b>MEZCLA 1 (20% DE VACÍOS)</b>				
<b>MATERIAL</b>	<b>Peso por m<sup>3</sup> [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Volumen necesario para la mezcla [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Cantidad utilizada [Peso por m<sup>3</sup> x Vol. Necesario]</b>	<b>Unidades</b>
<b>CEMENTO</b>	368.3	0.067	24.675	Kg
<b>AGREGADO FINO</b>	277.5	0.067	74.380	Kg
<b>AGREGADO GRUESO</b>	1110.1	0.067	18.595	Kg
<b>AGUA</b>	147.3	0.067	9.870	litros

<b>MEZCLA 1 (25% DE VACÍOS)</b>				
<b>MATERIAL</b>	<b>Peso por m<sup>3</sup> [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Volumen necesario para la mezcla [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Cantidad utilizada [Peso por m<sup>3</sup> x Vol. Necesario]</b>	<b>Unidades</b>
<b>CEMENTO</b>	300.1	0.067	20.105	Kg
<b>AGREGADO FINO</b>	277.5	0.067	74.380	Kg
<b>AGREGADO GRUESO</b>	1110.1	0.067	18.595	Kg
<b>AGUA</b>	120.0	0.067	8.042	litros

Adicional a los volúmenes determinados para la elaboración de las diez probetas para cada una de las mezclas se incrementó este volumen en un 10% con el objeto de realizar el ensayo de consistencia y considerando que la mezcla resultante no es utilizada en su totalidad ya que siempre existen pérdidas.

### 3.4.2 Dosificación de mezclas utilizando agregado grueso triturado.

Al igual que para las mezclas anteriores el proceso de dosificación se llevara a cabo de acuerdo al procedimiento que indica el apéndice seis de la guía de elaborada por el comité 211 del ACI (Instituto Americano del Concreto), con el objeto de elaborar tres diferentes tipos de mezclas de hormigón poroso de pavimento, la primera con 15% de vacíos, la segunda con 20% de vacíos y la tercera con 25%, estas se elaborarán para contar tres parámetros diferentes cuando se realice la prueba de resistencia a la compresión sobre las probetas y así observar la variabilidad que existe en esta propiedad por la influencia que tiene la utilización del agregado grueso triturado. Para el proceso de dosificación además de los valores de las propiedades físicas de los agregados obtenidos de los ensayos de laboratorio, se mantendrán los parámetros que se establecieron para las primeras mezclas, se utilizara un 20% de agregado fino para todas las mezclas, una relación agua cemento de 0.4 según aconseja dicho reporte del ACI de acuerdo a su experiencia con este tipo de mezclas, se utilizará una varilla de 5/8” para compactar la mezcla definiendo de esta manera un nivel de compactación ligero.

#### Dosificación para la producción de hormigón poroso de pavimento con 15% de vacíos utilizando agregado grueso triturado

Primera Dosificación de mezcla porosa de pavimento con los siguientes parámetros:

##### Parámetros

Porcentaje de Vacíos (%V)	15%
Tamaño de agregado grueso	3/4
Porcentaje de agregado fino	20%
Relación Agua Cemento (w/c)	0.4
Nivel de compactación	Ligeramente compactado

##### Datos

Densidad seca varillada (Peso Unitario)	1598.27	kg/m <sup>3</sup>
Porcentaje de Absorción	2.13%	%
P.E. saturado superficialmente seca	2500	kg/m <sup>3</sup>
Peso Específico del cemento	3140	kg/m <sup>3</sup>
Peso específico del agregado fino	2360	kg/m <sup>3</sup>

Volumen seco varillado de agregado grueso ( $b/b_o$ )

Porcentaje de agregado Fino	$b/b_o$	
	ASTM C 33 Tamaño N°8	ASTM C 33 Tamaño N° 67
0	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

$$b/b_o = 0.86$$

Determinación del peso de agregado ( $W_a$ ) por metro cúbico

$$W_a = \text{Densidad seca varillada} * b/b_o$$

$$W_a = 1374.51 \text{ kg}$$

Ajuste al peso en estado Saturado Superficialmente Seco ( $W_{ssd}$ )

$$W_{ssd} = W_a * \% \text{ de absorción}$$

$$W_{ssd} = 1403.79 \text{ kg}$$

Volumen sólido de agregado ( $V_a$ ) por  $m^3$

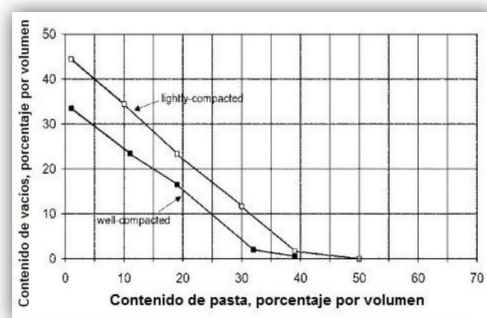
$$V_a = \frac{W_{ssd}}{P.E \text{ saturado y superficie seca}}$$

$$V_a = 0.56 \text{ m}^3$$

$$V_a -$$

$$20\% \text{ fino} = 0.45 \text{ m}^3$$

Determinación del volumen de porcentaje de pasta por  $m^3$



Determinación del contenido de cemento ( $c$ ) por  $m^3$

$$c = \frac{V_p}{\frac{1}{P.E. \text{ cemento}} + \frac{(w/c)}{P.E. \text{ agua}}}$$

$$c = 401.6 \quad \text{kg}$$

Determinación del contenido de agua ( $w$ ) para un  $m^3$

$$(w/c) = \frac{w}{c} \quad w = c * (w/c)$$

$$w = 160.6 \quad \text{kg}$$

Cálculo del volumen de cemento y agua por  $m^3$

$$V_c = \frac{c}{P.E. \text{ cemento}} \quad V_w = \frac{w}{P.E. \text{ agua}}$$

$$V_c = 0.128 \quad m^3 \quad V_w = 0.161 \quad m^3$$

Cantidades finales de los materiales en peso para producir  $1 m^3$  de hormigón poroso

Cemento ( $c$ ) =	401.6	kg/ $m^3$
Agua ( $w$ ) =	160.6	kg/ $m^3$
Agregado grueso =	1123.0	kg/ $m^3$
Agregado fino =	280.8	kg/ $m^3$
Masa Total =	1966.0	kg/ $m^3$
Peso Específico =	1966.0	kg/ $m^3$

Cantidades finales de los materiales en volumen para producir  $1 m^3$  de hormigón poroso

Cemento ( $c$ ) =	0.128	$m^3/m^3$
Agua ( $w$ ) =	0.1606255	$m^3/m^3$
Agregado grueso =	0.449	$m^3/m^3$
Agregado fino =	0.112	$m^3/m^3$
% de vacíos =	15.00%	

### **Dosificación para la producción de hormigón poroso de pavimento con 20% de vacíos utilizando agregado grueso triturado**

Segunda Dosificación de mezcla porosa de pavimento con los siguientes parámetros:

**Parámetros**

Porcentaje de Vacíos (%V)	20%
Tamaño de agregado grueso	3/4
Porcentaje de agregado fino	20%
Relación Agua Cemento (w/c)	0.4
Nivel de compactación	Bien compactado

**Datos**

Densidad seca varillada (Peso Unitario)	1598.27	kg/m <sup>3</sup>
Porcentaje de Absorción	2.13%	%
P.E. saturado superficialmente seca	2500	kg/m <sup>3</sup>
Peso Específico del cemento	3140	kg/m <sup>3</sup>
Peso específico del agregado fino	2360	

Volumen seco varillado de agregado grueso (b/b<sub>o</sub>)

Porcentaje de agregado Fino	b/b <sub>o</sub>	
	ASTM C 33 Tamaño N°8	ASTM C 33 Tamaño N° 67
0	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

$$b/b_o = 0.86$$

Determinación del peso de agregado (W<sub>a</sub>) por metro cúbico

$$W_a = \text{Densidad seca varillada} * b/b_o$$

$$W_a = 1374.51 \text{ kg}$$

Ajuste al peso en estado Saturado Superficialmente Seco (W<sub>ssd</sub>)

$$W_{ssd} = W_a * \% \text{ de absorción}$$

$$W_{ssd} = 1403.79 \text{ kg}$$

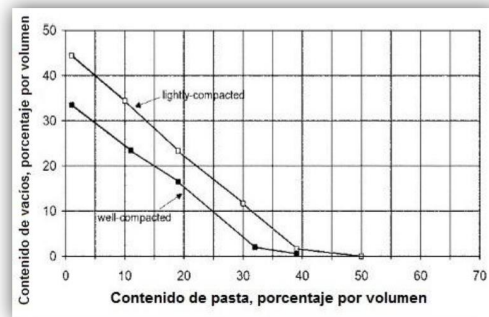
Volumen sólido de agregado (V<sub>a</sub>) por m<sup>3</sup>

$$V_a = \frac{W_{ssd}}{P.E \text{ saturado y superficie seca}}$$

$$V_a = 0.56$$

$$V_a - 20\% \text{ fino} = 0.45$$

Determinación del volumen de porcentaje de pasta por m<sup>3</sup>



$$\%V_p = 24.34\%$$

$$V_p = 0.239 \text{ m}^3$$

Determinación del contenido de cemento (c) por m<sup>3</sup>

$$c = \frac{V_p}{\frac{1}{P.E. \text{ cemento}} + \frac{(w/c)}{P.E. \text{ agua}}}$$

$$c = 332.0 \text{ kg}$$

Determinación del contenido de agua (w) para un m<sup>3</sup>

$$\left(\frac{w}{c}\right) = \frac{w}{c} \quad w = c * \left(\frac{w}{c}\right)$$

$$w = 132.8 \text{ kg}$$

Cálculo del volumen de cemento y agua por m<sup>3</sup>

$$V_c = \frac{c}{P.E. \text{ cemento}} \quad V_w = \frac{w}{P.E. \text{ agua}}$$

$$V_c = 0.106 \text{ m}^3 \quad V_w = 0.133 \text{ m}^3$$

Cantidades finales de los materiales en peso para producir 1 m<sup>3</sup> de hormigón poroso

Cemento (c) =	332.0	kg/m <sup>3</sup>
Agua (w) =	132.8	kg/m <sup>3</sup>
Agregado grueso =	1123.0	kg/m <sup>3</sup>

Agregado fino=	280.8	kg/m <sup>3</sup>
MasaTotal =	1868.6	kg/m <sup>3</sup>
Peso Específico =	1868.6	kg/m <sup>3</sup>

Cantidades finales de los materiales en volumen para producir 1 m<sup>3</sup> de hormigón poroso

Cemento (c) =	0.106	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agua (w) =	0.133	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agregado grueso =	0.449	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agregado fino=	0.112	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
% de vacíos=	20.00%	

### **Dosificación para la producción de hormigón poroso de pavimento con 25% de vacíos utilizando agregado grueso triturado**

Tercera Dosificación de mezcla porosa de pavimento con los siguientes parámetros:

#### **Parámetros**

Porcentaje de Vacíos (%V)	25%
Tamaño de agregado grueso	3/4
Porcentaje de agregado fino	20%
Relación Agua Cemento (w/c)	0.4
Nivel de compactación	Bien compactado

#### **Datos**

Densidad seca varillada (Peso Unitario)	1598.27	kg/m <sup>3</sup>
Porcentaje de Absorción	2.13%	
P.E. saturado superficialmente seca	2500	kg/m <sup>3</sup>
Peso Específico del cemento	3140	kg/m <sup>3</sup>
Peso específico del agregado fino	2360	

Volumen seco varillado de agregado grueso (b/bo)

Porcentaje de agregado Fino	b/bo	
	ASTM C 33 Tamaño N°8	ASTM C 33 Tamaño N° 67
0	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

$$b/b_o = 0.86$$

Determinación del peso de agregado ( $W_a$ ) por metro cúbico

$$W_a = \text{Densidad seca varillada} * b/b_o$$

$$W_a = 1374.51 \text{ kg}$$

Ajuste al peso en estado Saturado Superficialmente Seco ( $W_{ssd}$ )

$$W_{ssd} = W_a * \% \text{ de absorción}$$

$$W_{ssd} = 1403.79 \text{ kg}$$

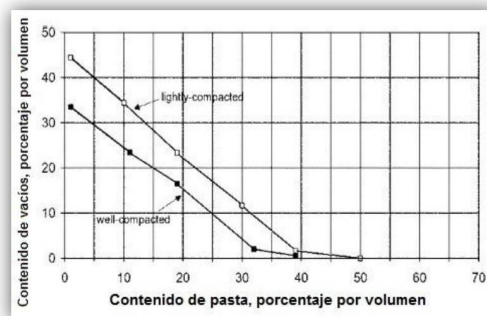
Volumen sólido de agregado ( $V_a$ ) por  $m^3$

$$V_a = \frac{W_{ssd}}{P. E. \text{ saturado y superficie seca}}$$

$$V_a = 0.56$$

$$V_a - 20\% \text{ fino} = 0.45$$

Determinación del volumen de porcentaje de pasta por  $m^3$



$$\%V_p = 19.23\%$$

$$V_p = 0.188 \text{ m}^3$$

Determinación del contenido de cemento ( $c$ ) por  $m^3$

$$c = \frac{V_p}{\frac{1}{P. E. \text{ cemento}} + \frac{(W/c)}{P. E. \text{ agua}}}$$

$$c = 262.3 \text{ kg}$$

Determinación del contenido de agua ( $w$ ) para un  $m^3$

$$\left(\frac{w}{c}\right) = \frac{w}{c} \quad w = c * \left(\frac{w}{c}\right)$$

$$w = 104.9 \quad \text{kg}$$

Cálculo del volumen de cemento y agua por  $m^3$

$$V_c = \frac{c}{P.E. \text{ cemento}}$$

$$V_w = \frac{w}{P.E. \text{ agua}}$$

$$V_c = 0.084 \quad m^3 \quad V_w = 0.105 \quad m^3$$

Cantidades finales de los materiales en peso para producir  $1 m^3$  de hormigón poroso

Cemento ( $c$ ) =	262.3	kg/ $m^3$
Agua ( $w$ ) =	104.9	kg/ $m^3$
Agregado grueso =	1123.0	kg/ $m^3$
Agregado fino =	280.8	kg/ $m^3$
Masa Total =	1771.0	kg/ $m^3$
Peso Específico =	1771.0	kg/ $m^3$

Cantidades finales de los materiales en volumen para producir  $1 m^3$  de hormigón poroso

Cemento ( $c$ ) =	0.084	$m^3/m^3$
Agua ( $w$ ) =	0.105	$m^3/m^3$
Agregado grueso =	0.449	$m^3/m^3$
Agregado fino =	0.112	$m^3/m^3$
% de vacíos =	25.00%	

Las tablas de resúmenes con las cantidades, tanto en peso como en volumen, resultantes para la producción de un metro cúbico de hormigón poroso de pavimento para cada una de las mezclas, y su porcentaje de vacíos teórico se muestran a continuación.

**Cuadro N° 11: Proporción en peso de los materiales para elaborar 1m<sup>3</sup> de H<sup>o</sup>P<sup>o</sup> con 15% de vacíos**

<b>DOSIFICACIÓN EN PESO DE HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO CON 15% DE VACÍOS</b>		
Cemento (c) =	401.6	kg/m <sup>3</sup>
Agua (w) =	160.6	kg/m <sup>3</sup>
Agregado grueso =	1123.0	kg/m <sup>3</sup>
Agregado fino=	280.8	kg/m <sup>3</sup>

*fuelle: Elaboración propia*

**Cuadro N° 12: Proporción en volumen de los materiales para elaborar 1m<sup>3</sup> de H<sup>o</sup>P<sup>o</sup> con 15% de vacíos**

<b>DOSIFICACIÓN EN VOLUMEN DE HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO CON 15% DE VACÍOS</b>		
Cemento (c) =	0.128	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agua (w) =	0.161	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agregado grueso =	0.449	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agregado fino=	0.112	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
% de vacíos=	15.00	%

*fuelle: Elaboración propia*

**Cuadro N° 13: Proporción en peso de los materiales para elaborar 1m<sup>3</sup> de H<sup>o</sup>P<sup>o</sup> con 20% de vacíos**

<b>DOSIFICACIÓN EN PESO DE HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO CON 20% DE VACÍOS</b>		
Cemento (c) =	332.0	kg/m <sup>3</sup>
Agua (w) =	132.8	kg/m <sup>3</sup>
Agregado grueso =	1123.0	kg/m <sup>3</sup>
Agregado fino=	280.8	kg/m <sup>3</sup>

*fuelle: Elaboración propia*

**Cuadro N° 14: Proporción en volumen de materiales para elaborar 1m<sup>3</sup> de H<sup>o</sup>P<sup>o</sup> con 20% de vacíos**

<b>DOSIFICACIÓN EN VOLUMEN DE HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO CON 20% DE VACÍOS</b>		
Cemento (c) =	0.106	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agua (w) =	0.133	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agregado grueso =	0.449	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agregado fino=	0.112	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
% de vacíos=	20.00	%

*fuelle: Elaboración propia*

**Cuadro N° 15: Proporción en peso de los materiales para elaborar 1m<sup>3</sup> de H<sup>o</sup>P<sup>o</sup> con 25% de vacíos**

<b>DOSIFICACIÓN EN PESO DE HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO CON 25% DE VACÍOS</b>		
Cemento (c) =	262.3	kg/m <sup>3</sup>
Agua (w) =	104.9	kg/m <sup>3</sup>
Agregado grueso =	1123.0	kg/m <sup>3</sup>
Agregado fino =	280.8	kg/m <sup>3</sup>

*fuelle: Elaboración propia*

**Cuadro N° 16: Proporción en volumen de materiales para elaborar 1m<sup>3</sup> de H<sup>o</sup>P<sup>o</sup> con 25% de vacíos**

<b>DOSIFICACIÓN EN VOLUMEN DE HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO CON 25% DE VACÍOS</b>		
Cemento (c) =	0.084	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agua (w) =	0.105	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agregado grueso =	0.449	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agregado fino=	0.112	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
% de vacíos=	25.00	%

*fuelle: Elaboración propia*

Se estimaron un pastón de 3 probetas para cada una de las mezclas llegando a necesitar 0.016 m<sup>3</sup> por mezcla para poder realizar los ensayos correspondientes al hormigón poroso. La cantidad de material para cada mezcla son las siguientes:

<b>MEZCLA 1 (15% DE VACÍOS)</b>				
<b>MATERIAL</b>	<b>Peso por m<sup>3</sup> [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Volumen necesario para la mezcla [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Cantidad utilizada [Peso por m<sup>3</sup> x Vol. Necesario]</b>	<b>Unidades</b>
<b>CEMENTO</b>	401.6	0.016	6.425	Kg
<b>AGREGADO FINO</b>	280.8	0.016	4.492	Kg
<b>AGREGADO GRUESO</b>	1123.0	0.016	17.969	Kg
<b>AGUA</b>	160.6	0.016	2.570	litros

<b>MEZCLA 1 (20% DE VACÍOS)</b>				
<b>MATERIAL</b>	<b>Peso por m<sup>3</sup> [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Volumen necesario para la mezcla [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Cantidad utilizada [Peso por m<sup>3</sup> x Vol. Necesario]</b>	<b>Unidades</b>
<b>CEMENTO</b>	332.0	0.016	5.312	Kg
<b>AGREGADO FINO</b>	280.8	0.016	4.492	Kg
<b>AGREGADO GRUESO</b>	1123.0	0.016	17.969	Kg
<b>AGUA</b>	132.8	0.016	2.125	litros

<b>MEZCLA 1 (25% DE VACÍOS)</b>				
<b>MATERIAL</b>	<b>Peso por m<sup>3</sup> [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Volumen necesario para la mezcla [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Cantidad utilizada [Peso por m<sup>3</sup> x Vol. Necesario]</b>	<b>Unidades</b>
<b>CEMENTO</b>	300.1	0.016	4.197	Kg
<b>AGREGADO FINO</b>	277.5	0.016	4.492	Kg
<b>AGREGADO GRUESO</b>	1110.1	0.016	17.969	Kg

<b>AGUA</b>	120.0	0.016	1.68	litros
-------------	-------	-------	------	--------

Adicional a los volúmenes determinados para la elaboración de las diez probetas para cada una de las mezclas se incrementó este volumen en un 10% con el objeto de realizar el ensayo de consistencia y considerando que la mezcla resultante no es utilizada en su totalidad ya que siempre existen pérdidas.

### **3.5 Elaboración de las muestras**

Es importante obtener una cantidad suficiente de concreto para realizar los ensayos correspondientes, teniendo en cuenta que debe homogeneizarse todo para utilizar una porción representativa. Las cantidades de los materiales fueron pesadas en diferentes recipientes 30 minutos antes de su preparación. El tiempo en el que fueron amasados los materiales dentro de la mezcladora fue el necesario para conseguir una mezcla íntima y homogénea de sus componentes, habiendo conseguido que el agregado esté bien cubierto por la pasta de cemento, para esto se requirieron alrededor de dos minutos. Los ensayos al concreto fresco y el llenado de los especímenes cilíndricos se realizaron entre los primeros 15 minutos y a temperatura ambiente según lo estipulado en la guía de ensayos, donde previo al amasado y preparación de las mezclas, se procedió con todos los pasos establecidos en la guía de este ensayo, como el ajustado de los moldes y el rociado de su interior con una capa delgada de aceite mineral. Una vez llenos los moldes se les dió un reposo de 24 horas para el fraguado inicial y posteriormente ser extraídos y puestos en las piscinas de curado.

### **3.6 Características de la consistencia de las mezclas en estado fresco**

Dentro de los ensayos realizados al hormigón en estado fresco, el más importante y que fue llevado a cabo, es el de consistencia, ya que uno de los requisitos más importantes para un hormigón poroso de pavimento es que tenga una consistencia seca y sin revenimiento, obteniendo buenos resultados para los tres tipos de mezcla con 0 cm. de revenimiento en todos los casos.

*Figura 3. 4 Ensayo de consistencia sobre la mezcla dosificada con 15% de vacíos*



*Figura 3. 5 Ensayo de consistencia sobre la mezcla dosificada con 20% de vacíos*



*Figura 3. 6 Ensayo de consistencia sobre la mezcla dosificada con 25% de vacíos*



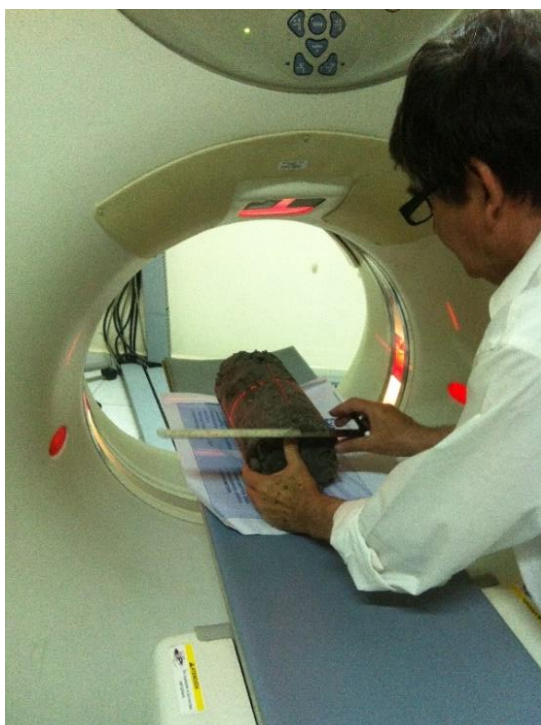
### **3.7 Curado de los especímenes**

Después de sacar los especímenes de los moldes, luego de 24 horas de haberlos llenado, se colocaron en las piscinas de curado del laboratorio de suelos, estando totalmente sumergidas en agua, este proceso se interrumpió a los 7 días de curado para ser transportados a la clínica Santísima Trinidad para su posterior prueba con rayos X, terminadas las tomografías se volvieron a llevar al lugar de curado para que cumplan los 28 días necesarios para alcanzar una resistencia adecuada para el ensayo de resistencia a la compresión.

### **3.8 Aplicación de rayos X sobre las muestras de hormigón poroso**

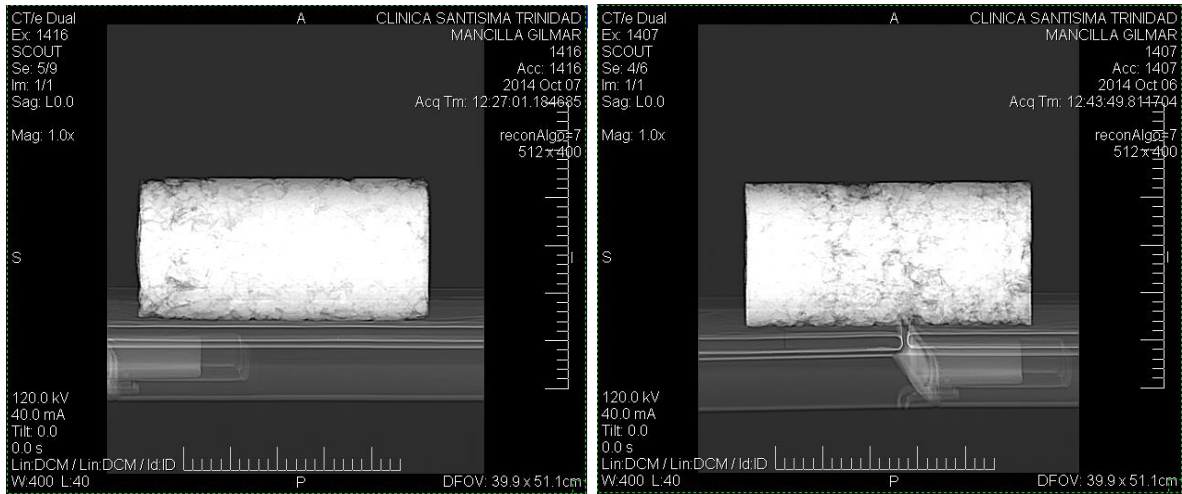
Como ya se mencionó anteriormente, las pruebas de aplicación de rayos X sobre las probetas de hormigón poroso de pavimentos se llevaron a cabo mediante el tomógrafo de la clínica Santísima Trinidad que cuenta con un tomógrafo “hi-speed” de General Electric, llegando a obtener 6 imágenes de corte por cada una de las probetas, la ubicación de los cortes se establecieron a los 2.5 cm, 7.5 cm, 12.5 cm, 17.5 cm, 22.5 cm y 27.5 cm a lo largo de su longitud, teniendo una representatividad de 2.5 cm a cada lado y hacer la evaluación con 5 cm por cada imagen abarcando así los 30 cm de largo de las probetas.

*Figura 3. 7 Pruebas de tomografía computarizada aplicando Rayos X sobre las Probetas de Hormigón Poroso*

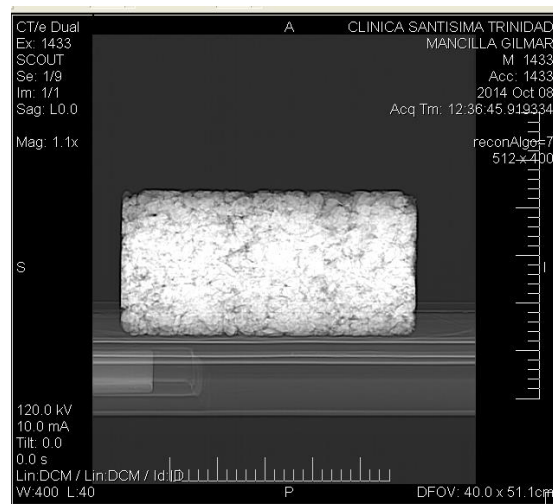


Individualmente de los cortes que muestran la estructura interna de los especímenes, el técnico del tomógrafo nos brindó una imagen de una probeta completa de cada mezcla, es decir, una de 15%, una de 20% y una de 25%, en las que ya se puede observar a simple vista la porosidad que cada una de ellas tiene.

**Figura 3. 8 Tomografía a probeta completa con 15% de vacíos**      **Figura 3. 9 Tomografía a probeta completa con 20% de vacíos**



**Figura 3. 10 Tomografía a probeta completa con 25% de vacíos**



### 3.9 Características de las propiedades de las mezclas en estado endurecido

#### 3.9.1 Resistencia a la compresión

Las pruebas de resistencia se realizaron a los 28 días del mes de octubre, habiendo transcurrido así 29 días después de su vaciado para las probetas de 15% y 28 días después de su vaciado para las de 20% y 25%.

El procedimiento se efectuó en el laboratorio de suelos de la Universidad, haciendo uso de la prensa hidráulica y siguiendo los pasos determinados en la guía de dicho ensayo.

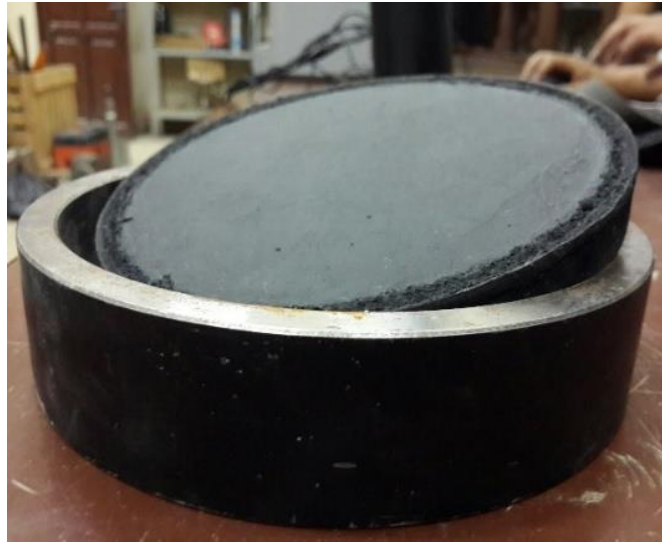
Las primeras probetas ensayadas fueron las de 25%, haciendo la rotura de las primeras dos con las bases de caucho con las que cuenta el laboratorio de suelos, pero debido a que el área de contacto entre la probeta y la prensa no es regular, la fuerza aplicada a las superficies transversales de las probetas se concentraba en un solo punto originando el rápido desprendimiento de las partículas de agregado grueso afectadas. Como estas dos primeras probetas alcanzaron una resistencia a la compresión muy baja, se optó por hacer uso de dos retenedores con base de neopreno para el resto de los especímenes, obteniendo así resultados mucho más satisfactorios.

En caso de no poder tener a disponibilidad los retenedores con las bases de neopreno se puede optar por capinar las superficies de contacto para lograr mejores resultados.

*Figura 3. 11 Retenedores con base de neopreno*



*Figura 3. 12 Retenedores con base de Neopreno*



*Figura 3. 13 Ruptura de probeta utilizando los retenedores con base de Neopreno*





## LABORATORIO DE SUELOS Y TECNOLOGIA DEL HORMIGON

### ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESION DE PROBETAS CILINDRICAS DE HORMIGON POROSO

Proyecto: Evaluación del contacto agregado y vacíos en hormigón poroso de pavimento aplicando rayos x

Identificación: 10 Probetas con 15% de vacíos

Procedencia Tarjua

Fecha: 28/10/2014

Solicitante:

Probeta N°	ESPECIFICACION	Identificación	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Lectura Calibrada (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
1	Hormigón Poroso	P1-15%	29-09-14	28-10-14	29	176.71	227	223	22776.89	128.89	128.89
2	Hormigón Poroso	P2-15%	29-09-14	28-10-14	29	176.71	331	326	33248.27	188.15	188.15
3	Hormigón Poroso	P3-15%	29-09-14	28-10-14	29	176.71	326	321	32702.54	185.06	185.06
4	Hormigón Poroso	P4-15%	29-09-14	28-10-14	29	176.71	333	327	33385.96	188.93	188.93
5	Hormigón Poroso	P5-15%	29-09-14	28-10-14	29	176.71	336	331	33739.73	190.93	190.93
6	Hormigón Poroso	P6-15%	29-09-14	28-10-14	29	176.71	335	329	33565.86	189.94	189.94
7	Hormigón Poroso	P7-15%	29-09-14	28-10-14	29	176.71	328	323	32919.63	186.29	186.29
8	Hormigón Poroso	P8-15%	29-09-14	28-10-14	29	176.71	330	325	33148.77	187.58	187.58
9	Hormigón Poroso	P9-15%	29-09-14	28-10-14	29	176.71	222	218	22198.00	125.61	125.61
10	Hormigón Poroso	P10-15%	29-09-14	28-10-14	29	176.71	335	329	33586.97	190.06	190.06

#### Observaciones:

1. El muestreo y curado de probetas fue proporcionado por el solicitante
2. Los datos de vaciado fueron proporcionados por el solicitante



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO"  
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA  
 CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

## LABORATORIO DE SUELOS Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN

### ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS DE HORMIGÓN POROSO

Proyecto: Evaluación del contacto agregado agregado y vacíos en hormigón poroso de pavimento aplicando rayos x

Identificación: 10 Probetas con 20% de vacíos

Fecha: 28/10/2014

Procedencia Tarifa

Solicitante:

Probeta N°	ESPECÍFICA CION	Identificación	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Sección (cm2)	Lectura (KN)	Lectura Calibrada (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm2)	Proyección 28 días (kg/cm2)
1	Hormigón Poroso	P1-20%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	191	188	19176.89	108.52	108.52
2	Hormigón Poroso	P1-20%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	169	166	16899.49	95.63	95.63
3	Hormigón Poroso	P1-20%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	172	169	17270.35	97.73	97.73
4	Hormigón Poroso	P1-20%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	158	155	15789.94	89.35	89.35
5	Hormigón Poroso	P1-20%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	158	155	15851.25	89.70	89.70
6	Hormigón Poroso	P1-20%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	166	163	16572.86	93.78	93.78
7	Hormigón Poroso	P1-20%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	198	195	19851.26	112.34	112.34
8	Hormigón Poroso	P1-20%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	201	198	20141.71	113.98	113.98
9	Hormigón Poroso	P1-20%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	207	203	20730.66	117.31	117.31
10	Hormigón Poroso	P1-20%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	196	192	19605.03	110.94	110.94

#### Observaciones:

1. El muestreo y curado de probetas fue proporcionado por el solicitante
2. Los datos de vaciado fueron proporcionados por el solicitante

Ing. Moisés Díaz Ayarde  
 RESP. LAB. SUELOS Y HORMIGONES



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO"  
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

## LABORATORIO DE SUELOS Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN

### ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS DE HORMIGÓN POROSO

Proyecto: Evaluación del contacto agregado y vacíos en hormigón poroso de pavimento aplicando rayos x

Identificación: 10 Probetas con 25% de vacíos

Fecha: 28/10/2014

Procedencia Tarija

Solicitante:

Probeta N°	ESPECIFICACION	Identificación	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Sección (cm <sup>2</sup> )	Lectura (KN)	Lectura Calibrada (KN)	Carga (kg)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	Proyección 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
1	Hormigón Poroso	P1-25%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	150	147	15025.12	85.02	85.02
2	Hormigón Poroso	P1-25%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	140	137	13972.85	79.07	79.07
3	Hormigón Poroso	P1-25%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	147	144	14717.58	83.28	83.28
4	Hormigón Poroso	P1-25%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	149	146	14912.56	84.39	84.39
5	Hormigón Poroso	P1-25%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	135	133	13548.73	76.67	76.67
6	Hormigón Poroso	P1-25%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	87	85	8637.17	48.88	48.88
7	Hormigón Poroso	P1-25%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	145	142	14473.36	81.90	81.90
8	Hormigón Poroso	P1-25%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	92	90	9172.85	51.91	51.91
9	Hormigón Poroso	P1-25%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	139	136	13879.39	78.54	78.54
10	Hormigón Poroso	P1-25%	30-09-14	28-10-14	28	176.71	139	136	13902.50	78.67	78.67

#### Observaciones:

1. El muestreo y curado de probetas fue proporcionado por el solicitante
2. Los datos de vaciado fueron proporcionados por el solicitante

Ing. Moisés Díaz Ayarde  
RESP. LAB. SUELOS Y HORMIGONES

A continuación se muestra los valores de las resistencias que serán utilizados y los valores que fueron depurados para realizar las gráficas correspondientes al ensayo de resistencia.

**Cuadro N° 17: Resultados del ensayo de la resistencia a la compresión para una mezcla con agregado grueso redondeado dosificada con 15% de vacíos**

<b>PROBETAS DE 15%</b>		
<b>N° PROBETA</b>	<b>RESIST. A LA COMPRESIÓN</b>	<b>Valores a utilizar</b>
	<b>kg/cm2</b>	
<b>P1</b>	128.89	DEPURADO
<b>P2</b>	188.15	188.15
<b>P3</b>	185.06	185.06
<b>P4</b>	188.93	188.93
<b>P5</b>	190.93	190.93
<b>P6</b>	189.94	189.94
<b>P7</b>	186.29	186.29
<b>P8</b>	187.58	187.58
<b>P9</b>	125.61	DEPURADO
<b>P10</b>	190.06	190.06

*fuentes: Elaboración propia*

**Cuadro N° 18: Resultados del ensayo de la resistencia a la compresión para una mezcla con agregado grueso redondeado dosificada con 20% de vacíos**

<b>PROBETAS DE 20%</b>		
<b>N° PROBETA</b>	<b>RESIST. A LA COMPRESIÓN</b>	<b>Valores a utilizar</b>
	<b>kg/cm2</b>	
<b>P1</b>	108.52	108.52
<b>P2</b>	95.63	95.63
<b>P3</b>	97.73	97.73
<b>P4</b>	89.35	DEPURADO
<b>P5</b>	89.70	DEPURADO
<b>P6</b>	93.78	93.78
<b>P7</b>	112.34	112.34
<b>P8</b>	113.98	DEPURADO
<b>P9</b>	117.31	DEPURADO
<b>P10</b>	110.94	110.94

*fuentes: Elaboración propia*

**Cuadro N° 19: Resultados del ensayo de la resistencia a la compresión para una mezcla con agregado grueso redondeado dosificada con 25% de vacíos**

<b>PROBETAS DE 25%</b>		
<b>N° PROBETA</b>	<b>RESIST. A LA COMPRESIÓN</b>	<b>Valores a utilizar</b>
	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	
<b>P1</b>	85.02	85.024777
<b>P2</b>	79.07	79.070184
<b>P3</b>	83.28	83.28
<b>P4</b>	84.39	84.39
<b>P5</b>	76.67	76.67
<b>P6</b>	48.88	DEPURADO
<b>P7</b>	81.90	81.90
<b>P8</b>	51.91	DEPURADO
<b>P9</b>	78.54	78.54
<b>P10</b>	78.67	78.67

*fuelle: Elaboración propia*

**Cuadro N° 20: Resultados promedio para cada mezcla de resistencia a la compresión**

<b>% de vacíos</b>	<b>Valores medios de resistencia a la compresión</b>
	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>15%</b>	188.37
<b>20%</b>	103.16
<b>25%</b>	80.94

*fuelle: Elaboración propia*

<b>ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESION DE PROBETAS CILINDRICAS DE HORMIGON POROSO</b>											
<b>PROYECTO: EVALUACION DEL CONTACTO AGREGADO Y VACIOS EN HORMIGÓN POROSO DE PAVIMENTO APLICANDO RAYOS X</b>											
<b>IDENTIFICACION:</b> Paston de pruebas en probetas con 15%, 20% y 25% de vacíos											
<b>ESPECIFICACION:</b> Cilindros de Hormigón Poroso con agregado grueso triturado											
Probeta Rot. N°	Ho Tipo	Asent. Cm	Fechas		Edad (días)	Lectura (KN)	Lectura Calib. (KN)	Carga (kg)	Area (cm2)	Resistencia (Kg/cm2)	Resist. 28 días
			Vaciado	Rotura							
P1 - 15%	H°P°	-	10-12-14	17-12-14	7	257	253	25813.36	176.71	146.07	202.78
P2 - 15%	H°P°	-	10-12-14	17-12-14	7	263	258	26356.23	176.71	149.15	207.04
P3 - 15%	H°P°	-	10-12-14	17-12-14	7	255	250	25521.82	176.71	144.42	200.49
P1 - 20%	H°P°	-	10-12-14	17-12-14	7	152	149	15247.53	176.71	86.28	119.78
P2 - 20%	H°P°	-	10-12-14	17-12-14	7	159	156	15880.88	176.71	89.87	124.75
P3 - 20%	H°P°	-	10-12-14	17-12-14	7	156	153	15599.39	176.71	88.27	122.54
P1 - 25%	H°P°	-	10-12-14	17-12-14	7	118	116	11789.26	176.71	66.71	92.61
P2 - 25%	H°P°	-	10-12-14	17-12-14	7	115	113	11537.93	176.71	65.29	90.64
P3 - 25%	H°P°	-	10-12-14	17-12-14	7	112	109	11155.91	176.71	63.13	87.63

En las siguientes tablas se muestra los valores de las resistencias a la compresión alcanzada por las mezclas fabricadas con grava triturada que serán valores que nos brinden un parámetro de comparación de la variabilidad que existe en la resistencia a la compresión de una mezcla de hormigón poroso cuando se emplea materiales con propiedades diferentes.

**Cuadro N° 21 Resultados del ensayo de la resistencia a la compresión para una mezcla con agregado grueso triturado dosificada con 15% de vacíos**

<b>PROBETAS DE 15%</b>	
<b>N° PROBETA</b>	<b>RESIST. A LA COMPRESIÓN</b>
	<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>
P1	202.78
P2	207.04
P3	200.49

*fuelle: Elaboración propia*

**Cuadro N° 22 Resultados del ensayo de la resistencia a la compresión para una mezcla con agregado grueso triturado dosificada con 20% de vacíos**

<b>PROBETAS DE 20%</b>	
<b>N° PROBETA</b>	<b>RESIST. A LA COMPRESIÓN</b>
	<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>
P1	119.78
P2	124.75
P3	122.54

*fuelle: Elaboración propia*

**Cuadro N° 23 Resultados del ensayo de la resistencia a la compresión para una mezcla con agregado grueso triturado dosificada con 25% de vacíos**

<b>PROBETAS DE 25%</b>	
<b>N° PROBETA</b>	<b>RESIST. A LA COMPRESIÓN</b>
	<b>Kg/cm2</b>
P1	92.61
P2	90.64
P3	87.63

*fuelle: Elaboración propia*

**Cuadro N° 24 Resultados promedio para cada mezcla de resistencia a la compresión**

<b>% de vacíos</b>	<b>Valores medios de resistencia a la compresión</b>
	<b>Kg/cm2</b>
<b>15%</b>	203.43
<b>20%</b>	122.36
<b>25%</b>	90.29

*fuelle: Elaboración propia*

*Cuadro N° 25 Valores de las resistencias a la compresión promedio de cada mezcla utilizando diferentes tipos de agregado grueso (redondeado y triturado)*

% de vacíos	Valores medios de resistencia	
	CON GRAVA REDONDEADA	CON GRAVA TRITURADA
	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
<b>15%</b>	188.37	203.43
<b>20%</b>	103.16	122.36
<b>25%</b>	80.94	90.29

### 3.9.2 Capacidad de filtración o permeabilidad

La tasa de infiltración, capaz de escurrir por la estructura interna de los tres distintos tipos de mezcla, guarda relación directa con el contenido de vacíos presentes, es decir, mientras mayor porcentaje de vacíos contenga una mezcla de hormigón poroso de pavimento, mayor será la tasa de infiltración que drena en su interior.

*Figura 3. 14 Ensayo para la determinación de la tasa de infiltración*



A continuación los resultados obtenidos de este ensayo

Datos.-	PORCENTAJE DE VACÍOS EN MEZCLA		
	13%	20%	26%
Agua (cm <sup>3</sup> )	500	1000	1000
Diámetro de ensayo (m)	0.15	0.15	0.15
Área de ensayo (m <sup>2</sup> )	0.0177	0.0177	0.0177

**Cuadro N° 26: Resultados de la determinación de la tasa de infiltración para una mezcla de H<sup>o</sup>P dosificada con 15% de vacíos**

<b>PROBETAS CON 15% DE VACÍOS</b>		
<b>N° DE PROBETA</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Tasa de infiltración</b>
	<b>(seg.)</b>	<b>(cm<sup>3</sup>/seg.)</b>
<b>P1</b>	9.01	55.494
<b>P2</b>	13.1	38.168
<b>P3</b>	14.1	35.461
<b>P4</b>	15.21	32.873
<b>P5</b>	16.02	31.211
<b>P6</b>	16.14	30.979
<b>P7</b>	14.67	34.083
<b>P8</b>	14.75	33.898
<b>P9</b>	8.36	59.809
<b>P10</b>	14.48	34.530
<b>PROMEDIO</b>		<b>38.651</b>

*fuelle: Elaboración propia*

**Cuadro N° 27: Resultados de la determinación de la tasa de infiltración para una mezcla de H<sup>o</sup>P dosificada con 20% de vacíos**

<b>PROBETAS CON 20% DE VACÍOS</b>		
<b>N° DE PROBETA</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Tasa de infiltración</b>
	<b>(seg.)</b>	<b>(cm<sup>3</sup>/seg.)</b>
<b>P1</b>	11.18	89.445
<b>P2</b>	10.24	97.656
<b>P3</b>	10.67	93.721
<b>P4</b>	10.89	91.827
<b>P5</b>	11.06	90.416
<b>P6</b>	11.14	89.767
<b>P7</b>	13.06	76.570
<b>P8</b>	13.41	74.571
<b>P9</b>	12.71	78.678
<b>P10</b>	12.68	78.864
<b>PROMEDIO</b>		<b>86.152</b>

*fuelle: Elaboración propia*

**Cuadro N° 28 Resultados de la determinación de la tasa de infiltración para una mezcla de H<sup>o</sup>P dosificada con 25% de vacíos**

<b>PROBETAS CON 25% DE VACÍOS</b>		
<b>N° DE PROBETA</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Tasa de infiltración</b>
	<b>(seg.)</b>	<b>(cm<sup>3</sup>/seg.)</b>
<b>P1</b>	9.83	101.729
<b>P2</b>	9.66	103.520
<b>P3</b>	9.65	103.627
<b>P4</b>	9.39	106.496
<b>P5</b>	8.93	111.982
<b>P6</b>	10.07	99.305
<b>P7</b>	10.05	99.502
<b>P8</b>	10.36	96.525
<b>P9</b>	11.67	85.690
<b>P10</b>	10.99	90.992
<b>PROMEDIO</b>		<b>99.937</b>

*fuentes: Elaboración propia*

Los valores promedios de las 10 probetas de cada mezcla sobre las que se realizaron los ensayos de capacidad de infiltración se muestran en la siguiente tabla.

**Cuadro N° 29: Resultados de la tasa de infiltración promedio por mezcla**

	<b>INFILTRACIÓN Vs PORCENTAJE DE VACÍOS</b>		
<b>PORCENTAJE DE VACÍOS REAL (%)</b>	12.84%	19.19%	25.93%
<b>TASA DE INFILTRACIÓN (cm<sup>3</sup>/seg.)</b>	38.651	86.152	99.937

*fuentes: Elaboración propia*

### 3.9.3 Peso Unitario

Todas las probetas elaboradas fueron pesadas para obtener el peso unitario y ver la influencia que tienen las distintas porosidades en el peso que tienen en un determinado volumen, además para que posteriormente se pueda realizar la determinación del porcentaje de vacíos mediante relaciones gravimétricas y consiguientemente comparar los resultados obtenidos.

*Cuadro N° 30: Peso Unitario de cada probeta de las tres mezclas*

PROBETA N°	PROBETAS CON 15%		PROBETAS CON 20%		PROBETAS CON 25%	
	Peso	P.U.	Peso	P.U.	Peso	P.U.
	kg	kg/m <sup>3</sup>	kg	kg/m <sup>3</sup>	kg	kg/m <sup>3</sup>
P1	11.845	2234.300	11.17	2106.976	10.83	2042.842
P2	11.974	2258.633	11.048	2083.963	10.544	1988.894
P3	11.856	2236.375	11.167	2106.410	10.638	2006.626
P4	11.975	2258.821	10.885	2053.217	10.775	2032.468
P5	12.175	2296.547	10.914	2058.687	10.211	1926.081
P6	12.011	2265.612	11.015	2077.738	10.505	1981.538
P7	11.9	2244.674	11.241	2120.368	10.625	2004.173
P8	11.964	2256.746	11.276	2126.970	10.512	1982.858
P9	11.83	2231.470	11.365	2143.758	10.34	1950.414
P10	12.084	2279.382	11.186	2109.994	10.353	1952.867
<b>MEDIA</b>		<b>2256.25592</b>		<b>2098.80807</b>		<b>1986.87616</b>

*fuentes: Elaboración propia*

### 3.10 Determinación del número de contacto de los agregados dentro de la estructura interna del hormigón poroso

Ya que la respuesta mecánica del hormigón poroso de pavimento recae directamente sobre el contacto entre agregados, se cuantificó el número de contactos existentes en cada una de las probetas de las tres mezclas para después promediarlas por tipo de mezcla. Es de suponer que las mezclas que posean mayor resistencia tendrán un mayor número de contacto agregado-agregado y menor porcentaje de vacíos, es de esta manera que se muestra a continuación el resultado de la cuantificación del número de contactos para las tres diferentes mezclas.

**Cuadro N° 31: Número de contactos entre partículas de agregado grueso para cada probeta de las tres mezclas**

	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
P1	284	265	275
P2	316	243	246
P3	328	234	225
P4	303	254	263
P5	325	272	248
P6	374	265	248
P7	494	267	258
P8	467	280	217
P9	327	315	257
P10	415	310	208

*fuentes: Elaboración propia*

El mayor número de contactos pertenece a la mezcla 1 que contiene el menor porcentaje de vacíos, con 363.30 contactos por probeta como promedio de las diez muestras que le corresponde, en la mezcla 2 se contabilizó 271.60 contactos por probeta al promediar las diez muestras de esta mezcla, y la menor cantidad de contactos corresponde a la mezcla 3, que es la de mayor porcentaje de vacíos, con un valor de 244.20 contactos por probeta, pudiendo observar que el número de contacto agregado-agregado es inversamente proporcional al porcentaje de vacíos que contiene un hormigón poroso de pavimento, tal como se muestra en el siguiente resumen.

**Cuadro N° 32 Cuantía de la cantidad de contactos promedio por mezcla**

	NÚMERO DE CONTACTOS PROMEDIO POR MEZCLA	RANGO	
		MENOR	MAYOR
<b>MEZCLA 1</b>	363.30	284	494
<b>MEZCLA 2</b>	270.50	234	315
<b>MEZCLA 3</b>	244.50	208	275

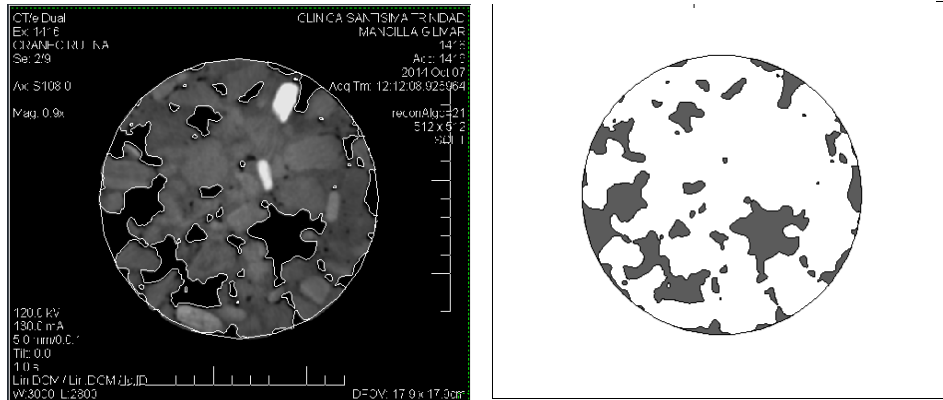
*fuentes: Elaboración propia*

El rango para la mezcla 1, como se puede ver, varía del 284 al 494, siendo este igual a 210 contactos, lo que nos muestra que realmente es impredecible como se van acomodando las partículas de agregado, para la mezcla 2 tenemos un rango de 87 contactos y 70 contactos para la mezcla 3.

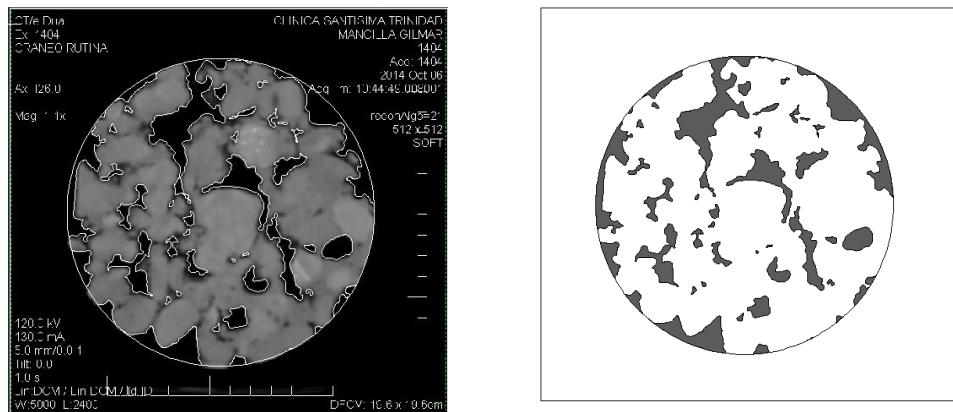
### **3.11 Determinación del porcentaje de vacíos presentes en las muestras de hormigón poroso de pavimento mediante las imágenes computarizadas de rayos X**

Para obtener los valores de porcentaje de vacíos presentes en una mezcla de hormigón poroso de pavimento se utilizó como una herramienta de alta confiabilidad el software AutoCAD, donde primeramente se determinó el área de vacíos haciendo una delimitación de estos espacios mediante el comando “POLYLINE” en cada una de las seis imágenes por probeta con las que contamos, para después poder insertar un algoritmo en la ventana de “VISUAL LISP EDITOR” que genere un comando mediante el cual el programa pueda calcular áreas irregulares que se encuentren dentro de la, o las, intersecciones de una o más poli-líneas, así se obtendrá el área de vacíos presente en cada uno de los cortes, resultados con los que se hará un promedio de áreas y con su longitud poder determinar el porcentaje de vacíos promedio en volumen de cada probeta de los tres distintos tipos de mezcla.

**Figura 3. 15 Delimitación de área de vacíos sobre la imagen computarizada para una mezcla con 15% de vacíos**



**Figura 3. 16 Delimitación de área de vacíos sobre la imagen computarizada para una mezcla con 20% de vacíos**



**Figura 3. 17 Delimitación de área de vacíos sobre la imagen computarizada para una mezcla con 15% de vacíos**



En las imágenes se puede apreciar las áreas que se cuantificaron para el cálculo de porcentaje de vacíos, siendo las primeras las imágenes obtenidas con el tomógrafo sobre las que se delimitaron dichas áreas, y las segundas muestran de color gris solamente el área tomada en cuenta. Para el cálculo se tomó como diámetro de probeta 0.15 metros y una altura de 0.3 metros para todas las probetas sin excepción, obteniendo así un área igual a 0.0177 metros cuadrados en la cara transversal de las probetas que servirá como parámetro en el cálculo de vacíos.

**Cálculo del porcentaje de vacíos sobre los diez especímenes de una mezcla dosificada con el 15% de vacíos.**

*Probeta 1*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0029	0.000145	16%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0029	0.000145	16%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0038	0.00019	22%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0036	0.00018	20%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0015	0.000075	8%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0012	0.00006	7%
Porcentaje de Vacíos promedio							15.00%

*Probeta 2*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0021	0.000105	12%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0021	0.000105	12%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0021	0.000105	12%

0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0018	0.00009	10%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0019	0.000095	11%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0021	0.000105	12%
Porcentaje de Vacíos promedio							11.41%

### Probeta 3

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0028	0.00014	16%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0024	0.00012	14%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0024	0.00012	14%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0024	0.00012	14%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0027	0.000135	15%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0034	0.00017	19%
Porcentaje de Vacíos promedio							15.18%

### Probeta 4

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0031	0.000155	18%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0022	0.00011	12%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.002	0.0001	11%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0015	0.000075	8%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0016	0.00008	9%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0015	0.000075	8%
Porcentaje de Vacíos promedio							11.22%

*Probeta 5*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0016	0.00008	9%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0015	0.000075	8%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0016	0.00008	9%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0018	0.00009	10%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.002	0.0001	11%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0025	0.000125	14%
Porcentaje de Vacíos promedio							10.37%

*Probeta 6*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0019	0.000095	11%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0018	0.00009	10%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0015	0.000075	8%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0019	0.000095	11%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.002	0.0001	11%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0024	0.00012	14%
Porcentaje de Vacíos promedio							10.85%

*Probeta 7*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0032	0.00016	18%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.002	0.0001	11%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0022	0.00011	12%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0022	0.00011	12%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0025	0.000125	14%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0025	0.000125	14%
Porcentaje de Vacíos promedio							13.77%

*Probeta 8*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0024	0.00012	14%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.002	0.0001	11%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0018	0.00009	10%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0021	0.000105	12%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.002	0.0001	11%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0028	0.00014	16%
Porcentaje de Vacíos promedio							12.36%

*Probeta 9*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0019	0.000095	11%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0021	0.000105	12%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0024	0.00012	14%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0029	0.000145	16%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0048	0.00024	27%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0047	0.000235	27%
Porcentaje de Vacíos promedio							17.73%

*Probeta 10*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0021	0.000105	12%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0015	0.000075	8%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0014	0.00007	8%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0027	0.000135	15%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0015	0.000075	8%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0019	0.000095	11%
Porcentaje de Vacíos promedio							10.47%

**Cálculo del porcentaje de vacíos sobre los diez especímenes de una mezcla dosificada con el 20% de vacíos.**

***Probeta 1***

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0018	0.00009	10%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0055	0.000275	31%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0008	0.00004	5%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0051	0.000255	29%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0034	0.00017	19%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0042	0.00021	24%
Porcentaje de Vacíos promedio							19.62%

***Probeta 2***

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0046	0.00023	26%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0038	0.00019	22%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0038	0.00019	22%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0018	0.00009	10%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0046	0.00023	26%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0038	0.00019	22%
Porcentaje de Vacíos promedio							21.13%

*Probeta 3*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0046	0.00023	26%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0033	0.000165	19%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0042	0.00021	24%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.002	0.0001	11%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0043	0.000215	24%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0037	0.000185	21%
Porcentaje de Vacíos promedio							20.84%

*Probeta 4*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0056	0.00028	32%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0029	0.000145	16%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0044	0.00022	25%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0049	0.000245	28%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0047	0.000235	27%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0013	0.000065	7%
Porcentaje de Vacíos promedio							22.45%

*Probeta 5*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0036	0.00018	20%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0028	0.00014	16%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.006	0.0003	34%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.003	0.00015	17%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0043	0.000215	24%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.001	0.00005	6%
Porcentaje de Vacíos promedio							19.52%

*Probeta 6*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0061	0.000305	35%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0032	0.00016	18%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0044	0.00022	25%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0033	0.000165	19%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0039	0.000195	22%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0009	0.000045	5%
Porcentaje de Vacíos promedio							20.56%

*Probeta 7*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0011	0.000055	6%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0053	0.000265	30%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0019	0.000095	11%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0042	0.00021	24%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0033	0.000165	19%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0039	0.000195	22%
Porcentaje de Vacíos promedio							18.58%

*Probeta 8*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0013	0.000065	7%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0039	0.000195	22%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0021	0.000105	12%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0031	0.000155	18%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0021	0.000105	12%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0033	0.000165	19%
Porcentaje de Vacíos promedio							14.90%

*Probeta 9*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0023	0.000115	13%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0021	0.000105	12%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0015	0.000075	8%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0036	0.00018	20%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0022	0.00011	12%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0057	0.000285	32%
Porcentaje de Vacíos promedio							16.41%

*Probeta 10*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0025	0.000125	14%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.005	0.00025	28%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.005	0.00025	28%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0031	0.000155	18%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0026	0.00013	15%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0008	0.00004	5%
Porcentaje de Vacíos promedio							17.92%

**Cálculo del porcentaje de vacíos sobre los diez especímenes de una mezcla dosificada con el 25% de vacíos.**

***Probeta 1***

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0053	0.000265	30%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0034	0.00017	19%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0049	0.000245	28%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0021	0.000105	12%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.007	0.00035	40%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0029	0.000145	16%
Porcentaje de Vacíos promedio							24.14%

***Probeta 2***

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0018	0.00009	10%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0075	0.000375	42%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.003	0.00015	17%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0077	0.000385	44%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.001	0.00005	6%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0049	0.000245	28%
Porcentaje de Vacíos promedio							24.43%

*Probeta 3*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0022	0.00011	12%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0075	0.000375	42%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0027	0.000135	15%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0067	0.000335	38%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0012	0.00006	7%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.006	0.0003	34%
Porcentaje de Vacíos promedio							24.80%

*Probeta 4*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0047	0.000235	27%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0043	0.000215	24%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0057	0.000285	32%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0028	0.00014	16%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0049	0.000245	28%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0042	0.00021	24%
Porcentaje de Vacíos promedio							25.09%

*Probeta 5*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0066	0.00033	37%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0032	0.00016	18%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0062	0.00031	35%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0038	0.00019	22%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0058	0.00029	33%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.005	0.00025	28%
Porcentaje de Vacíos promedio							28.86%

*Probeta 6*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0026	0.00013	15%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0057	0.000285	32%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.005	0.00025	28%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0045	0.000225	25%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0027	0.000135	15%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0078	0.00039	44%
Porcentaje de Vacíos promedio							26.69%

*Probeta 7*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0042	0.00021	24%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0034	0.00017	19%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0064	0.00032	36%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0022	0.00011	12%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0068	0.00034	38%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0033	0.000165	19%
Porcentaje de Vacíos promedio							24.80%

*Probeta 8*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0039	0.000195	22%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0039	0.000195	22%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0048	0.00024	27%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0041	0.000205	23%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0061	0.000305	35%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0041	0.000205	23%
Porcentaje de Vacíos promedio							25.37%

*Probeta 9*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0043	0.000215	24%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.004	0.0002	23%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.0041	0.000205	23%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0054	0.00027	31%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0049	0.000245	28%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.005	0.00025	28%
Porcentaje de Vacíos promedio							26.12%

*Probeta 10*

Ubicación de Corte	INFLUENCIA		Distancia entre cortes	Volumen Total	Área de vacíos	Volumen de vacíos	Porcentaje de vacíos
	Desde	Hasta					
(m)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	%
0.025	0	0.05	0.05	0.00088	0.0081	0.000405	46%
0.075	0.05	0.10	0.05	0.00088	0.0047	0.000235	27%
0.125	0.10	0.15	0.05	0.00088	0.005	0.00025	28%
0.175	0.15	0.20	0.05	0.00088	0.0039	0.000195	22%
0.225	0.20	0.25	0.05	0.00088	0.0026	0.00013	15%
0.275	0.25	0.30	0.05	0.00088	0.0064	0.00032	36%
Porcentaje de Vacíos promedio							28.95%

A continuación el resumen de los valores obtenidos de cada probeta para cada una de las mezclas.

**Cuadro N° 33 Resultado de la cuantificación del porcentaje de vacíos para cada probeta de las tres mezclas**

PROBETAS CON 15% DE VACÍOS		PROBETAS CON 20% DE VACÍOS		PROBETAS CON 25% DE VACÍOS	
N° de Probeta	% de vacíos Promedio	N° de Probeta	% de vacíos Promedio	N° de Probeta	% de vacíos Promedio
1	15.00%	1	19.62%	1	24.14%
2	11.41%	2	21.13%	2	24.43%
3	15.18%	3	20.84%	3	24.80%
4	11.22%	4	22.45%	4	25.09%
5	10.37%	5	19.52%	5	28.86%
6	10.85%	6	20.56%	6	26.69%
7	13.77%	7	18.58%	7	24.80%
8	12.36%	8	14.90%	8	25.37%
9	17.73%	9	16.41%	9	26.12%
10	10.47%	10	17.92%	10	28.95%
Media					
$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$					
MEDIA	12.84%		19.19%		25.93%

*fuelle: Elaboración propia*

### 3.12 Contrastación de la determinación del porcentaje de vacíos presentes en mezclas de hormigón poroso de pavimento mediante la relación de gravedad específica bulk y teórica

Para poder contrastar los resultados de porcentaje de vacíos obtenidos de la cuantificación sobre las imágenes computarizadas de rayos X mediante datos obtenidos de forma experimental, se relacionará la gravedad específica máxima teórica con la gravedad específica bulk o peso unitario, donde la primera se refiere a la relación entre la masa, o peso en el aire, de un volumen de mezcla sin compactar y la masa de un volumen igual de agua a una temperatura establecida, sin tener en cuenta los vacíos que quedan entre las partículas recubiertas con pasta de cemento, y la segunda es la relación entre la masa, o peso en el aire, de un volumen de mezcla y la masa de un volumen igual de agua, teniendo en cuenta los vacíos que quedan entre las partículas recubiertas con pasta de cemento. Para esto será necesario determinar la densidad relativa del concreto y luego ser relacionadas con los datos de peso unitario de las tres mezclas, esto se logrará dosificando los materiales para una mezcla con 0% de vacíos, donde la suma de las cantidades de los componentes arroje un resultado que represente la densidad de la mezcla que al ser dividida entre la densidad del agua a una cierta temperatura dará como resultado la densidad relativa o gravedad específica teórica. A continuación se muestran primeramente las cantidades de materiales que derivan de la dosificación con 0% de vacíos y luego los resultados obtenidos en este proceso de contrastación.

***Cuadro N° 34 Proporcionamiento de materiales para la elaboración de 1m<sup>3</sup> de hormigón sin vacíos mediante el mismo método de dosificación***

<b>CANTIDADES EN PESO, NECESARIAS PARA ELABORAR 1 m<sup>3</sup> DE HORMIGÓN CON 0% DE VACÍOS</b>		
Cemento (c) =	649.267	kg/m <sup>3</sup>
Agua (w) =	259.707	kg/m <sup>3</sup>
Agregado grueso =	1387.684	kg/m <sup>3</sup>
Agregado fino =	277.537	kg/m <sup>3</sup>
Masa Total =	2574.196	kg/m <sup>3</sup>

<b>CANTIDADES EN VOLUMEN, NECESARIAS PARA ELABORAR 1 m<sup>3</sup> DE HORMIGÓN CON 0% DE VACÍOS</b>		
Cemento (c) =	0.207	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agua (w) =	0.260	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agregado grueso =	0.427	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Agregado fino =	0.107	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

Densidad =	2574.196	kg/m <sup>3</sup>
Densidad relativa=	2.581	

% de vacíos=	0.0%
--------------	------

*fuelle: Elaboración propia*

El dato más importante de estos dos cuadros es la densidad relativa, que será relacionada con los pesos unitarios de las diez probetas para cada una de las mezclas y así determinar mediante este método el contenido de vacíos en los especímenes.

Se debe mencionar que la densidad relativa de la mezcla fue determinada dividiendo la densidad absoluta de la mezcla entre la densidad del agua a 24°C, que para este caso es igual a 997.38 kg/cm<sup>3</sup>. El mismo proceso se repite con los datos de peso unitario, con el fin de determinar la gravedad específica bulk.

Primeramente se hará la determinación del porcentaje de vacíos para la primera mezcla.

<b>PROBETAS CON 12.84% DE VACÍOS</b>			
<b>PROBETA N°</b>	<b>Peso</b>	<b>P.U.</b>	<b>Gravedad específica bulk</b>
	<b>kg</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>	
P1	11.845	2234.300	2.240
P2	11.974	2258.633	2.265
P3	11.856	2236.375	2.242
P4	11.975	2258.821	2.265
P5	12.175	2296.547	2.303
P6	12.011	2265.612	2.272
P7	11.945	2244.674	2.251
P8	11.964	2256.746	2.263
P9	11.830	2231.470	2.237
P10	12.084	2279.382	2.285
<b>MEDIA</b>			2.262

$$\%v = 100\left(1 - \frac{Gmb}{Gmm}\right)$$

**Donde.-**

$\%v$ = Porcentaje de vacíos en la mezcla compactada respecto al volumen del espécimen

$Gmm$ = Gravedad específica máxima teórica

$Gmb$ = Gravedad específica bulk de espécimen compactado

**Cuadro N° 35 Porcentajes de vacíos determinados mediante gravimetría para la mezcla 1**

<b>N° de PROBETA</b>	<b>G.S. bulk (Gmb)</b>	<b>G.S. máx. teórica (Gmm)</b>	<b>% Vacíos</b>
P1	2.240	2.581	13.20%
P2	2.265	2.581	12.26%
P3	2.242	2.581	13.12%
P4	2.265	2.581	12.25%
P5	2.303	2.581	10.79%
P6	2.272	2.581	11.99%
P7	2.251	2.581	12.80%
P8	2.263	2.581	12.33%
P9	2.237	2.581	13.31%
P10	2.285	2.581	11.45%
<b>PROMEDIO</b>			12.35%

*fuelle: Elaboración propia*

Para la segunda mezcla, con un porcentaje de vacíos base de 20%, los resultados son los siguientes:

PROBETAS CON 19.19% DE VACÍOS			
PROBETA N°	Peso	P.U.	Gravedad específica bulk
	kg	kg/m3	
P1	11.070	2088.113	2.094
P2	11.018	2078.304	2.084
P3	11.067	2087.547	2.093
P4	10.585	1996.628	2.002
P5	10.614	2002.098	2.007
P6	11.015	2077.738	2.083
P7	11.241	2120.368	2.126
P8	11.076	2089.245	2.095
P9	11.265	2124.895	2.130
P10	11.186	2109.994	2.116
<b>MEDIA</b>			2.083

$$\%v = 100\left(1 - \frac{Gmb}{Gmm}\right)$$

**Donde.-**

$\%v$ = Porcentaje de vacíos en la mezcla compactada respecto al volumen del espécimen

$Gmm$ = Gravedad específica máxima teórica

$Gmb$ = Gravedad específica bulk de espécimen compactado

Cuadro N° 36 Porcentajes de vacíos determinados mediante gravimetría para la mezcla 2

N° de PROBETA	G.S. bulk (Gmb)	G.S. máx teorica (Gmm)	% Vacíos
P1	2.094	2.581	18.88%
P2	2.084	2.581	19.26%
P3	2.093	2.581	18.90%
P4	2.002	2.581	22.44%
P5	2.007	2.581	22.22%
P6	2.083	2.581	19.29%
P7	2.126	2.581	17.63%
P8	2.095	2.581	18.84%
P9	2.130	2.581	17.45%
P10	2.116	2.581	18.03%
<b>PROMEDIO</b>			19.30%

*fuentes: Elaboración propia*

Y para la tercera mezcla, que tiene como fin alcanzar un 25% de contenido de vacíos, los resultados son los siguientes:

0.0053

<b>PROBETAS CON 25.93% DE VACÍOS</b>			
<b>PROBETA N°</b>	<b>Peso</b>	<b>P.U.</b>	<b>Gravedad esecífica bulk</b>
	<b>kg</b>	<b>kg/m3</b>	
<b>P1</b>	10.380	1957.959	1.963
<b>P2</b>	10.454	1971.918	1.977
<b>P3</b>	10.338	1950.037	1.955
<b>P4</b>	10.715	2021.150	2.026

<b>P5</b>	10.121	1909.105	1.914
<b>P6</b>	10.055	1896.655	1.902
<b>P7</b>	10.325	1947.585	1.953
<b>P8</b>	10.152	1914.952	1.920
<b>P9</b>	10.310	1944.756	1.950
<b>P10</b>	10.323	1947.208	1.952
<b>MEDIA</b>			1.951

$$\%v = 100\left(1 - \frac{Gmb}{Gmm}\right)$$

**Donde.-**

$\%v$ = Porcentaje de vacíos en la mezcla compactada respecto al volumen del espécimen

$Gmm$ = Gravedad específica máxima teórica

$Gmb$ = Gravedad específica bulk de espécimen compactado

**Cuadro N° 37 Porcentajes de vacíos determinados mediante gravimetría para la mezcla 3**

<b>N° de PROBETA</b>	<b>G.S. bulk (Gmb)</b>	<b>G.S. máx. teórica (Gmm)</b>	<b>% Vacíos</b>
<b>P1</b>	1.963	2.581	23.94%
<b>P2</b>	1.977	2.581	23.40%
<b>P3</b>	1.955	2.581	24.25%
<b>P4</b>	2.026	2.581	21.48%
<b>P5</b>	1.914	2.581	25.84%
<b>P6</b>	1.902	2.581	26.32%
<b>P7</b>	1.953	2.581	24.34%

<b>P8</b>	1.920	2.581	25.61%
<b>P9</b>	1.950	2.581	24.45%
<b>P10</b>	1.952	2.581	24.36%
<b>PROMEDIO</b>			24.40%

*fuelle: Elaboración propia*

El porcentaje de vacíos promedios obtenidos para cada una de las mezclas por medio de los tres métodos, mediante dosificación (teórica), mediante imágenes y mediante gravimetría, se resumen en el siguiente cuadro.

**Cuadro N° 38 Resultados promedios de porcentaje de vacíos obtenidos mediante las tres metodologías**

	<b>PROBETAS CON 15% DE VACÍOS</b>	<b>PROBETAS CON 20% DE VACÍOS</b>	<b>PROBETAS CON 25% DE VACÍOS</b>
<b>Número de mezcla</b>	1	2	3
<b>Mediante dosificación (teórica)</b>	15.27%	20.17%	25.07%
<b>Mediante imágenes</b>	12.84%	19.19%	25.93%
<b>Mediante relaciones Volumétricas</b>	12.35%	19.30%	24.40%

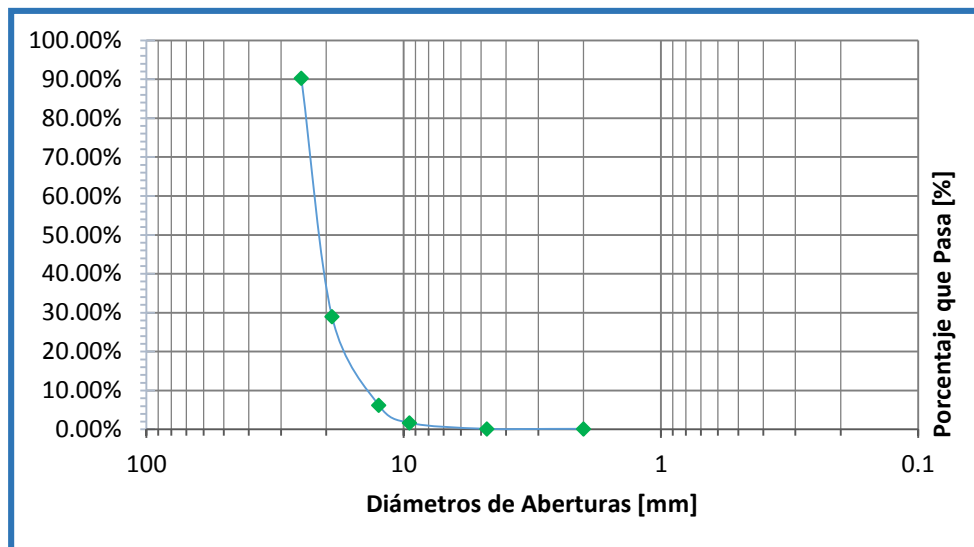
*fuelle: Elaboración propia*

### 3.13 Análisis de los resultados

Dentro de la caracterización de los agregados, cuando nos referimos a su granulometría se debe tener en cuenta que mientras más amplia sea la diversidad de tamaños de granos, el concreto permeable de pavimento se encuentra propenso a perder espacios vacíos, es por eso que se trabajó con una distribución de tamaños de partículas tal que arroje una curva

granulométrica lo más vertical posible demostrando así una gran uniformidad en el tamaño de sus partículas.

*Figura 3. 18 Curva granulométrica del agregado grueso*



El agregado grueso utilizado para la elaboración de las mezclas, presentó un peso específico en condición de saturado y superficialmente seco de 2,6, de este mismo ensayo se determinó el porcentaje de absorción que resultó igual a 1.69%. Otro resultado obtenido es el de peso unitario suelto que resultó 1505,18 kilogramos por metro cúbico y uno varillado de 1586.77 kilogramos por metro cúbico, este último es el dato que nos interesa para ser utilizado en el procedimiento de dosificación establecido por el reporte del comité 211 del ACI, dichos valores se encuentran dentro de los rangos normales que presentan los agregados utilizados en el concreto.

Para el ensayo de desgaste con la máquina de los ángeles se hizo el tamizado del material para lograr una gradación “A”, ya que los valores límites de esta gradación son los que abarcan la mayor cantidad de tamaños dentro de la distribución granulométrica, el ensayo arrojó un valor de 28%, considerablemente alejado al valor permitido que es 40%, cabe decir que para este ensayo el laboratorio de suelos de la universidad no cuenta con el tamiz N°12, puesto que se debió realizar la separación del material con el N°10, se considera que el resultado de desgastes es aún más confiable por haber utilizado una malla de mayor diámetro.

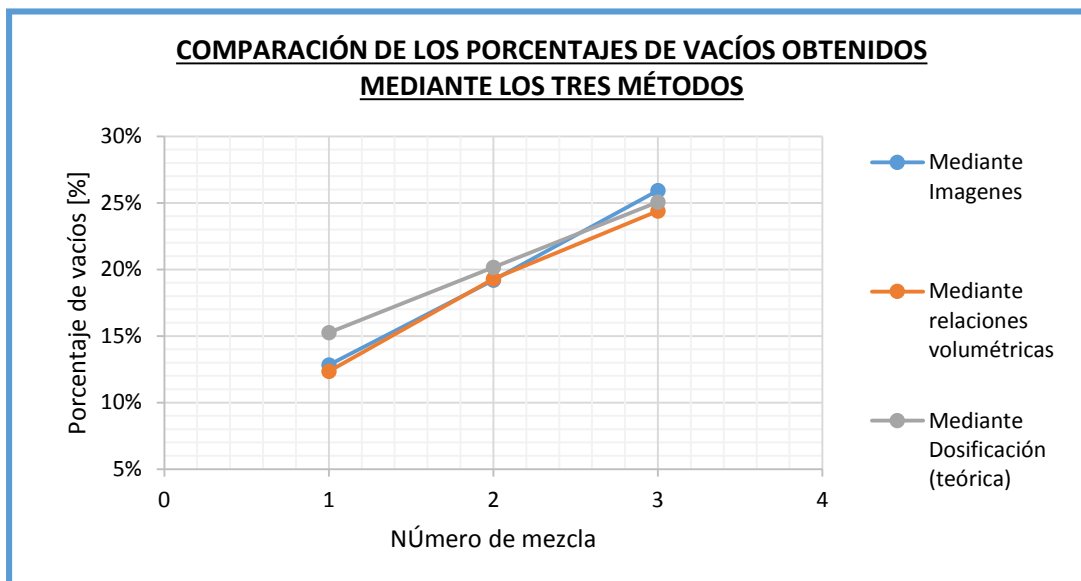
Para el proceso de dosificación y determinación de las cantidades de los materiales empleados en la elaboración de las mezclas de hormigón poroso de pavimento, se definieron

tres diferentes porcentajes de vacíos, los cuales deberían ser alcanzados al momento de ser elaboradas, dichas mezclas son de 15%, 20% y 25%, las que se dosificaron y se realizaron en la práctica.

Para la mezcla de 15% de vacíos se estableció un 15.27% en la dosificación para posteriormente obtener un 12.84% como promedio de la evaluación sobre las imágenes computarizadas de rayos X y un 12.35% en el cálculo mediante gravimetría como promedio de las diez probetas con este tipo de mezcla. Para la segunda mezcla, donde se pretendió alcanzar un aproximado del 20% de vacíos, se obtuvo un 20.17% en el procedimiento de dosificación, un 19.19% en la evaluación sobre las imágenes computarizadas de rayos X y un 19.30% mediante gravimetría como promedio de las diez probetas con este tipo de mezcla. En cuanto a la última mezcla se procuró lograr un 25% de vacíos, siendo determinado un 25.07% en el proceso de dosificación, un 25.93% en la práctica y un 24.40% mediante las relaciones de pesos y volúmenes, siendo este último el promedio de las diez probetas evaluadas con esta mezcla.

<b>CUADRO COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS</b>			
	<b>PROBETAS CON 15% DE VACÍOS</b>	<b>PROBETAS CON 20% DE VACÍOS</b>	<b>PROBETAS CON 25% DE VACÍOS</b>
<b>Número de mezcla</b>	1	2	3
<b>Mediante dosificación (teórica)</b>	15.27%	20.17%	25.07%
<b>Mediante imágenes</b>	12.84%	19.19%	25.93%
<b>Mediante Gravimetría</b>	12.35%	19.30%	24.40%

**Figura 3. 19 Resultados de porcentaje de vacíos determinado por los 3 métodos**

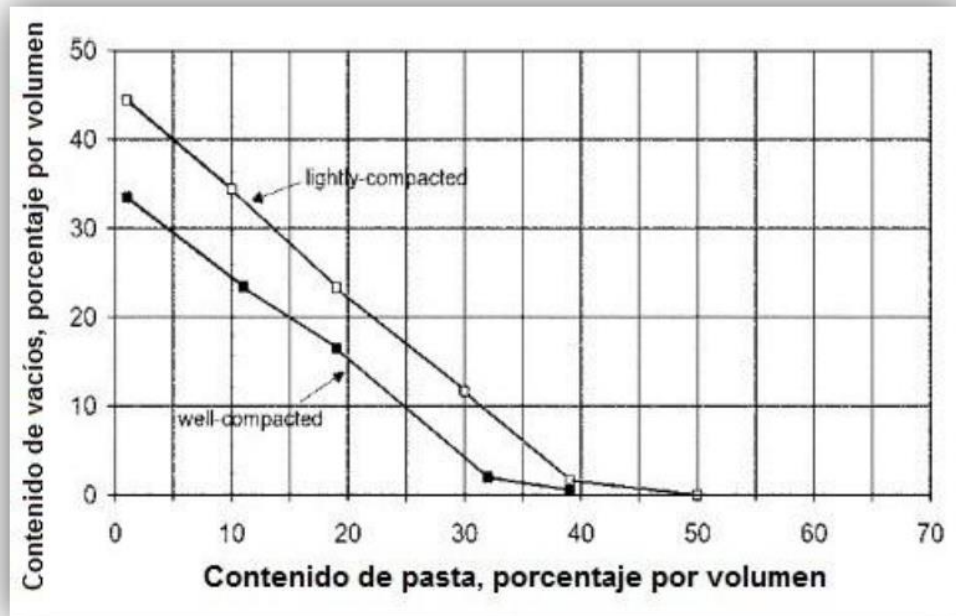


La gráfica representa la variación que existe en el porcentaje de vacíos, como promedio global para cada una de las tres mezclas, calculado mediante los tres métodos, sobre la imágenes computarizadas de rayos X, mediante gravimetría y por medio de la dosificación o teóricamente. Se puede observar que para la mezcla N°1 los resultados experimentales, obtenidos de las imágenes computarizadas de rayos X y mediante gravimetría, están ligeramente más alejados del valor resultante de la dosificación en comparación a las otras dos mezclas. Para la segunda mezcla, al igual que la primera, los resultados experimentales se encuentran por debajo del valor que resultó de la dosificación habiendo una diferencia de 0.98% entre los valores más separados. Para la última mezcla se puede ver que el valor que se obtuvo de la dosificación está entre los valores experimentales, encima del resultado de la gravimetría y por debajo del obtenido mediante las imágenes computarizadas, con una diferencia entre 1.53% entre los valores más separados correspondientes al cálculo sobre las imágenes computarizadas y el resultado de la gravimetría, con valores de 25.93% y 24.40% de vacíos respectivamente.

La variación que existe entre los valores base, 15%, 20%, y 25%, y los que resultan de la dosificación se debe a que para definir el contenido de pasta en porcentaje por volumen en el proceso de dosificación se utilizan curvas de una gráfica proporcionada por la ACI, que en función al contenido de vacíos y el nivel de compactación empleado, nos brinda el porcentaje

de volumen de pasta, puesto que durante el proceso descrito puede existir un margen de error mínimo en la lectura de los valores, la variación de los valores es también mínima, la tabla mencionada se muestra a continuación:

*Figura 3. 20 Curva para la determinación del contenido de pasta*



La comparación de los datos obtenidos puede ser desglosada mostrando la diferencia que hay entre el porcentaje de vacíos alcanzado mediante las tres metodologías para cada uno de los especímenes ensayados y para cada una de las tres mezclas con valores base de 15, 20% y 25%.

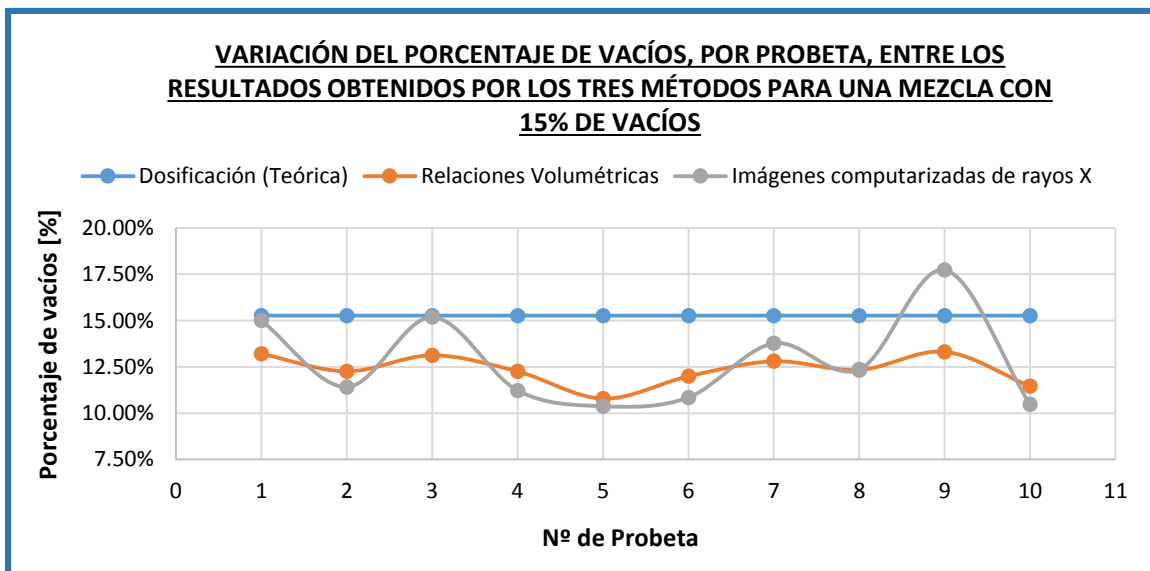
A continuación se muestra la comparación de los resultados de porcentaje de vacíos obtenidos para una mezcla de hormigón poroso de pavimento con una base de 15%, 20% y 25% de vacíos.

**Cuadro N° 39 Cuadro comparativo del porcentaje de vacíos por probeta obtenido para la mezcla 1 mediante las tres metodologías**

N° de Probeta	Para un porcentaje de vacíos base de 15%		
	VALORES		
	Dosificación (teórica)	Relaciones Volumétricas	Imágenes Computarizadas
P1	15.27%	13.20%	15.00%
P2	15.27%	12.26%	11.41%
P3	15.27%	13.12%	15.18%
P4	15.27%	12.25%	11.22%
P5	15.27%	10.79%	10.37%
P6	15.27%	11.99%	10.85%
P7	15.27%	12.80%	13.77%
P8	15.27%	12.33%	12.36%
P9	15.27%	13.31%	17.73%
P10	15.27%	11.45%	10.47%
<b>PROMEDIO</b>	15.27%	12.35%	12.84%

*fuelle: Elaboración propia*

**Figura 3. 21 Variación de porcentajes de vacíos para mezcla 1**

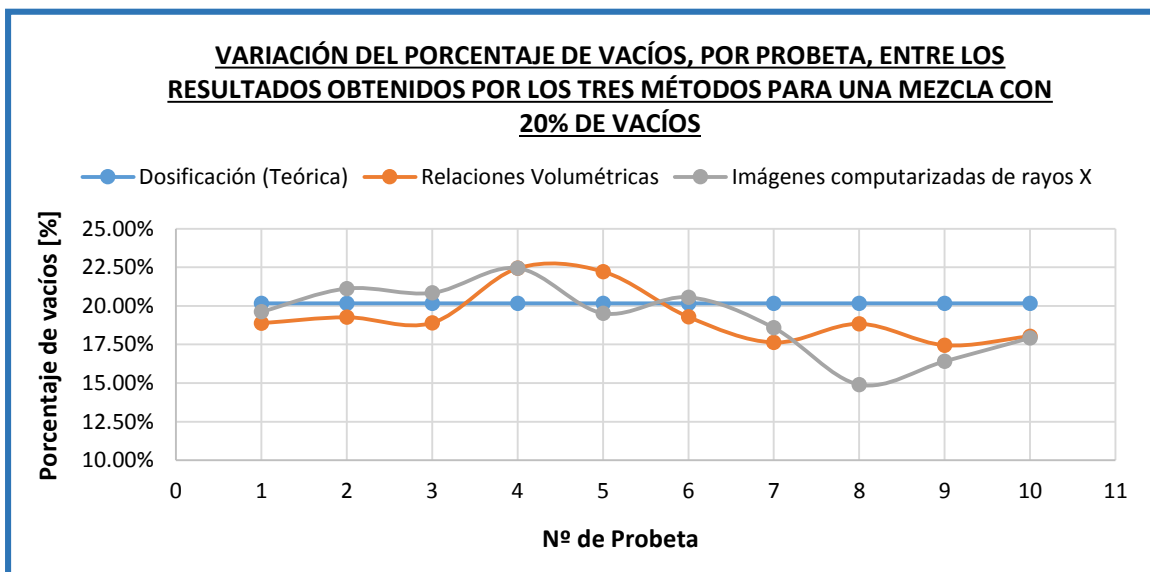


**Cuadro N° 40 Cuadro comparativo del porcentaje de vacíos por probeta obtenido para la mezcla 2 mediante las tres metodologías**

N° de Probeta	Para un porcentaje de vacíos base de 20%		
	VALORES		
	Dosificación (teórica)	Relaciones Volumétricas	Imágenes Computarizadas
P1	20.17%	18.88%	19.62%
P2	20.17%	19.26%	21.13%
P3	20.17%	18.90%	20.84%
P4	20.17%	22.44%	22.45%
P5	20.17%	22.22%	19.52%
P6	20.17%	19.29%	20.56%
P7	20.17%	17.63%	18.58%
P8	20.17%	18.84%	14.90%
P9	20.17%	17.45%	16.41%
P10	20.17%	18.03%	17.92%
<b>PROMEDIO</b>	20.17%	19.30%	19.19%

*fuelle: Elaboración propia*

**Figura 3. 22 Variación de porcentajes de vacíos para mezcla 2**

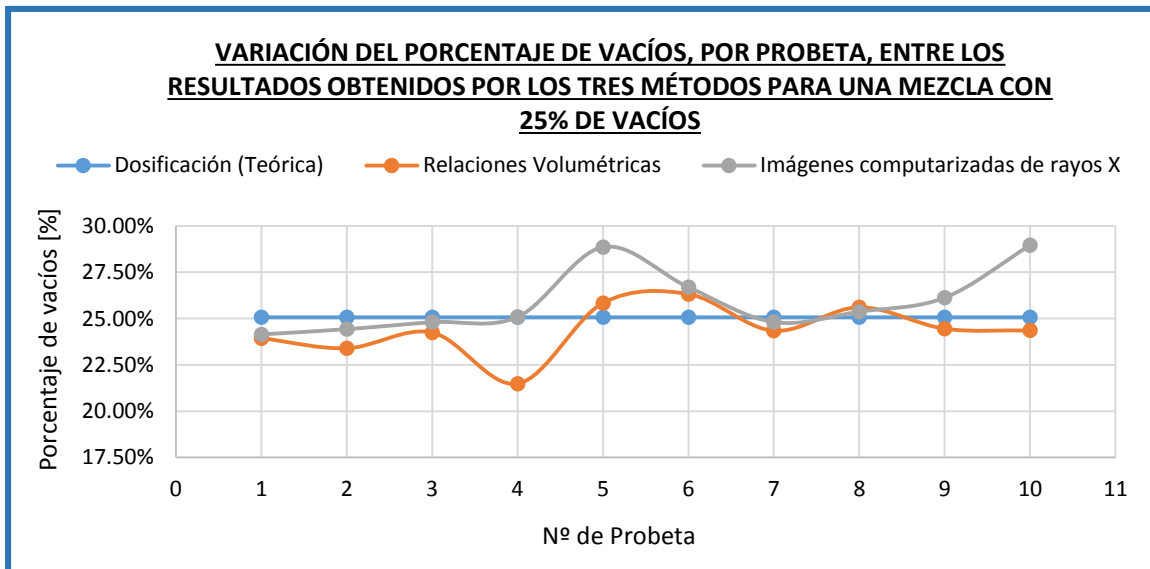


**Cuadro N° 41 Cuadro comparativo del porcentaje de vacíos por probeta obtenido para la mezcla 3 mediante las tres metodologías**

N° de Probeta	Para un porcentaje de vacíos base de 25%		
	VALORES		
	Dosificación (teórica)	Relaciones Volumétricas	Imágenes Computarizadas
P1	25.07%	23.94%	24.14%
P2	25.07%	23.40%	24.43%
P3	25.07%	24.25%	24.80%
P4	25.07%	21.48%	25.09%
P5	25.07%	25.84%	28.86%
P6	25.07%	26.32%	26.69%
P7	25.07%	24.34%	24.80%
P8	25.07%	25.61%	25.37%
P9	25.07%	24.45%	26.12%
P10	25.07%	24.36%	28.95%
<b>PROMEDIO</b>	25.07%	24.40%	25.93%

fuelle: Elaboración propia

**Figura 3. 23 Variación de porcentajes de vacíos para mezcla 3**



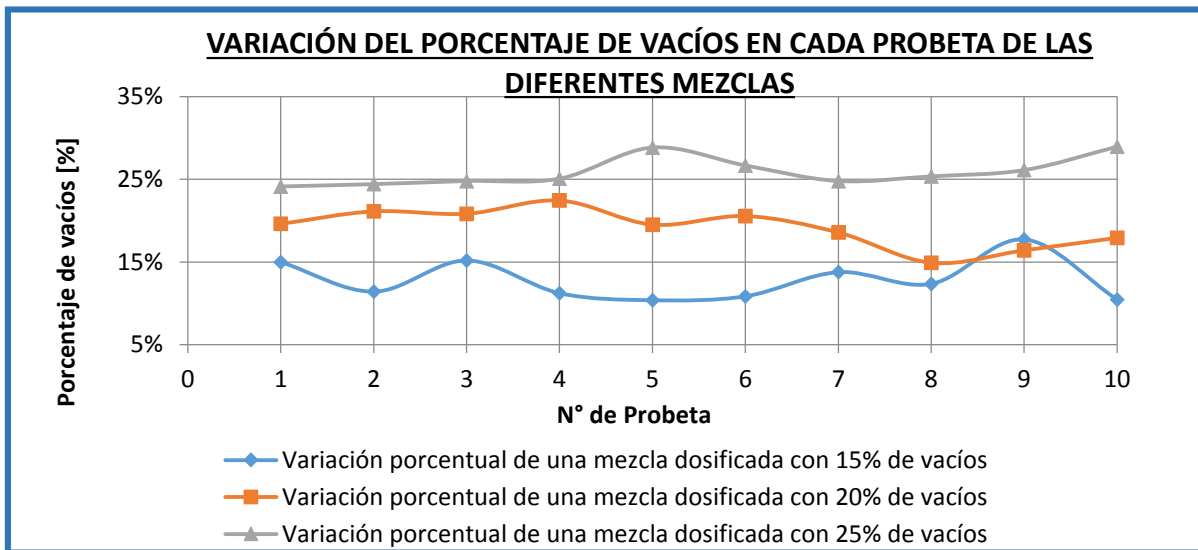
En las tres gráficas la línea azul representa el valor teórico resultante de la dosificación, que en todos los casos es completamente horizontal debido a que teóricamente todas las probetas

elaboradas deberían tener el mismo porcentaje de vacíos. En el primer caso, todos los valores obtenidos de la gravimetría están por debajo del teórico, mientras que para las cuantías sobre las imágenes computarizadas sólo el penúltimo espécimen contiene un porcentaje de vacíos mayor al de la dosificación, el resto también por debajo de este último. Para el segundo y tercer caso los valores experimentales circundan con valores tanto mayores como menores, al resultado teórico.

Como la investigación se basa en la determinación del porcentaje de vacíos en hormigón poroso de pavimento mediante la aplicación de rayos X, se mostrará un recuadro con los datos obtenidos solamente mediante este método, donde se pueda observar la variación que existe en cada una de las probetas que se fabricaron para las tres diferentes mezclas y sus promedios como resultado final de las cuantificación por medio de este método.

PROBETAS CON 15% DE VACÍOS		PROBETAS CON 20% DE VACÍOS		PROBETAS CON 25% DE VACÍOS	
Nº de Probeta	% de vacíos Promedio	Nº de Probeta	% de vacíos Promedio	Nº de Probeta	% de vacíos Promedio
1	15.00%	1	19.62%	1	24.14%
2	11.41%	2	21.13%	2	24.43%
3	15.18%	3	20.84%	3	24.80%
4	11.22%	4	22.45%	4	25.09%
5	10.37%	5	19.52%	5	28.86%
6	10.85%	6	20.56%	6	26.69%
7	13.77%	7	18.58%	7	24.80%
8	12.36%	8	14.90%	8	25.37%
9	17.73%	9	16.41%	9	26.12%
10	10.47%	10	17.92%	10	28.95%
Media					
$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$					
12.84%		19.19%		25.93%	

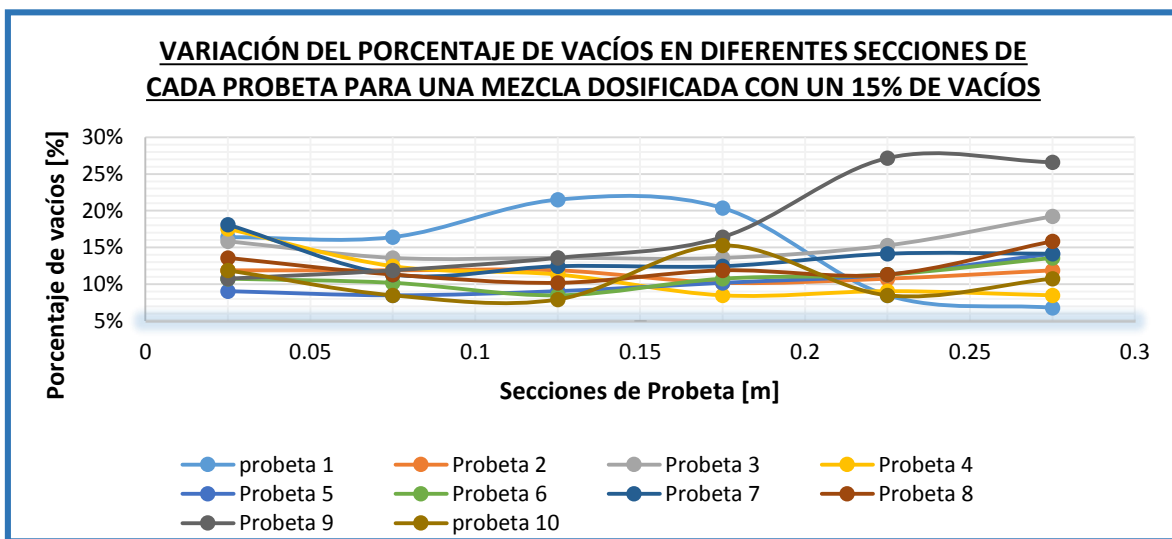
*Figura 3. 24 Variación de porcentajes de vacíos*

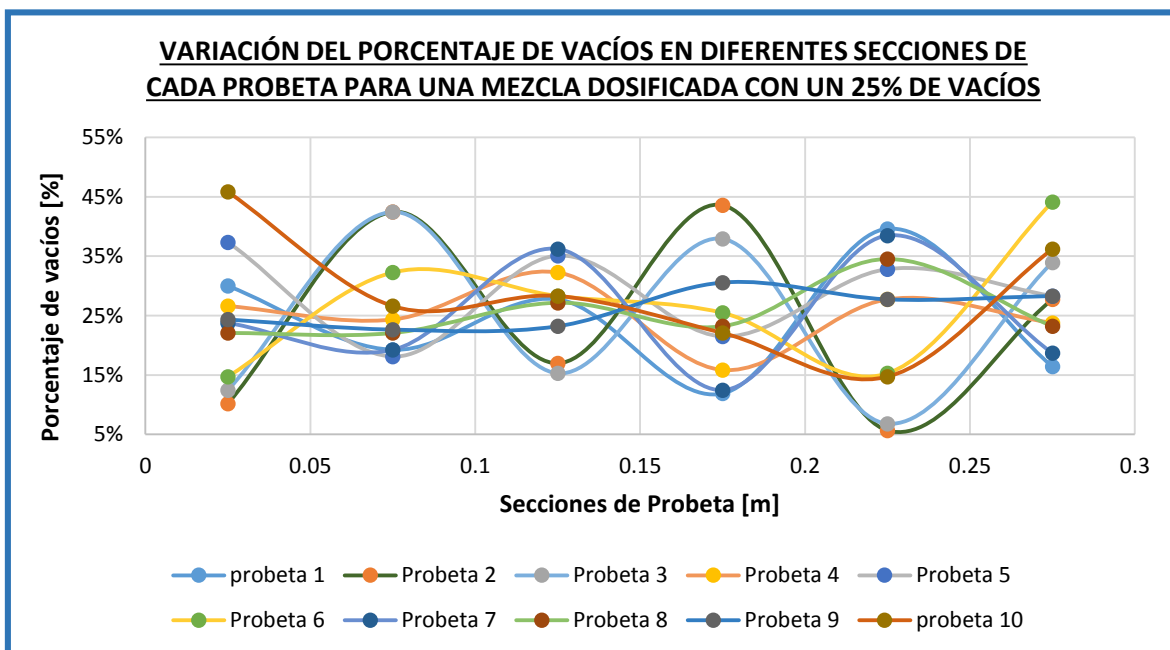
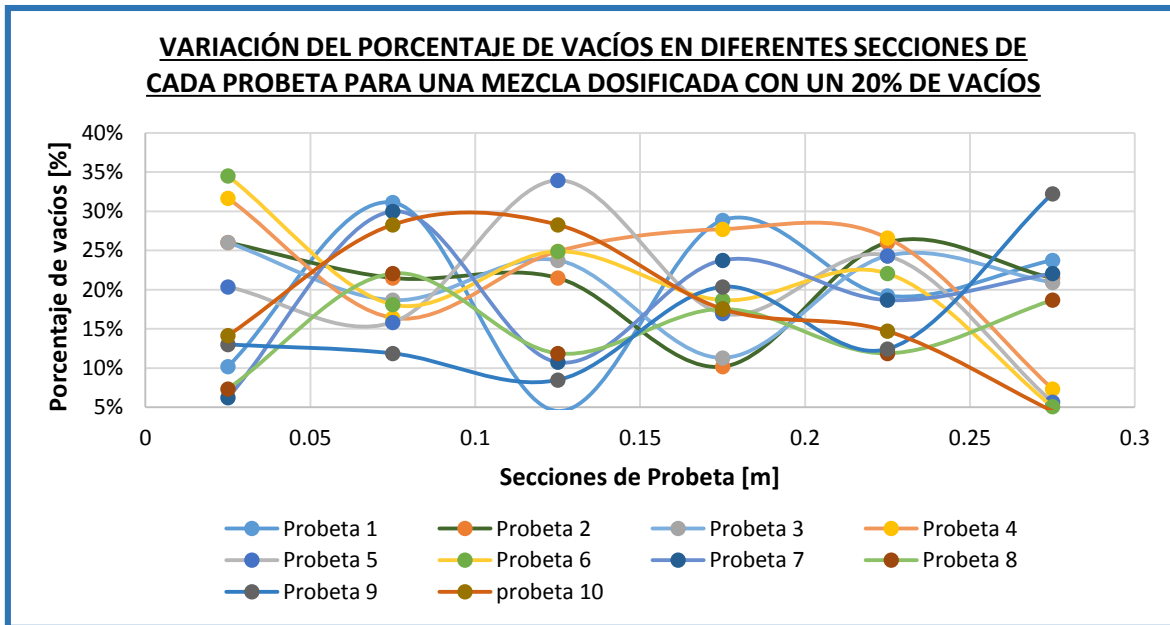


La figura muestra el valor del porcentaje de vacíos en cada probeta como resultado de promediar los valores cuantificados en las seis imágenes de cada probeta en diferentes secciones. Los valores a los que nos referimos se pueden graficar, de manera que se pueda observar la variación existente del porcentaje de vacíos en diferentes secciones de cada probeta para las diferentes mezclas.

De esta manera se presentarán las gráficas para las mezclas dosificadas con 15%, 20% y 25% de vacíos.

*Figura 3. 25 Variación del porcentaje de vacíos en diferentes secciones de cada probeta de las tres mezclas*





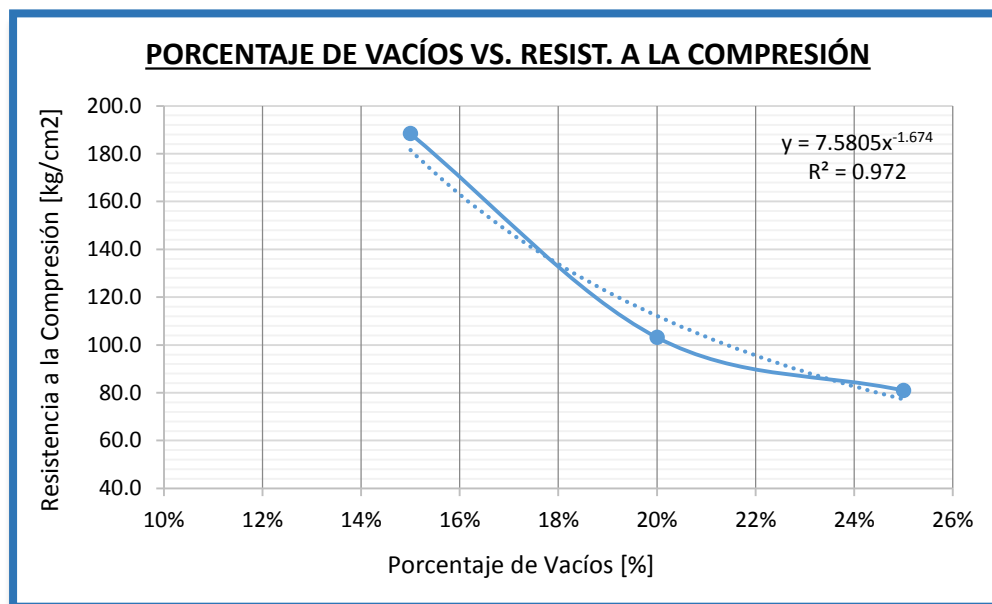
Si observamos podremos notar como en las tres gráficas las líneas se aglomeran a la altura del porcentaje de vacíos con el que fue dosificado, teniendo una mayor dispersión de valores en la mezcla 2, dosificada con 20% de vacíos.

La cantidad de contactos que existe en cada espécimen evaluado es totalmente al azar, no hay ninguna parte en el diseño donde sea determinada la cantidad de contactos entre agregados.

Lo que la tomografía nos permite es demostrar la heterogeneidad en cuanto a la forma en que se acomodan las partículas de agregado dentro de una mezcla de hormigón poroso de pavimento y la cantidad y calidad de contacto que existen entre si.

Las resistencias resultantes de los tres tipos de mezcla son inversamente proporcional al porcentaje de vacíos presentes en la estructura porosa de cada una las mezclas, así lo demuestra la siguiente gráfica.

**Figura 3. 26 Relación resistencia en función del porcentaje de vacíos**

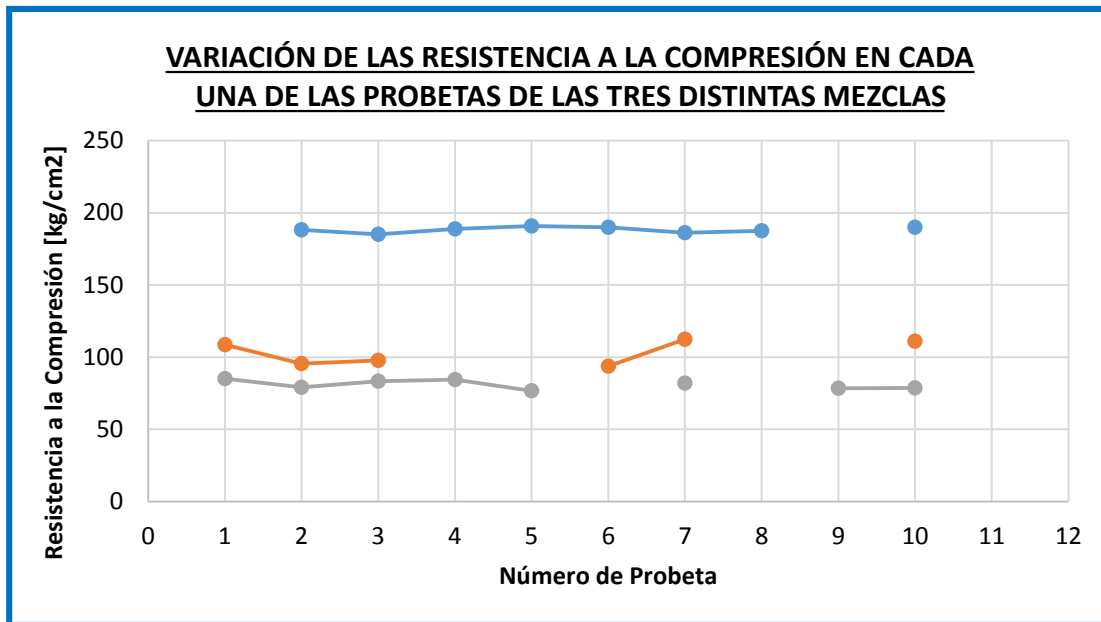


En la gráfica se puede observar y corroborar lo descrito en la fundamentación teórica, que indica que la resistencia va disminuyendo a medida que la porosidad del hormigón aumenta, obteniendo una correlación con un porcentaje de confiabilidad de 97.2% donde la resistencia máxima promediada de 188.37 kg/cm<sup>2</sup> es para la mezcla que contiene 12.63% de vacíos y la mínima promediada de 80.94 kg/cm<sup>2</sup> corresponde a la mezcla con un 25.97% de vacíos. Esto indica que el procedimiento de dosificación y elaboración de los especímenes nos brinda resultados seguros y coherentes con la teoría.

Cada una de las tres mezclas, de 12.63%, 19.52% y 25.97%, en forma individual, tomando como muestra las diez probetas que se corresponden, no muestran mucha variabilidad en su

resistencia a la compresión comparadas entre sí, de esta manera lo demuestra el siguiente gráfico.

**Figura 3. 27 Resultados de resistencia a la compresión por probeta para las 3 mezclas**



La línea de color azul indica la variabilidad de las resistencias a la compresión que se obtuvo para las diez probetas con un contenido de vacíos igual al 12.84% como promedio, la línea de color naranja corresponde a los resultados de resistencia a la compresión para las probetas elaboradas con la mezcla que contiene un promedio de 19.19% de vacíos en su interior y por último la línea de color gris pertenece a los resultados obtenidos sobre las probetas de 25.93% de vacíos de promedio.

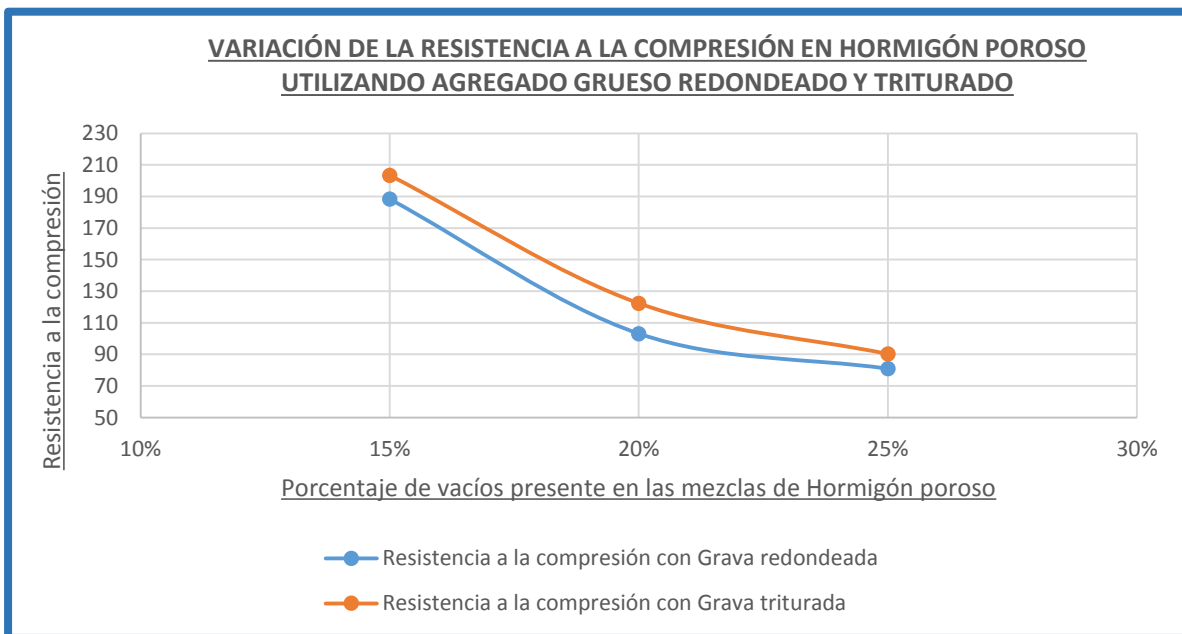
La discontinuidad de las líneas se debe a que los datos de resistencia a la compresión en ese número específico de probeta fueron depurados debido a que la diferencia, en comparación con la mayoría de los resultados, es de consideración.

Se puede observar una notoria diferencia entre las resistencias a la compresión que obtiene una mezcla con 12.63% de vacíos y una de 25.97%, donde el promedio de la primera llega a ser más del doble de esta última, 188.37kg/cm<sup>2</sup> y 80.94 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente, habiendo tan solo una diferencia de 13.34% de vacíos entre ellas, mientras que la mezcla con 19.52%

de vacíos obtiene resistencias que están en medio de las dos anteriores pero que muestra una mayor similitud con la tercera mezcla, llegando a tener una resistencia promedio de 103.16 kg/cm<sup>2</sup>, 22.22 kg/cm<sup>2</sup> más que la última mezcla y 85.21 kg/cm<sup>2</sup> menos que la primera.

La resistencia a la compresión que pueden adquirir las mezclas de hormigón poroso, puede variar con la utilización de agregado grueso redondeado o triturado, con la utilización de este último incrementa la resistencia a la compresión en un valor próximo al 10% más, con respecto al obtenido cuando se emplea grava de tipo canto rodado, así se puede observar en la gráfica:

**Figura 3. 28 Variación de la resistencia a la compresión de mezclas porosas con diferente tipo de agregado grueso (redondeado y triturado)**

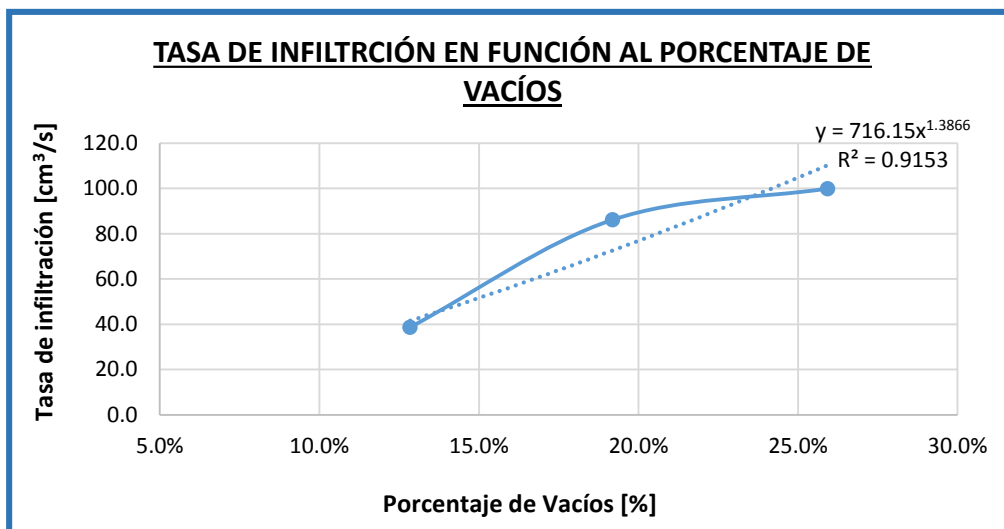


En cuanto a la aplicación que puede tener el hormigón poroso en el marco de la construcción de pavimentos presenta algunas restricciones que derivan directamente de su baja resistencia, lo cual le impide ser empleado en todos los tipos de pavimento, referidos a su capacidad de servicio y solicitaciones elevadas, sin embargo puede ser utilizado tanto para tráfico vehicular liviano como peatonal. La disminución de la parte fina de los agregados en los hormigones porosos consecuentemente ocasiona que su resistencia a la compresión sea menor de la que normalmente se esperaría en un concreto convencional para pavimento, esta resistencia del hormigón poroso de pavimento adecuadamente colocado puede estar en el rango de 3.5 a 28

Mpa, sin embargo la investigación muestra resultados que varían de 7.9 a 18.5 Mpa. para porcentajes de vacíos iguales a 25.93% y 12.84% respectivamente, lo cual es adecuado para la mayoría de las aplicaciones de pavimentos de bajo volumen, incluyendo las cargas de eje largo como los camiones de basura y los vehículos de emergencia tales como los camiones de bomberos. NRMCA recomienda una resistencia a la compresión mínima de 17 Mpa. para este tipo de tráfico. En cuanto a la construcción de superficies permeables para tráfico peatonal hechas de hormigón, los resultados obtenidos de resistencia a la compresión no muestran ninguna restricción para su aplicación debido a que el requerimiento de esta propiedad es bajo para este tipo de solicitaciones.

En el ensayo donde se determinó la tasa de infiltración se pudo registrar datos que nos muestran el comportamiento de la propiedad más importante que tiene un hormigón poroso de pavimento en función al porcentaje de vacíos.

**Figura 3. 29 Relación de la tasa de infiltración en relación al porcentaje de vacíos**

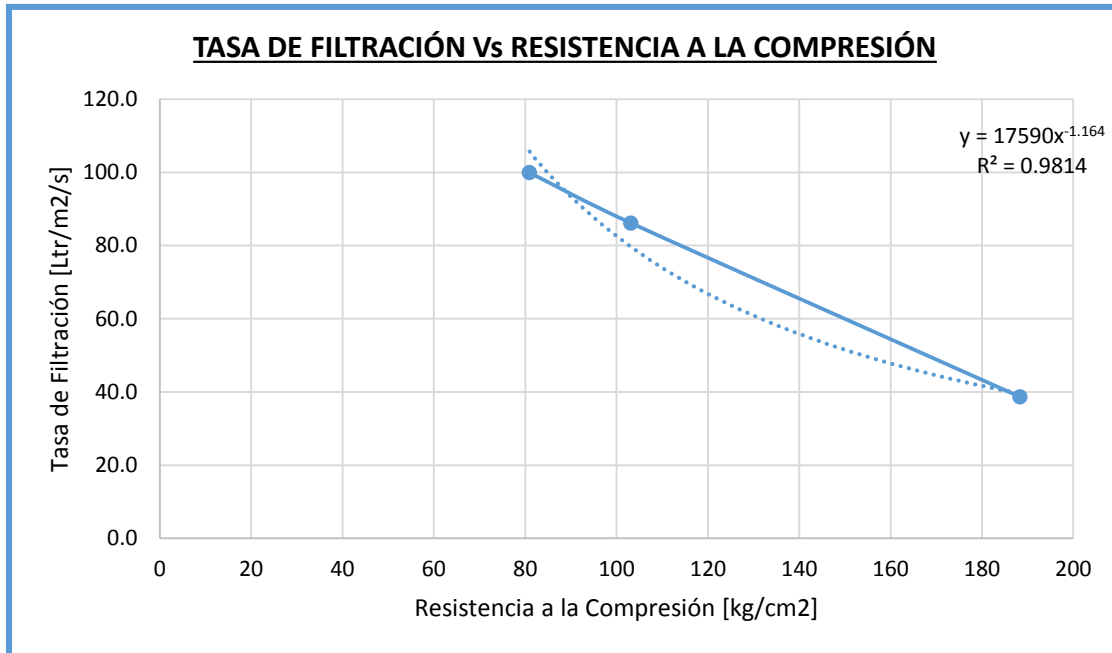


Los resultados de la determinación de la tasa de infiltración arrojaron como valores límites, 38.65 cm<sup>3</sup>/seg. y 99.94 cm<sup>3</sup>/seg para las mezclas con porcentajes de vacíos iguales a 12.63% y 25.97% respectivamente, quedando demostrado que la capacidad que tiene un hormigón poroso de pavimento para drenar es proporcional a su contenido de vacíos.

La capacidad de filtración también puede ser comparada con la resistencia a la compresión, lo cual nos mostrará parámetros que indican la disminución de la tasa de filtración con el

debido incremento de la resistencia, lo que concuerda con los resultados de resistencia a la compresión versus porcentaje de vacíos y tasa de filtración versus porcentaje de vacíos.

**Figura 3. 30 Relación de la tasa de infiltración en función de la resistencia a la compresión**



## CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- Las imágenes computarizadas obtenidas con el tomógrafo de rayos X brinda información de alta confiabilidad sobre la estructura interna de la mezcla, la distribución de sus elementos y sobre todo del contenido de vacíos para la evaluación del hormigón poroso de pavimento.
- El procedimiento de dosificación establecido por el comité 211 del ACI para la determinación de las proporciones de materiales empleados en la fabricación de mezclas porosas resultó favorable obteniendo resultados de 12.84% de contenido de vacíos para la primera mezcla, 19.19% para la segunda y 25.93% para la tercera, teniendo como parámetros base 15%, 20% y 25% respectivamente.
- La aplicación de los rayos X para evaluar los hormigones porosos de pavimento permitió la determinación de su porcentaje de vacíos, ofreciendo la posibilidad de realizar un análisis no destructivo de las piezas en todo su volumen, además de proporcionar un mapa de porosidad de toda la pieza analizada pudiendo observarse su distribución espacial dentro de la pieza y la medida del tamaño de los diferentes poros de cada mezcla.
- Los resultados que derivan de la evaluación de los vacíos en las mezclas de hormigón poroso de pavimento mediante la aplicación de rayos X son validados por los que fueron obtenidos por otro método experimental, en este caso por gravimetría, que a su vez al ser ambos comparados con los valores teóricos adquiridos del proceso de dosificación nos muestra resultados muy satisfactorios, obteniendo en la mezcla 1 una diferencia máxima de 2.92% entre el valor teórico y el resultante de las relaciones gravimétricas, para la mezcla 2, los resultados que más difieren son el teórico y el obtenido por imágenes en un 0.98%, y en la mezcla 3 la diferencia más grande la marca el valor obtenido por las imágenes, estando un 0.86% por encima del resultante

de las relaciones gravimétricas, así lo muestra la figura 3.19 *Resultados de porcentaje de vacíos determinado por los tres métodos*.

- La relación que guarda el porcentaje de vacíos en cada una de las mezclas con su resistencia a la compresión es inversamente proporcional, es decir, la mezcla de hormigón poroso de pavimento con más contenido de vacíos ofrece una menor resistencia a la compresión, quedando demostrado por los resultados de los ensayos realizados a los diez especímenes de las tres mezclas en la figura 3.26 *relación resistencia en función del porcentaje de vacíos*.
- La dispersión de los valores de resistencia a la compresión obtenidos de cada espécimen ensayado no muestran grandes desfases entre ellos, los valores que tuvieron una lejanía mayor a su promedio, +/- su desviación estándar, fueron depurados considerando que el área de contacto con la prensa no fue la ideal para un buen ensayo, obteniendo como valor más bajo, un resultado promedio de  $80.94 \text{ kg/cm}^2$  para la mezcla con mayor cantidad de vacíos y alcanzando una resistencia máxima promedio de  $188.37 \text{ kg/cm}^2$  para la mezcla 1 con 12.84% de oquedades, esto se puede observar con mayor claridad en la figura 3.27 *Resultados de resistencia a la compresión por probeta para las tres mezclas*.
- Se ha comprobado que las mezclas de hormigón poroso empleadas en superficies que son elaboradas utilizando agregado grueso triturado tienen una resistencia a la compresión de alrededor de un 10% mayor que las fabricadas con grava redondeada, lo cual es consecuencia de la trabazón mecánica ocasionada por un área mayor de contacto entre pasta y agregado.
- El hormigón poroso puede ser utilizado para la construcción de veredas, estacionamientos, ciclo vías y pavimentos de tráfico liviano ya que el hormigón poroso ofrece resistencias a la compresión para estas solicitaciones conservando una alta tasa de infiltración.
- La tomografía computarizada de rayos X es una técnica disponible con un grado de desarrollo muy importante que permite su aplicación en el campo de los materiales y el estudio del estado estructural de las piezas hormigón ya

elaboradas, no solo para la evaluación de hormigones porosos como en la investigación, sino que también para cualquier tipo de hormigones

- La metodología del diseño de mezcla para la investigación se basó en la guía para la selección de proporciones de concreto sin revenimiento proporcionada por el Comité 211 del ACI, de donde se obtuvo las siguientes cantidades para la producción de  $1\text{m}^3$  de cada mezcla.

<b>CANTIDADES PARA UNA MEZCLA CON 15.27% DE VACÍOS</b>			<b>CANTIDADES PARA UNA MEZCLA CON 20.17% DE VACÍOS</b>		
Cemento ( $c$ ) =	436.5	$\text{kg}/\text{m}^3$	Cemento ( $c$ ) =	368.3	$\text{kg}/\text{m}^3$
Agua ( $w$ ) =	174.6	$\text{kg}/\text{m}^3$	Agua ( $w$ ) =	147.3	$\text{kg}/\text{m}^3$
Agregado grueso =	1110.1	$\text{kg}/\text{m}^3$	Agregado grueso =	1110.1	$\text{kg}/\text{m}^3$
Agregado fino =	277.5	$\text{kg}/\text{m}^3$	Agregado fino =	277.5	$\text{kg}/\text{m}^3$
Masa Total =	1998.8	$\text{kg}/\text{m}^3$	Masa Total =	1903.3	$\text{kg}/\text{m}^3$

<b>CANTIDADES PARA UNA MEZCLA CON 25.07% DE VACÍOS</b>		
Cemento ( $c$ ) =	300.1	$\text{kg}/\text{m}^3$
Agua ( $w$ ) =	120.0	$\text{kg}/\text{m}^3$
Agregado grueso =	1110.1	$\text{kg}/\text{m}^3$
Agregado fino =	277.5	$\text{kg}/\text{m}^3$
Masa Total =	1807.8	$\text{kg}/\text{m}^3$

- La consistencia seca del hormigón poroso proviene de los niveles bajos de la relación agua cemento, usando en la investigación un 0.4 para los tres tipos de mezclas, que aparte de provocar que este tipo de mezcla no tenga asentamiento, ocasiona que sea mucho más rígida por lo que su tiempo de trabajabilidad es reducido y más costosa en el momento de la puesta en obra.
- La aplicación más importante que tienen los hormigones porosos de pavimento es la capacidad de permitir el paso del agua a través de su estructura interna, con este propósito se determinó la tasa de infiltración que escurre en las mezclas con diferentes porcentajes de vacíos. La tercera mezcla presentó la mejor tasa para un porcentaje de vacíos igual a 25.97%, calculado mediante las imágenes de rayos X, alcanzando un promedio de 99.937 centímetros cúbicos por segundo y la más baja fue de 38.65 cm<sup>3</sup>/seg. correspondiente a la mezcla 1, estos resultados se encuentran reflejados en la figura 3.29 *Relación de la tasa de infiltración en relación al porcentaje de vacíos.*
- La mayor tasa de infiltración corresponde a la mezcla que contenga el porcentaje de vacíos más elevado en cada una de las mezclas de hormigón poroso de pavimento y la resistencia a la compresión mayor corresponde a la mezcla con menor contenido de vacíos, lo que concluye en que una baja tasa de infiltración concierne a una elevada resistencia a la compresión. En la investigación se obtuvo una tasa de 38.65 cm<sup>3</sup>/seg. para una resistencia a la compresión de 188.37 kg/cm<sup>2</sup> correspondientes a la primera mezcla, para la segunda se obtuvo 86.15 cm<sup>3</sup>/seg. para 103.16 kg/cm<sup>2</sup> y para la tercera 99.94 cm<sup>3</sup>/seg. para 80.94 kg/cm<sup>2</sup> de resistencia a la compresión, así lo demuestra la figura 3.30 *Relación de la tasa de infiltración en función de la resistencia a la compresión.*

## 4.2 Recomendaciones

- En cuanto al método de evaluación se recomienda utilizar equipos fabricados específicamente para ser empleados sobre materiales de construcción, y no con fines

medicinales, que sean capaces de emanar radiación gamma en vez de rayos X, ya que la radiación gamma es ventajosa para el trabajo en hormigón porque es más penetrante y el hormigón es unas 2.5 veces más denso que el cuerpo humano, además que mediante un software sea capaz de realizar una reconstrucción en 3D, como el “SISTEMA FUENTE”, que contiene sustancia radioactiva, un contenedor con blindaje, un tele comando, un colimador y un equipo de análisis de imágenes planares para caracterizar el volumen y generar imágenes tridimensionales.

- En el procedimiento de dosificación y determinación de las cantidades de producción para un hormigón poroso de pavimento se recomienda utilizar los valores más altos de relación agua-cemento (w/c) que estén dentro de los límites establecidos por el reporte de del ACI cuando se utilice un nivel de compactación ligero.
- Un parámetro muy importante y que tiene de ser definido en la elaboración hormigones porosos de pavimento es la aplicación de la energía de compactación puesto que tiene mucha influencia en el producto final alcanzado y está directamente relacionada con sus propiedades; asimismo, ayuda a lograr un equilibrio entre resistencia y permeabilidad requerida, por lo que se recomienda seguir a cabalidad el procedimiento establecido para el varillado en la elaboración de los especímenes.
- Se recomienda que para tener una evaluación con rayos X con un alto grado de precisión, se debe obtener la mayor cantidad de cortes transversales con el tomógrafo de rayos X, abarcando el mayor espacio posible para la determinación del porcentaje de vacíos.
- Se recomienda utilizar la menor cantidad de agregado fino posible, preferiblemente entre 0% y 10%, ya que en mayores cantidades tiende a secar demasiado la mezcla, ocasionando grumos de pasta en las mezclas de menor porcentaje de vacíos y mala adherencia entre pasta y agregado grueso.
- Cuando los especímenes sean sometidos a pruebas de radiación, deberán estar totalmente secos, puesto que los equipos de tomografía son capaces de reconocer la densidad del agua y podría no ser cuantificada como vacíos presentes en el interior de la mezcla porosa, por lo que se recomienda dejarlos secar a temperatura ambiente

por lo menos durante un periodo de 24 horas, tiempo suficiente para que el agua escurra y se desaloje del interior de las probetas.

- Se recomienda realizar la elaboración de un hormigón convencional para pavimento mediante el mismo método de dosificación para poder tener un parámetro de la verdadera existencia de vacíos y para contrastar los resultados obtenidos mediante las imágenes computarizadas de manera experimental por el método gravimétrico.
- Debido a las restricciones de aplicación que tiene un hormigón poroso de pavimento ocasionado por su baja resistencia, se recomienda encontrar un equilibrio entre resistencia y porcentaje de vacíos, que en conjunto ofrezcan la mejor alternativa acorde a las solicitaciones a las que sirva.