



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LOS CONTENIDOS DE PASTA Y DE  
VACÍOS DE MEZCLAS DE HORMIGÓN PERMEABLE EMPLEANDO  
GRADACIONES DE AGREGADOS QUE CUMPLAN LA ASTM C33**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniera e Ingeniero Civil

AUTORES: Michelle Estefanía Acosta Gómez

Andrés Eduardo Chávez Criollo

TUTOR: Francisco Roberto Ortiz Navas

Quito - Ecuador  
2023

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Michelle Estefanía Acosta Gómez con documento de identificación N° 1727366393 y Andrés Eduardo Chávez Criollo con documento de identificación N° 1805386263; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 30 de junio del 2023

Atentamente,



---

Michelle Estefanía Acosta Gómez  
1727366393



---

Andrés Eduardo Chávez Criollo  
1805386263

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Michelle Estefanía Acosta Gómez con documento de identificación N° 1727366393 y Andrés Eduardo Chávez Criollo con documento de identificación N°1805386263; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “ Evaluación de la Relación entre los Contenidos de Pasta y de Vacíos de Mezclas de Hormigón Permeable Empleando Gradaciones de Agregados que Cumplan la ASTM C33”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad PolitécnicaSalesiana.

Quito, 30 de junio del 2023

Atentamente,

---

Michelle Estefanía Acosta Gómez  
1727366393

---

Andrés Eduardo Chávez Criollo  
1805386263

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Francisco Roberto Ortiz Navas con documento de identificación N°1717631244, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LOS CONTENIDOS DE PASTA Y DE VACÍOS DE MEZCLAS DE HORMIGÓN PERMEABLE EMPLEANDO GRADACIONES DE AGREGADOS QUE CUMPLAN LA ASTM C33, realizado por Michelle Estefanía Acosta Gómez con documento de identificación N° 1727366393 y por Andrés Eduardo Chávez Criollo con documento de identificación N°1805386263, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 30 de junio del 2023

Atentamente,



---

Ing. Francisco Roberto Ortiz Navas, PhD.

1717631244

# EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LOS CONTENIDOS DE PASTA Y DE VACÍOS DE MEZCLAS DE HORMIGÓN PERMEABLE EMPLEANDO GRADACIONES DE AGREGADOS QUE CUMPLAN LA ASTM C33

## EVALUATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE PASTE AND VOIDS CONTENTS OF PERMEABLE CONCRETE MIXTURES USING GRADATIONS OF AGGREGATES COMPLYING WITH ASTM C33

Michelle Acosta-Gómez<sup>1</sup>, Andrés Chávez-Criollo<sup>2</sup>, Francisco Ortiz-Navas<sup>3</sup>

### Resumen

El hormigón permeable posee un alto contenido de vacíos a diferencia de un hormigón convencional. Permite drenar el agua por medio de sus poros interconectados, hacia el suelo de manera natural, reduciendo la acumulación de agua en la superficie. El presente proyecto se basará en la normativa ACI 522R-11, capítulo 6, diseño de hormigón permeable. Esta norma está destinada para el tamaño N°8 de los agregados gruesos y consta de una gráfica de: Contenido de Vacíos, % de Volumen vs Contenido de Pasta y % de Volumen (valores teóricos). El objetivo será obtener la relación existente entre el % de vacíos y % de pasta reales de las siguientes gradaciones N°7, N°6, N°57 y N°56, en el cual, el contenido de vacíos y pasta tendrán variabilidad. A fin de obtener datos reales por medio del uso de densidades óptimas y densidades reales. Las cuatro gradaciones fueron ensayadas a los 28 días a compresión, tracción indirecta, permeabilidad, los resultados fueron 6.35 MPa a compresión, tracción indirecta de 0.88 MPa y la permeabilidad de 19.86 mm/s. Se observó que la resistencia aumenta y disminuye dependiendo del tamaño del agregado, cumpliendo la ASTM C33.

**Palabras Clave:** Contenido de Pasta, Contenido de Vacíos, ASTM C33, ACI 522R-11, densidad óptima.

### Abstract

Permeable concrete has a high void content unlike conventional concrete. It allows to drain the water through its interconnected pores, to the soil in a natural way, reducing the accumulation of water on the surface. This project will be based on ACI 522R-11, chapter 6, permeable concrete design. This standard is intended for the size N°8 of thick aggregates and consists of a graph of: Empty Content, % Volume vs Paste Content and % Volume (theoretical values). The objective shall be to obtain the ratio between the % of real voids and the % of real pulp of the following gradations N°7, N°6, N°57 and N°56, in which the content of voids and pulp will have variability. In order to obtain real data by using optimal densities and real densities. The four gradations were tested at 28 days to compression, indirect traction, permeability, the results were 6.35 MPa to compression, indirect traction of 0.88 MPa and permeability of 19.86 mm/s. It was observed that resistance increases and decreases depending on aggregate size, complying with ASTM C33.

**Keywords:** Paste Content, Void Content, ASTM C33, ACI 522R-11, Optimum Density.

---

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

Autor para correspondencia: [macostag3@est.ups.edu.ec](mailto:macostag3@est.ups.edu.ec)

<sup>2</sup> Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

Autor para correspondencia: [achavezc1@est.ups.edu.ec](mailto:achavezc1@est.ups.edu.ec)

<sup>3</sup> Docente de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

Autor para correspondencia: [fortizn@ups.edu.ec](mailto:fortizn@ups.edu.ec)

## 1. Introducción

El hormigón permeable está compuesto de agregado grueso, cemento y agua; la mezcla de estos materiales crea una superficie porosa y resistente. En los últimos años ha sido un tema muy interesante en investigación.

Vallejo y Amaguaya [1] realizaron 3 distintas gradaciones de agregados 3/8", 3/4" y 1", empleando una relación de  $a/c=0.70$  y  $a/c=0.60$ , para cada una. Han observado que a medida que aumenta la relación  $a/c$ , la permeabilidad aumenta.

Por otra parte, León y Rosero [2] observaron que el contenido de vacíos de un hormigón permeable de distintas gradaciones, va a ser variable, en función del contenido de pasta que se tenga. Es decir, mientras más pasta tenga el hormigón permeable, el contenido de vacíos va a ser menor, pero su resistencia aumenta. El resultado obtenido en laboratorio para una resistencia a los 28 días fue de 24.59 MPa y la permeabilidad de 1.99 mm/s de la gradación N°4.

Kevern et al. [3] en 2008 realizó pruebas de hormigones en donde se obtuvo una resistencia de 55 MPa a los 28 días. Se elaboró con 5 diseños de mezclas y relación de contenido de vacíos por medio de pesos unitarios. Los resultados obtenidos dan como resultado una disminución en el peso unitario con la relación de vacíos y, a su vez, aumentando la permeabilidad.

De igual manera, Marlon Vigil [4] demostró que la relación de vacíos es un factor de gran importancia debido al tamaño del agregado. Dicha relación está sujeto al rendimiento de resistencia y permeabilidad. Se utilizó el método gravimétrico (densidades) con el que es posible conocer el tamaño de poros. El resultado fue, que a menor porcentaje de vacíos se tiene una permeabilidad de 15.92 mm/s, y su resistencia fue de 103.99 MPa.

En las investigaciones desarrolladas por Marlon Vigil [4], Cueva y David [5] para la obtención de contenido de pasta de cada gradación de hormigón permeable, dependerá de la adherencia entre pasta-agregado mediante el ensayo de pérdida de material. Por lo que, concluyen que se podrá obtener la cantidad de pasta por relaciones gravimétricas y volumétricas en estado fresco.

Daniel Pérez [6] estima los criterios de diseño de hormigones permeables, con procedimientos de proporción y dosificación. Los ensayos fueron realizados con valores teóricos de contenido de pasta y vacíos. Es decir, dando como resultado hormigones permeables de 0.413 cm/s y obteniendo una resistencia de 176 MPa, esto según la gráfica del ACI 522R-11 con 15% de vacíos.

En el trabajo elaborado por Francisco Núñez [7] ha evidenciado que, dependiendo de la granulometría de cada gradación, el contenido de vacíos será diferente; en consecuencia, afecta la permeabilidad. Por ello, recomienda una variación de entre 15% - 35% de contenido de vacíos.

El capítulo de la norma ACI 522R-11 recopila información sobre el hormigón permeable, en donde se dan pautas para la elaboración del diseño del mismo. Estas pautas únicamente emplean gradaciones para agregados N°8. Además, se muestra, la relación que existe entre el contenido de vacíos, el % de volumen vs contenido de pasta y el % de volumen.

Para complementar la información del ACI 522R-11 este trabajo extiende las recomendaciones empleando agregados de gradaciones N°7, N°6, N°57 y N°56. Éstas, serán evaluadas con distinto % de pasta y % de vacíos, con el objetivo de obtener la relación existente entre el % de vacíos y % de pasta. Para ello se realizaron una campaña experimental empleando los 4 tipos de agregados antes mencionados.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Materiales

#### 2.1.1 Agregados

Se utilizaron 4 tipos de gradaciones de la mina de Pintag, N°56, N°57, N°6 y N°7 (ver Figura 1), se elaboraron 4 mezclas para cada gradación con un porcentaje diferente de pasta y vacíos.

Una vez diseñadas y ejecutas cada una de las mezclas, se procedió a recalcular el porcentaje de pasta y vacíos reales por medio de mezclas óptimas [8].

El tipo de cemento colocado es MH, elaborado según la normativa NTE INEN 2380 [9] (ASTM C1157 [10]), mismo que tiene una densidad de  $2920 \text{ kg/cm}^3$  [2].

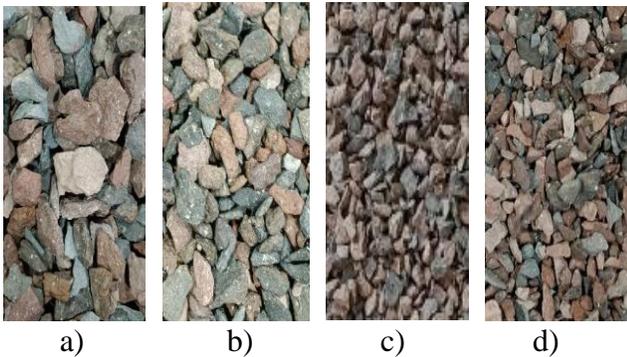


Figura 1. Fotografías de los Agregados gruesos: N°56 (a), N°57 (b), N°6 (c), N°7 (d)

Los agregados gruesos se califican a través de pruebas de calidad, que se realizarán en los 4 tipos de gradaciones [11].

Las propiedades necesarias para el diseño del hormigón permeable son: la abrasión, según la normativa NTE INEN 860 [12]; Pesos específicos del agregado grueso y capacidad de absorción, según la normativa NTE INEN 857 [13]; Masas unitarias, condición suelta y compactada, según la normativa NTE INEN 858 [14]; Humedades, según la normativa NTE INEN 862 [15].

Con el objetivo de cumplir los límites de las distintas curvas tamizan cada uno de los materiales de diferente tamaño [16].

Con el objetivo de cumplir los límites de las distintas curvas se tamizan cada uno de los materiales de diferente tamaño, para construir las curvas granulométricas, cumpliendo la normativa ASTM C33 [16]. De esta manera se completa la distribución granulométrica con porcentajes de agregados, cumpliendo así con el límite superior e inferior. Esto permitirá una óptima adherencia de los agregados [17].

Las curvas granulométricas de los 4 tipos de gradaciones se observan en la Figura 2.

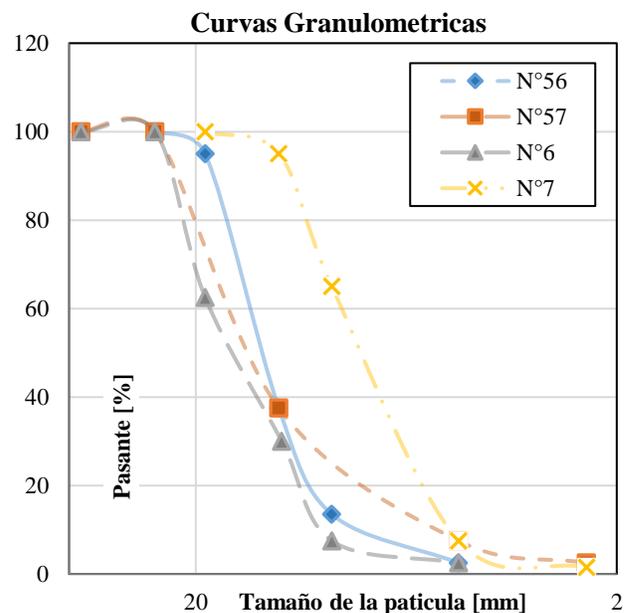


Figura 2. Elaboración de curvas Granulométricas según la normativa ASTM C33, N°56, N°57, N°6 y N°7.

A continuación, en la Tabla 1 se muestran los resultados de los ensayos realizados de las distintas gradaciones.

Tabla 1. Resultados de laboratorio del agregado grueso (mina de Pintag)

Material	Número de Tamaño			
	N°56	N°57	N°6	N°7
Desgaste a la Abrasión [%]	21.67	27.22	26.80	28.68
Humedad Natural [%]	0.40	0.29	0.30	0.40
Peso Específico [ $gr/cm^3$ ]	2.44	2.46	2.39	2.47
Peso Unitario Suelto [ $gr/cm^3$ ]	1.19	1.21	1.16	1.14
Peso Unitario Varillado [ $gr/cm^3$ ]	1.29	1.29	1.25	1.25
Absorción [%]	2.23	2.45	3.18	3.15
Tamaño Máximo Nominal [mm]	25.40	19.05	12.70	9.52

Los diseños de mezclas se elaboraron mediante el uso de la normativa ACI 522R-11, valores teóricos recomendados de contenido de vacíos (15% - 35%). Utilizando la gráfica de contenido de vacíos, % de volumen vs contenido de pasta y % de volumen; se obtendrá el contenido de pasta teórico para luego recalcularlo con valores reales.

Se utilizó la relación de agua/cemento de 0.35, como valor recomendable según el ACI 522R-11 de (0.26 - 0.45).

Los valores obtenidos del peso del agregado grueso en función de la gravedad específica de cada material, teniendo en cuenta el valor de  $b/b_o = 0.99$  como valor extraído de la normativa ACI 522R-11 que indica que no tiene material fino [18].

$$W_{a_{seco}} = P.U.C_{grava} * \frac{b}{b_o} * V_{total} \quad \text{Eq (1)}$$

Una vez calculado el peso del agregado con la Eq (1), se hace un ajuste del peso del agregado con la Eq (2), teniendo en cuenta la absorción corregida que se calcula con las propiedades de los agregados (corrección por humedad) [18].

$$W_{a_{húmedo}} = W_{a_{seco}} * \%Abs \quad \text{Eq (2)}$$

Seguidamente se utiliza la gráfica de contenido de vacíos, % de volumen vs contenido de pasta y % por volumen, se tomarán valores teóricos de porcentaje de vacíos y porcentaje de pasta. Para realizar el diseño el cual estará basado en la ACI 522R-11 que serán implementados para cada uno de los diferentes tamaños de los agregados, se utilizará la Eq (3) para calcular el volumen de pasta [18].

$$V_{pasta} = \%pasta * V_{total} \quad \text{Eq (3)}$$

A continuación, se procede a determinar el contenido de cemento con la Eq (4), teniendo en cuenta que para el diseño se va a utilizar cemento Chimborazo con densidad de  $2.920 \text{ g/cm}^3$  [2].

$$W_{cem} = \frac{V_{pasta}}{\frac{1}{\gamma_{cem}} + \frac{a}{\gamma_{agua}}} \quad \text{Eq (4)}$$

Una vez realizado lo anterior, se hace uso de la Eq (5), que hace referencia al contenido de agua. Esto será de ayuda para conocer la cantidad de agua que será utilizada en los cilindros de 10 x 20 cm para cada mezcla y tamaño de los agregados [18].

$$W_{agua} = \frac{a}{c} (W_{cem}) \quad \text{Eq (5)}$$

Finalmente, es necesario saber que la mezcla de hormigón permeable no contiene materiales finos, por lo cual el contenido de arena será de 0. Para el contenido de grava de cada tamaño nominal se utilizará la Eq (6) [18].

$$W_{grava} = W_{a_{húmedo}} * (100\% - \%arena) \quad \text{Eq (6)}$$

Para conocer los valores reales de contenido de vacíos y pasta de cada gradación, se deberán utilizar densidades reales y óptimas; mismas que serán calculadas con la ecuación Eq (7) y Eq (8) [2].

$$\%OV = \frac{DRM - DOM}{DRM} \quad \text{Eq (7)}$$

$$\%CP = \frac{DRC - DOMC}{DRC} \quad \text{Eq (8)}$$

Se procederá a la determinación de las propiedades mecánicas de compresión (Carga máxima/Área) Eq (9), y tracción indirecta (Carga máxima/sección) Eq (10). Los resultados obtenidos que cuanto menos volumen de vacíos se tenga es más resistente, pero menos permeable [2].

$$f_c = \frac{P}{A} \quad \text{Eq (9)}$$

$$T = \frac{2 * P}{\pi * L * d} \quad \text{Eq (10)}$$

Para conocer la permeabilidad se realiza el cálculo con la ecuación Eq (9) [18].

$$K = \frac{A}{t} \quad \text{Eq (11)}$$

En donde:  $k$  es la permeabilidad, y  $A$  es una constante de 192mm,  $t$  el tiempo de  $h_1$  a  $h_2$ .

Las dosificaciones finales empleadas para fabricar los 4 tipos de mezclas se describen en la Tabla 2, en donde se puede observar que la mayor cantidad de cemento corresponde a 317.71 kg para la mezcla 1. Para todas las mezclas se considera un asentamiento de 0 y la relación  $a/c$  se mantiene igual en todas las mezclas.

**Tabla 2.** Peso por metro cúbico y valores teóricos de contenido de vacíos, % de volumen vs contenido de pasta, % de volumen, N°56, N°57, N°6 y N°7

Material para 1 m3 de hormigón permeable [kg]	Mezcla			
	1	2	3	4
<b>C.V (teórico) [%]</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
<b>C.P (teórico) [%]</b>	<b>22</b>	<b>21</b>	<b>20</b>	<b>19</b>
Cemento:	317.71	303.26	288.82	274.38
Agua:	111.20	106.14	101.09	96.03
Arena:	-	-	-	-
Grava (N°56):	2328.03	2328.03	2328.03	2328.03
Grava (N°57):	2760.67	2760.67	2760.67	2760.67
Grava (N°6):	3564.00	3564.00	3564.00	3564.00
Grava (N°7):	3403.13	3403.13	3403.13	3403.13
Asentamiento:	0	0	0	0
$a/c$ :	0.35	0.35	0.35	0.35

Para la determinación del porcentaje de vacíos de cada uno de los 4 tipos de gradación, se realizó en estado endurecido en base a la normativa ASTM C1754 [19]. Esta normativa contiene 2 métodos A y B. El método usado en este proyecto es el método B, que consiste en dejar un cilindro secar en el horno por 24 horas a una temperatura  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  según la normativa de contenido de vacíos.

Transcurridas las 24 horas se deja secar a temperatura ambiente de 1 a 2 horas. Se procede a pesar su masa seca (A), y después su masa sumergida (B) luego de 30 min. De esta manera el agua pueda llegar a ocupar todos los vacíos del cilindro de tamaño 10 x 20 cm (ver Figura 3).



**Figura 3.** Determinación de la densidad y contenido de aire en el concreto permeable endurecido, para las gradaciones, N°56, N°57, N°6 y N°7

Para la obtención del contenido de pasta de las 4 gradaciones, se realizó por medio de relaciones gravimétricas y volumétricas en estado fresco de cada mezcla. Este proceso consiste en tomar el peso total promedio del cilindro (cilindro metálico, agregados, cemento, agua). Seguido de los agregados que fueron lavados por el tamiz N-8 en donde se separan los agregados finos de los gruesos. Seguidamente fueron secados en el horno a una temperatura  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ , por 24 horas según la normativa ASTM C1754 [19].

Una vez transcurrido las 24 horas se toma el dato del agregado en estado SSS (Superficialmente seco). Posteriormente se le suma la humedad natural calculada en cada gradación para que el agregado regrese a su estado natural. Una vez realizado el procedimiento ya mencionado, se obtiene el peso del molde y peso del agregado en estado natural para después ser restado del peso total promedio. El resultado final es una pasta óptima.

## 2.2. Configuración de Ensayo

Para cada gradación se elaboraron 36 probetas cilíndricas, con 4 mezclas diferentes cada una. La mezcla de hormigón se fabrica de manera manual. Para cada mezcla se elaboraron 3 cilindros a compresión (10 x 20), 3 cilindros a tracción indirecta (10 x 20) y 3 cilindros a permeabilidad (10 x 15), empleando la normativa NTE INEN 1576 [20]. Las probetas fueron ensayadas a los 28 días.

Para el curado de las muestras a compresión y tracción indirecta se utilizó la normativa NTE INEN 2528 [22], en donde los cilindros fueron sumergidos en piscinas de curado a una temperatura  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  por 28 días, a fin de obtener la resistencia requerida, (ver Figura 4).



**Figura 4.** Curado de las Probetas de Hormigón Permeable en Piscina con Cal

Sin embargo, para el curado de las muestras a permeabilidad se lo realizará envolviéndolo por completo al cilindro (ver Figura 5), a fin de conservar su humedad, y también para que las partículas pequeñas o cal que existe en la piscina de curado no afecte la permeabilidad según lo indica la normativa ASTM C31[24].



**Figura 5.** Curado de Cilindros para Medir la Permeabilidad

Para el ensayo a compresión según la norma ASTM C39 [21], se aplicó una carga hasta que el cilindro falle a una velocidad de 0.25 MPa/seg. En la Figura 6 se muestra el ensayo a compresión y el equipo utilizado para ensayar los cilindros de hormigón permeable. Los resultados se observan en la Tabla 3.



**Figura 6.** Ensayo a Compresión (Hormigón Permeable 10 x 20 cm)

Las muestras fueron ensayadas a tracción indirecta por compresión diametral de cada una de las gradaciones (N°56, N°57, N°6 y N°7), según la normativa NTE INEN 2648 [23] a una velocidad de 0.7 a 1.4 MPa/min (0.0116667 a 0.0233333 MPa/seg). En la Figura 7 se puede observar el ensayo a tracción indirecta de un cilindro de hormigón permeable. Y cuyos resultados se presentan en la Tabla 4.



**Figura 7.** Ensayo de Tracción Indirecta

El ensayo de permeabilidad consiste en colocar una muestra de hormigón permeable y llenar la tubería (PVC) con agua a tope, hasta que el agua salga por el tubo de desagüe. La probeta de hormigón se satura desde el punto inicial  $h_1$  (29 cm) hasta el punto final  $h_2$  (0 cm) (ver Figura 8), y se toma el tiempo en segundos.

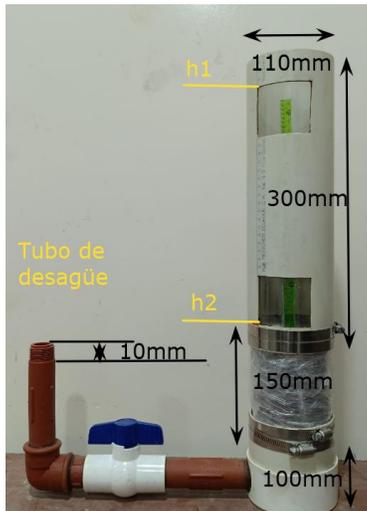


Figura 8. Ensayo de Permeabilidad para Cilindros de Hormigón Permeable

### 3. Resultados y Discusión

La Tabla 3, muestra el resultado promedio del ensayo a compresión para cada mezcla de los diferentes tipos de gradación, en donde se utilizó la Eq (9). Según el ACI 522R-11, la resistencia de un hormigón permeable se encuentra en el rango de 2.5 a 25 MPa, como se observa en la Tabla 3 para las gradaciones N°56, N°57, N°6, N°7.

Tabla 3. Resultados de la resistencia a la compresión del hormigón poroso a los 28 días, de las distintas gradaciones, N°56, N°57, N°6 y N°7.

Mezcla	Resistencia a los 28 días			
	N°56 $f_c$ (MPa)(cv)	N°57 $f_c$ (MPa)(cv)	N°6 $f_c$ (MPa)(cv)	N°7 $f_c$ (MPa)(cv)
Mezcla 1	6.35 (0.03)	5.18 (0.04)	3.92 (0.01)	3.49 (0.02)
Mezcla 2	5.54 (0.03)	5.12 (0.02)	3.61 (0.01)	3.23 (0.01)
Mezcla 3	5.20 (0.03)	4.50 (0.07)	3.24 (0.03)	3.10 (0.03)
Mezcla 4	4.36 (0.04)	3.35 (0.02)	3.10 (0.01)	2.64 (0.03)

Los resultados promedios del ensayo de Tracción Indirecta se presentan en la Tabla 4. Para cada mezcla de los diferentes tipos de gradación se utilizó la Eq (10). El ensayo fue realizado a los 28 días, debido a que, si el ensayo se lo realizara a los 7 y 14 días, la tracción indirecta no tendría un aumento significativo.

Tabla 4. Resultados de tracción indirecta del hormigón poroso a los 28 días, de las distintas gradaciones, N°56, N°57, N°6 y N°7.

Mezcla	Resistencia a los 28 días			
	N°56 $T$ (MPa)(cv)	N°57 $T$ (MPa)(cv)	N°6 $T$ (MPa)(cv)	N°7 $T$ (MPa)(cv)
Mezcla 1	0.88 (0.03)	0.86 (0.05)	0.51 (0.06)	0.47 (0.04)
Mezcla 2	0.82 (0.08)	0.69 (0.08)	0.58 (0.06)	0.58 (0.05)
Mezcla 3	0.91 (0.12)	0.73 (0.07)	0.72 (0.04)	0.52 (0.11)
Mezcla 4	0.84 (0.03)	0.49 (0.09)	0.64 (0.11)	0.44 (0.02)

En la Tabla 5, presenta el promedio del ensayo a la permeabilidad, de los diferentes tipos de gradación se utilizó la Eq (11). Para comparar los resultados obtenidos se utilizó la normativa ACI 522R-11. En donde se indica que, para que un hormigón sea permeable, debe estar en el rango 0.001 a 10 cm/s.

Tabla 5. Resultados de permeabilidad del hormigón poroso a los 28 días, de las distintas gradaciones, N°56, N°57, N°6 y N°7.

Mezcla	Resistencia a los 28 días			
	N°56 $K$ (mm/s)(cv)	N°57 $K$ (mm/s)(cv)	N°6 $K$ (mm/s)(cv)	N°7 $K$ (mm/s)(cv)
Mezcla 1	6.40 (0.03)	7.68 (0.04)	9.29 (0.02)	14.40 (0.04)
Mezcla 2	9.00 (0.07)	8.60 (0.06)	10.29 (0.06)	16.94 (0.05)
Mezcla 3	10.47 (0.03)	12.00 (0.06)	11.76 (0.03)	18.00 (0.05)
Mezcla 4	11.76 (0.07)	12.80 (0.06)	13.09 (0.07)	19.86 (0.06)

Con la finalidad de determinar la diferencia que existe entre el uso de una mezcladora y manualmente. Se realiza una comparación de 2 mezclas de gradación N°7, entre concretera y mezclado a mano para determinar si se tiene algún efecto en las propiedades estudiadas. La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos observándose que no presentan diferencias significativas.

**Tabla 6.** Comparación de resultados de Compresión, Tracción Indirecta, permeabilidad del hormigón poroso a los 28 días, de la gradación, N°7.

	Resistencia a la Compresión fabricado a mano (MPa)(cv)	Resistencia a la Compresión fabricado en concretera (MPa)(cv)
Mezcla 1	3.49 (0.02)	3.48 (0.07)
Mezcla 2	3.23 (0.01)	3.22 (0.03)
	Resistencia a la Tracción fabricado a mano (MPa)(cv)	Resistencia a la Tracción fabricado en concretera (MPa)(cv)
Mezcla 1	0.47 (0.04)	0.48 (0.11)
Mezcla 2	0.58 (0.04)	0.58 (0.04)
	Permeabilidad fabricado a mano (MPa)(cv)	Permeabilidad fabricado en concretera (MPa)(cv)
Mezcla 1	14.40 (0.04)	14.77 (0.07)
Mezcla 2	16.94 (0.05)	16.94 (0.10)

Por otro lado, para la obtención del contenido de vacíos reales promedios de cada gradación se realizaron 4 mezclas como se presenta en la Tabla 7, en donde para cada mezcla se usó la Eq (7). Esta ecuación sirve para obtener el % de vacíos real promedio a través de muestras de cilindros en estado SSS y saturados.

Para el cálculo de contenido de pasta real se utilizó la ecuación Eq (8) que consiste en calcular la densidad real de la mezcla del cemento, por medio del peso total promedio (cemento, agua, agregados, molde metálico). Este cálculo fue realizado para cada cilindro, en estado fresco.

En la Tabla 7 se comparan los resultados teóricos y experimentales entre % óptimo de vacíos y % óptimo de pasta. Para cada gradación se realizaron 4 mezclas en donde, se puede observar que el contenido de pasta y vacíos experimental es mucho mayor en base a las recomendaciones del ACI 522R-11.

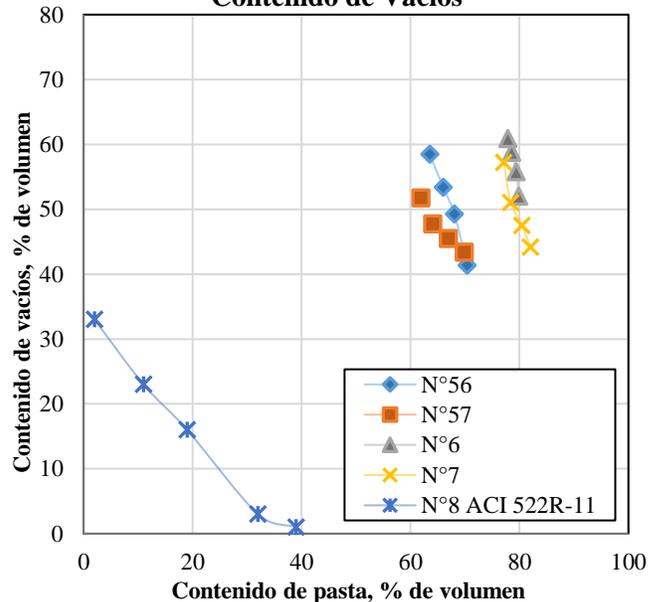
**Tabla 7.** Calculo del % óptimo de vacíos (OV%), y cálculo del % óptimo de pasta (CP%), para las gradaciones de agregado grueso, N°56, N°57, N°6, N°7 (Resultados Reales y Teóricos según el ACI 522R-11)

	Experimental (N°56)		Teórico (N°56)	
	% óptimo de vacíos (OV%)	% óptimo de pasta (CP%)	(CV%)	(CP%)
Mezcla 1	41.37	70.39	15	22
Mezcla 2	49.26	68.06	16	21
Mezcla 3	53.37	66.00	17	20

	Experimental (N°57)		Teórico (N°57)	
	% óptimo de vacíos (OV%)	% óptimo de pasta (CP%)	(CV%)	(CP%)
Mezcla 1	43.35	69.86	15	22
Mezcla 2	45.48	66.94	16	21
Mezcla 3	47.73	64.07	17	20
Mezcla 4	51.71	61.95	18	19
	Experimental (N°6)		Teórico (N°6)	
	% óptimo de vacíos (OV%)	% óptimo de pasta (CP%)	(CV%)	(CP%)
Mezcla 1	52.00	79.85	15	22
Mezcla 2	55.78	79.38	16	21
Mezcla 3	58.76	78.57	17	20
Mezcla 4	60.88	77.87	18	19
	Experimental (N°7)		Teórico (N°7)	
	% óptimo de vacíos (OV%)	% óptimo de pasta (CP%)	(CV%)	(CP%)
Mezcla 1	44.15	82.04	15	22
Mezcla 2	47.51	80.83	16	21
Mezcla 3	51.04	78.40	17	20
Mezcla 4	57.18	77.09	18	19

En la Figura 9, presenta el contenido de vacíos y contenido de pasta real de cada gradación que fueron calculadas con mezclas óptimas. Los valores teóricos y valores reales, son muy distintos en cada gradación. Se observa que la gráfica del tamaño N°8 del ACI 522R-11 solo podrá ser utilizada para dicho tamaño, ya que el tamaño del agregado influye considerablemente en el contenido de pasta y vacíos.

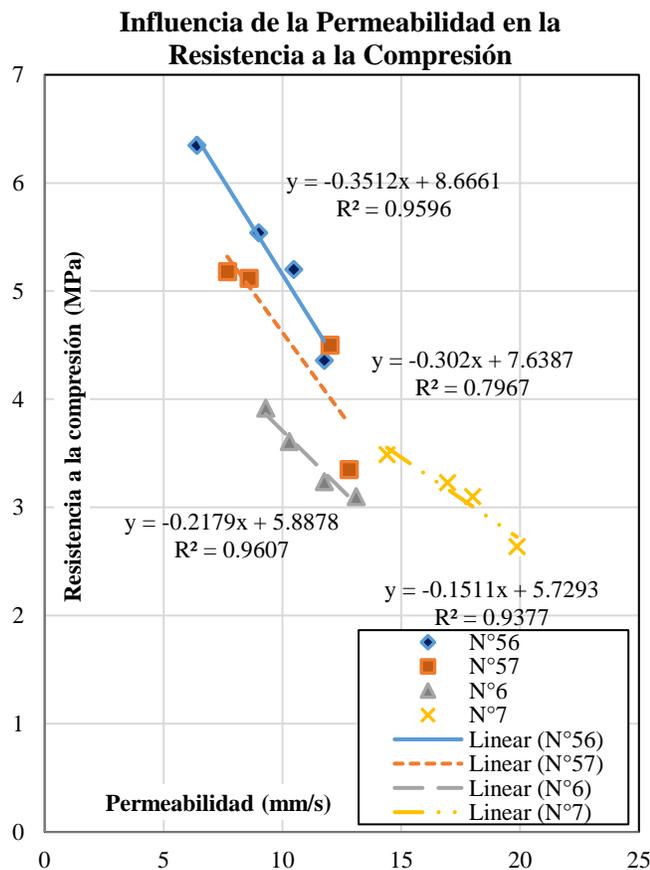
**Relación entre el Contenido de Pasta y Contenido de Vacíos**



**Figura 9.** Relación entre el Contenido de Pasta vs Contenido de Vacíos para las designaciones de número de tamaño N°56, N°57, N°6 y N°7.

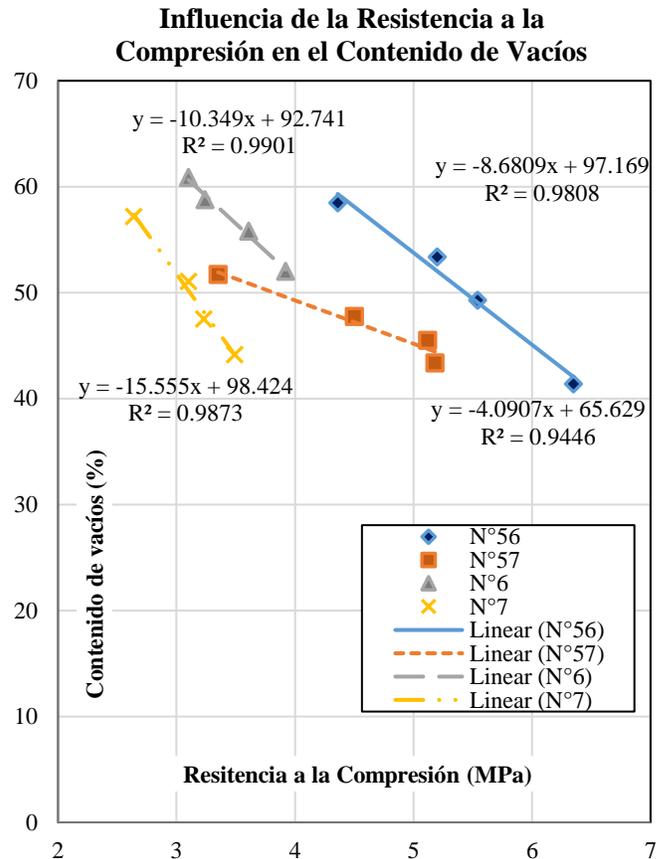
La Figura 10, presenta la relación que existe entre la permeabilidad y resistencia a la compresión. Se observa que la permeabilidad de la gradación N°56 es baja, pero se encuentra en el rango establecido. Su resistencia es mayor que las gradaciones N°57, N°6, N°7. Por otro lado, en el N°7 la permeabilidad es alta, pero su resistencia es baja. La resistencia máxima que se obtuvo fue de 6.35 MPa y con una permeabilidad baja de 11.76 mm/s.

Se ha obtenido un coeficiente de correlación ( $r^2$ ), que se obtuvo a través de los diferentes ensayos antes mencionados. Se observa en la Figura 10, Figura 11 y Figura 12 que tienden a 1, dando como resultado una tendencia bastante clara y fuerte.



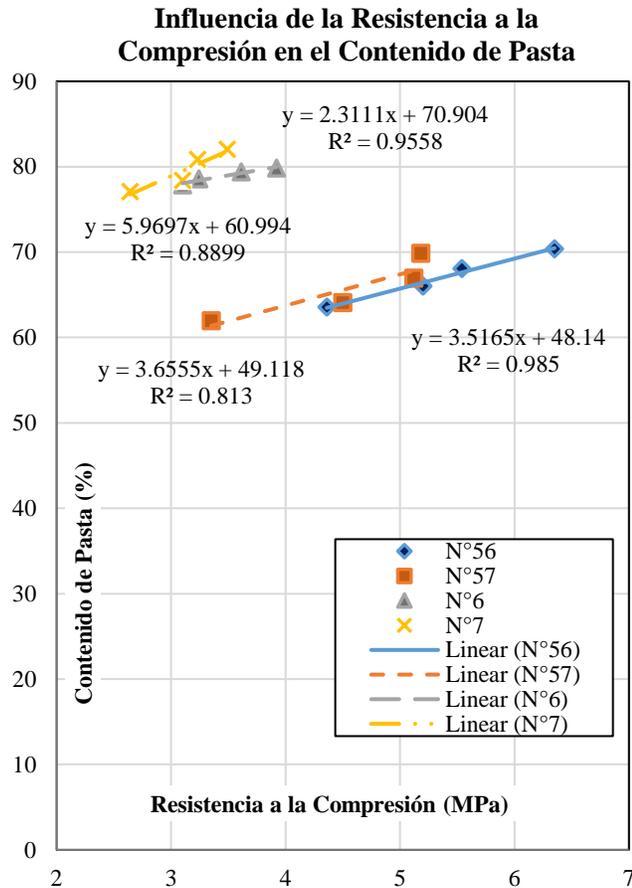
**Figura 10.** Influencia de la Permeabilidad vs la Resistencia a la compresión de las distintas gradaciones, N°56, N°57, N°6 y N°7.

La Figura 11, hace referencia a la relación que existe entre la resistencia a compresión y contenido de vacíos. En donde la resistencia a la compresión de la gradación N°7 es baja, mientras que su contenido de vacíos es alto. Sin embargo, la que mejor se comporta es la gradación N°56 con una resistencia a la compresión alta y contenido de vacíos bajo.



**Figura 11.** Influencia de la Resistencia a la Compresión vs Contenido de Vacíos de las distintas gradaciones, N°56, N°57, N°6 y N°7.

La Figura 12, representa la relación que existe entre la resistencia a la compresión y contenido de pasta. En donde la resistencia a la compresión de la gradación N°56 es alta, mientras que su contenido de pasta es bajo. Sin embargo, la N°7 tiene gran cantidad de pasta, pero su resistencia es baja, esto debido al tamaño del agregado.



**Figura 12.** Influencia de la Resistencia a la Compresión vs Contenido de Pasta de las distintas gradaciones, N°56, N°57, N°6 y N°7.

#### 4. Conclusiones

El presente trabajo propone recomendaciones, de relaciones entre % de vacíos y % de pasta, empleando gradaciones N°56, N°57, N°6 y N°7. Después de realizar una campaña experimental se puede concluir que:

Los valores reales y valores teóricos de contenido de pasta y vacíos de cada gradación son diferentes, esto se debe a que cada gradación tiene distinto material con diferentes tamaños de agregados con los que cumple la ASTM C33.

En cada una de las gráficas de contenido de vacíos vs contenido de pasta, de las distintas gradaciones se concluye que, dependiendo del tamaño del agregado el contenido de pasta aumenta, por otro lado, mientras más pasta tenga menos contenido de vacíos obtendrá en cada gradación, dando como resultado que la resistencia sea alta.

Para las 4 distintas gradaciones se observar que la resistencia a la compresión disminuye de 6.35 a 2.64 MPa, concluyendo en que el tamaño de partícula mientras más grande sea tendrá mayor resistencia, pero menos permeabilidad.

En el ensayo de tracción indirecta se observa que el tamaño del agregado influye en cada gradación, además; se puede observar que el N°56 es la que mayor resistencia a la tracción indirecta tiene con un esfuerzo de 0.88 MPa. El % de resistencia a tracción indirecta fue de 13.85%

La gradación N°7 es más permeable, dando como resultado un aumento de vacíos de 19.86 mm/s y poca cantidad de cemento. La permeabilidad va a depender de la cantidad de cemento y vacíos que se tenga.

El ACI 522R-11 recomienda la relación  $a/c=0.35$ . Como futura línea de investigación se puede explorar y realizar solo para una mezcla con distintos valores relación  $a/c$ , y verificar como varia el % contenido de pasta y % de vacíos.

Utilizar los hormigones permeables y verificar el escurrimiento real que tendrían en veredas, aceras y bordillos.

## Referencias

- [1]. M. Vallejo, V. Amaguaya, “Selección del material óptimo para el diseño de concreto permeable utilizando agregados de dos minas de la provincia de Chimborazo y el cemento portland tipo i, en relación a la obtención de mayor permeabilidad y resistencia,” Proyecto de titulación, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. Feb. 2016 [En línea]. Disponible en: <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/1369/1/UNACH-EC-ING-CIVIL-2016-0014.pdf>
- [2]. C. León, G. Rosero, “OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE UNA MEZCLA DE HORMIGÓN PERMEABLE A PARTIR DE TRES DISTINTAS GRADUACIONES,” Proyecto de titulación, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador. Sept.2016 [En línea]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/7870/1/T-UCE-0011-243.pdf>
- [3]. J. Kevern, V Schaefer, et al, “Portland Cement Pervious Concrete: A Field Experience from Sioux City,” Department of Civil, Construction, and Engineering, Iowa State University, Ames, IA, Sioux, EEUU, 2008 [En línea]. Disponible en: <https://benthamopen.com/contents/pdf/TOBCTJ/TOBCTJ-2-82.pdf>
- [4]. V. Marlon, “DISEÑO, PROCESO CONSTRUCTIVO Y EVALUACIÓN POST CONSTRUCCIÓN DE UN PAVIMENTO RÍGIDO DE CONCRETO PERMEABLE,” Proyecto de titulación, Universidad de El Salvador, San Salvador, Republica de El Salvador. Mayo.2012 [En línea]. Disponible en: <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/3929/1/Dise%C3%B1o%20proceso%20constructivo%20y%20evaluaci%C3%B3n%20post%20construcci%C3%B3n%20de%20un%20pavimento%20r%C3%ADgido%20de%20concreto%20permeable.pdf>
- [5]. O. Cueva, J. David “Relación entre la Estructurara de vacíos y las Propiedades de un Concreto Permeable para su uso en Pavimentos,” Proyecto de titulación, Universidad Cesar Vallejo, Huaraz, Perú. Mayo.2021
- [6]. D. Pérez, “ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CONCRETOS PERMEABLES CON AGREGADOS ANDESÍTICOS,” Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Agosto.2019 [En línea]. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/3443/1/perezramos.pdf>
- [7]. F. Núñez, “FABRICACIÓN DE HORMIGÓN PERMEABLE PARA CANCHAS DE USO MÚLTIPLE CON LA UTILIZACIÓN DE AGREGADOS DE LA PROVINCIA DE PICHINCHA,” Proyecto de titulación, Pontifica Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador. Sep.2016 [En línea]. Disponible en: [/http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/7870/1/T-UCE-0011-243.pdf](http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/7870/1/T-UCE-0011-243.pdf)
- [8]. B. Das “Principios de Ingeniería Geotécnica,” PWS Publishing Co, Boston, MA, pp. 146-150, 1993 [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/37854899/Fundamentos\\_de\\_Ingenieria\\_Geotecnica\\_Braja\\_M\\_Das](https://www.academia.edu/37854899/Fundamentos_de_Ingenieria_Geotecnica_Braja_M_Das)
- [9] CEMENTO HIDRÁULICO. REQUISITOS DE DESEMPEÑO PARA CEMENTOS HIDRÁULICOS, NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2380:2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2380.pdf>
- [10] Standard Specification for Blended Hydraulic Cements, ASTM C1157:2008. [En línea]. Disponible en: <https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Revista%20ACI%20No%202%20especificaciones%20cemento.pdf>
- [11] J. Sarria y D. Guzmán, Tecnología del Concreto. Asociación Colombiana de

- Productores de Concreto, Materiales y diseño de mezcla, Colombia, Bogotá, 2010
- [12] Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37.5 mm mediante el uso de la máquina de los Ángeles, NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 860;2011 [En línea]. Disponible en: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/860.pdf>
- [13] DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN DEL ÁRIDO GRUESO, NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 857;2010 [En línea]. Disponible en: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/857.pdf>
- [14] ÁRIDOS, DETERMINACIÓN DE LA MASA UNITARIA Y EL PORCENTAJE DE VACÍOS, NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 858;2010 [En línea]. Disponible en: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/858.pdf>
- [15] Áridos para Hormigón, DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO TOTAL DE HUMEDAD. NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 862;2011 [En línea]. Disponible en: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/862.pdf>
- [16] Áridos para hormigón. Requisitos, NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 872;2011.
- [17] Áridos análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso, NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 696;2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/872-1.pdf>
- [18] A. Matthew, J Don, et al, “Report on Pervious Concrete,” Reported by ACI Committee 522R-11, pp. 29-33, 2011 [En línea]. Disponible en: <https://cecollection2.files.wordpress.com/2020/05/522r-10-report-on-pervious-concrete.pdf>
- [19] Método de prueba estándar para densidad y el contenido de vacíos del concreto permeable endurecido, ASTM C1754;2019
- [20] HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. ELABORACIÓN Y CURADO EN OBRA DE ESPECÍMENES PARA ENSAYO, NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 1576;2011
- [21] Resistencia a la compresión de cilindros de concreto, ASTM C39;2012
- [22] CÁMARAS DE CURADO, GABINETES HÚMEDOS, TANQUES PARA ALMACENAMIENTO EN AGUA Y CUARTOS PARA ELABORAR MEZCLAS, UTILIZADOS EN ENSAYOS DE CEMENTO HIDRÁULICO Y HÓRMIGON. REQUISITOS, NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2528;2010
- [23] HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE HORMIGÓN, NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2648;2013
- [24] Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Ensayo de Concreto en la Obra, NORMA TÉCNICA ECUATORIANA ASTM C31;2008