



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS
AGREGADOS GRUESOS EN EL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingenieros Civiles

AUTORES: Richard Paúl Chasi Chilig
Bryan Sebastián Guevara Lucio
TUTOR: Francisco Roberto Ortiz Navas

Quito - Ecuador
2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Richard Paúl Chasi Chilig con documento de identificación N° 1721097531 y Bryan Sebastián Guevara Lucio con documento de identificación N° 0202343281; 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.

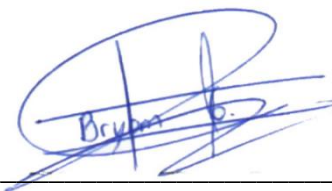
Quito, 01 de agosto del 2022

Atentamente,



Richard Paúl Chasi Chilig

1721097531



Bryan Sebastián Guevara Lucio

0202343281

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

Nosotros, Richard Paúl Chasi Chilig con documento de identificación N° 1721097531 y Bryan Sebastián Guevara Lucio con documento de identificación N° 0202343281; 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: “Análisis de la Influencia del Módulo de Elasticidad de los Agregados Gruesos en el Módulo de Elasticidad del Hormigón”, 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 Politécnica Salesiana.


Quito, 01 de agosto del 2022

Atentamente,



Richard Paúl Chasi Chilig

1721097531



Bryan Sebastián Guevara Lucio

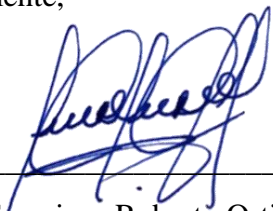
0202343281

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: ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS AGREGADOS GRUESOS EN EL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN, realizado por Richard Paúl Chasi Chilig con documento de identificación N° 1721097531 y Bryan Sebastián Guevara Lucio con documento de identificación N° 0202343281, 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, 01 de agosto del 2022

Atentamente,



Ing. Francisco Roberto Ortiz Navas, PhD.

1717631244

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS AGREGADOS GRUESOS EN EL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE ELASTICITY MODULE OF COARSE AGGREGATES ON THE ELASTICITY MODULE OF THE CONCRETE

Bryan Guevara-Lucio¹, Richard Chasi-Chilig²

Resumen

Todas las edificaciones desde el punto de vista ingenieril necesitan de un diseño estructural, el objetivo es salvar vidas y reducir daños materiales, en la actualidad la gran mayoría de las edificaciones se construyen todavía en hormigón armado, por lo que estos deben resistir los esfuerzos últimos de flexo compresión producidos de un cálculo estructural. Dentro del Ecuador las regiones de la costa y sierra son las zonas de mayor riesgo sísmico, por lo general los esfuerzos provenientes de este son los mayores.

Antes de construir se debe diseñar por lo tanto se toma valores referenciales de las propiedades de los materiales, propiedades que el ingeniero busca replicar durante la obra, una de estas propiedades es el módulo de elasticidad que depende tanto de la resistencia del hormigón como también de la calidad de sus agregados.

La presente investigación obtiene el módulo de elasticidad de los hormigones mediante ASTM C 469 – 02, el módulo de elasticidad de rocas ubicadas en Mulaló, Latacunga – Cotopaxi y Guayllabamba, Quito – Pichincha mediante la norma ASTM D 3148 – 96. Para luego compararlas con las propuestas en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-HM del 2015.

Palabras Clave: ACI, Modulo de elasticidad de los agregados.

Abstract

All buildings from the engineering point of view need a structural design, the objective is to save lives and reduce material damage, currently the vast majority of buildings are still built in reinforced concrete, so they must resist the last efforts of flexo compressions produced from a structural calculation. Within the equator, the regions of the coast and mountains are the areas of greatest seismic risk, generally the efforts coming from this are the greatest.

Before building, it is necessary to design, therefore, reference values of the properties of the materials are taken, properties that the engineer seeks to replicate during the work, one of these properties is the modulus of elasticity that depends both on the resistance of the concrete and also on the the quality of its aggregates.

The present investigation obtains the modulus of elasticity of concrete through ASTM C 469 - 02, the modulus of elasticity of rocks located in Mulaló, Latacunga - Cotopaxi and Guayllabamba, Quito - Pichincha through the standard ASTM D 3148 - 96. To then compare them with the proposals in the Ecuadorian Construction Standard NEC-SE-HM of 2015

Keywords: ACI, Modulus of elasticity of aggregates.

¹ Estudiante Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana Quito – Ecuador, Autor para correspondencia ✉: bguevaral@est.ups.edu.ec.

² Estudiante Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana Quito – Ecuador, Autor para correspondencia ✉: rchasi@est.ups.edu.ec.

1. Introducción

El módulo de elasticidad es una característica intrínseca de materiales, como los hormigones y las rocas, este permite cuantificar la deformación producida ante un esfuerzo.

Según Carvajal Johana [1] se denomina hormigón al conglomerado formado por cemento, agregados, agua y aditivos, este material soporta elevados esfuerzos de compresión. En la construcción se lo refuerza con acero para así soportar esfuerzos de tracción y corte.

Por otro lado, las rocas son sólidos cohesionados, se forman por uno o varios minerales, según Álvaro Correa [2] su comportamiento ante esfuerzos de compresión puede ser elástico, plastoelástico, elastoplástico, plasto-elastoplástico.

Varios autores como Paucar, Sacasari [3], Morales, Ojeda, Rodríguez, Rosero [4] han evidenciado que el módulo de elasticidad de concreto (E_c) expresados en el ACI 318-19[5] y la Norma Ecuatoriana de la Construcción del 2015 (NEC) resultan ser poco conservadores ya que los resultados obtenidos en laboratorios no se ajustan bien a las expresiones. Estos autores han relacionado el E_c con el propuesto por el ACI-318 y la NEC entre un 75% a 91.5%.

Así mismo, en la investigación realizada por Henry Cabrera [6], concluye que existen problemas al utilizar la Eq (3) para estimar del módulo de elasticidad del hormigón debido a que las normas internacionales no representan las características de los hormigones de nuestro país.

Por otro lado, Gonzalo Andrés[7] en 2013 realiza hormigones de 28MPa la cual alcanza una resistencia de 30.9MPa, concluye que el E_c propuesto por ACI 318 y ACI 363 se encuentra en el orden del 74% y 76% obtenido experimentalmente mediante norma ASTM C469.

Los estudios realizados por Carvajal Johana [1], Rivadeneira Byron [8] y Gonzalo Andrés [7] están basados en diseños de 21MPa[1], 24MPa y 28MPa obteniéndose resistencias y módulos de elasticidad de: 22.2MPa - 18587.9 MPa; 26.5MPa - 18783.2MPa; 30.9MPa - 19232.9MPa, respectivamente, estos resultados provienen de la mina San Ramón, ubicada en Mulaló Cotopaxi.

Además, estas tesis coinciden que el diseño mediante la metodología ACI provee alrededor de un 8% superior a la resistencia de diseño, caracterizan a la zona con agregados de origen volcánico tipo andesita piroxénica.

En la investigación realizada por Rodríguez, Rosero [4] produce diseños de hormigones con resistencia de 21MPa y 28MPa, en el cual han obtenido un valor nominal en resistencia y módulo de elasticidad de 30.9MPa -24370.3MPa; 35.2MPa - 24574.1MPa; igualmente Paucar, Sacasari [3] diseña un hormigón de 28MPa donde obtiene 29.9MPa - 22040.9MPa, la mezcla fue diseñada mediante metodología ACI, además obtienen una resistencia del 6% superior a lo diseñado. Estos ensayos provienen de la Concesión minera Prima 2, ubicada en el sector de Guayllabamba.

La NEC-SE-HA [9] permite estimar el módulo de elasticidad del hormigón a partir del esfuerzo a compresión simple (f'_c) y módulo de elasticidad de los agregados (E_a).

$$E_c = 1,15 * \sqrt[3]{E_a} * \sqrt{f'_c} \quad \text{Eq (1)}$$

Se calcula el módulo de elasticidad de los agregados (E_a) despejando la Eq (1) se obtiene la siguiente expresión.

$$E_a = \left(\frac{E_c}{1.15} \right)^3 * f'_c \frac{2}{3} \quad \text{Eq (2)}$$

Por otro lado, el Código Americano del hormigón ACI 318-19 [5] obtiene el módulo elástico del hormigón a partir del esfuerzo de compresión simple (f'_c) y el peso específico del agregado (W_C).

$$E_c = w_c^{1,5} * 0,043 * \sqrt{f'_c} \quad \text{Eq (3)}$$

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad \text{Eq (4)}$$

Se toma cuenta las recomendaciones para el manejo, aplicación y uso de las galgas extensiométricas de Idrovo y Quintanilla [10] la lectura de deformaciones se obtiene mediante el cambio de resistencia de la galga el cual pasa por un módulo de adquisición el cual incorpora ¼ de puente de Wheatstone, dentro del país se realizan ensayos de módulo de elasticidad en cilindros de hormigón con galgas extensiométricas [6].

En la investigación realizada por Serrano María y Perez Diego [11] han concluido que las ecuaciones referenciales que tienen para determinar el E_c son mayores al determinado por ensayos de laboratorio, en esta investigación comprueban que la ecuación de la NSR-98 sobre estima desde un 24% a un 50% de los valores obtenidos de ensayos, esta investigación se lleva a cabo en México.

Además, en la décimo octava conferencia internacional sobre Rehabilitación y reconstrucción de edificios en 2016 Kocab, Kucharczykova, Misaka, Zitta y Kralikova [12], exponen el desarrollo del módulo de elasticidad dinámico (E_{cu}) y estático (E_c) en el tiempo, los hormigones evaluados son los curados y no curados, concluyen que para hormigones curados el E_{cu} y E_c crecen moderadamente a partir del día 28 hasta el día 365, por otro lado los hormigones sin curar, tienden a reducir su E_{cu} y E_c en el lapso del día 28 al 365 llegando aproximadamente al valor obtenido al día 3, después del año en ambos casos el E_c y E_{cu} permanecen constantes.

La Eq (1) procedente NEC demuestra resultados de módulos de elasticidad bastante reales, pero está limitado de canteras, lo que resulta ser insuficiente para su aplicación, bajo este contexto la presente investigación intenta verificar la relación que existe entre el E_c y el módulo de

elasticidad de los agregados (E_a), además incluir dos valores de E_a para NEC.

Con ese fin se verifica el cumplimiento de la Eq (1), para ello se ha desarrollado una campaña instrumental en donde se han utilizado dos resistencias a la compresión así también dos fuentes de agregados gruesos, los resultados han demostrado que la expresión describe correctamente el E_c y que la Eq (4) del ACI 318 es ajena a la realidad.

2. Materiales y Métodos

2.1. Agregados

Se realizaron 4 mezclas de hormigón, el cemento empleando fue tipo IP el cual fue fabricado el cual fue fabricado con NTE INEN 490 [13] (ASTM C 595 [14]), la densidad del cemento mantiene una media de 2916 kg/cm³ [15].

Se han utilizado dos tipos de agregado grueso el Tipo I agregado grueso de la mina San Ramón – Mulaló y Tipo II agregado grueso de la mina Prima 2 – Guayllabamba; en ambas mezclas se ha utilizado el mismo agregado fino proveniente de la mina de Revton – Pintag.

Se denomina como: Mezcla I y II a los hormigones de resistencia de 21MPa y 28 MPa, se emplea el agregado Tipo I; y Mezcla III y IV a los hormigones de resistencia de 21MPa y 28 MPa, se emplea el agregado Tipo II.

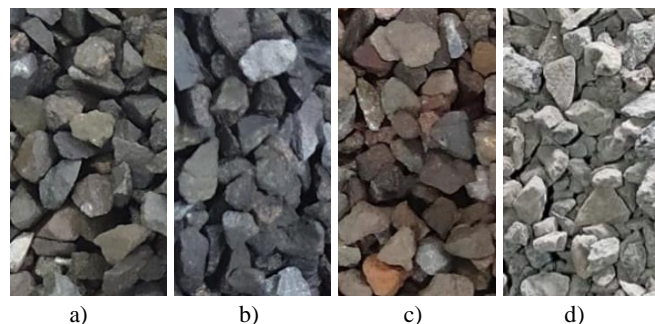


Figura 1. Fotografías de los agregados: Tipo I a) Andesita; b) Andesita basáltica; c) Dacita; Tipo II d) Andesita.

A los agregados se les realiza las pruebas de calidad: tamaño máximo nominal [16], que puede determinarse a partir 15% del retenido acumulado; granulometría de finos y gruesos [17] Figura 2 esto

permite asegurar una óptima adherencia de los agregados con el conglomerado [18]; Abrasión [19] caracteriza la dureza de la grava, medida esencial para obras sujetas a cargas de impacto, desgaste o pulimento; Pesos específicos del agregado grueso [20] y fino [21]; Masas unitarias [22]; humedades [23] permite aportar o disminuir la cantidad de agua durante la fundición, contenido orgánico [24] que el hormigón o mortero este libre se salitre y asentamiento [25] encargado de verificar la trabajabilidad de la mezcla.

En la Figura 2 se visualiza las granulometrías y fajas granulométricas de los siguientes materiales: Tipo I corresponde al número de tamaño 67 el cual cubre los tamices con aberturas de 19.0 a 4.75 mm, por otra parte la granulometría cumple parcialmente con el límite inferior; Tipo II correspondiente al número de tamaño 57 el cual cubre tamices con aberturas de 25.0 a 4.75mm, además la granulometría se encuentra dentro de la faja; y por último el agregado finos, la faja es estándar pero se asegura que en ningún tamiz pase más del 45%, la granulometría esta parcialmente dentro de la faja, además el material es muy fino.

El agregado fino tiene bajo contenido orgánico presentándose con un valor de 2 dentro de la escala de colores estándar de Gardner, el material es apto para usar en la construcción.

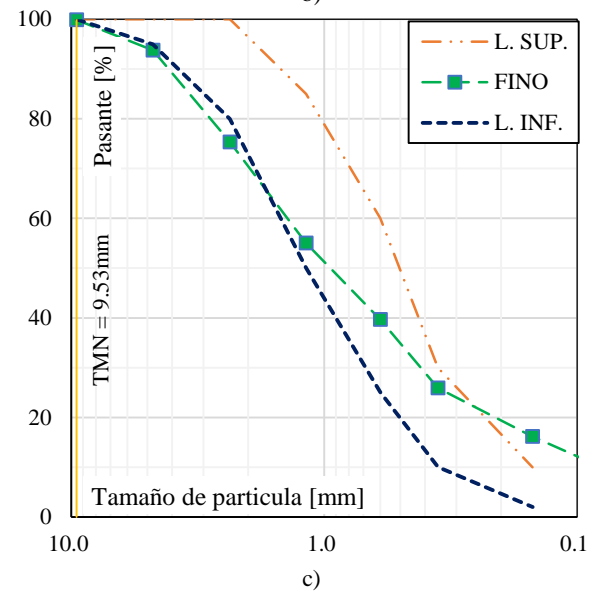
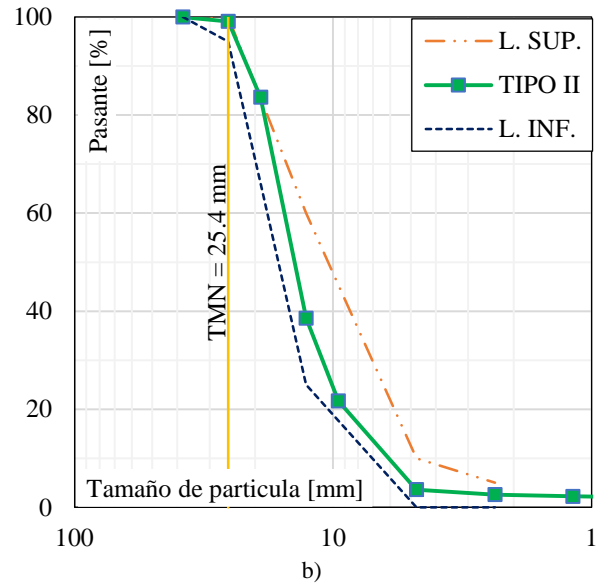
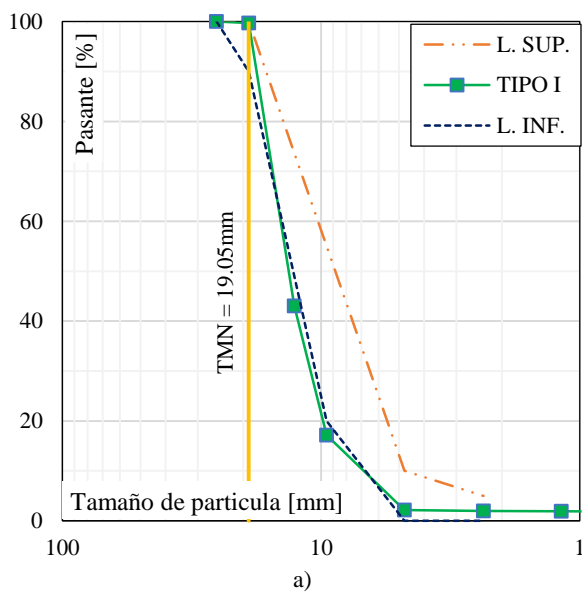


Figura 2. Curvas granulométricas y fajas de los materiales según ASTM C33 [26]: a) Agregado grueso Tipo I; b) Agregado grueso Tipo II; c) Agregado fino.

En la Tabla 1 se presenta el resumen de los ensayos realizados de los distintos tipos de agregados.

Tabla 1. Resultados de laboratorio del agregado fino y grueso.

Material	Grueso		Fino
	Tipo I	Tipo II	
Tipos de Materiales			
Peso Específico [gr/cm ³]	2.77	2.65	2.62
Peso Unitario Suelto [gr/cm ³]	1.36	1.40	1.48
Peso Unitario Varillado [g/cm ³]	1.41	1.47	1.61
Humedad Natural [%]	1.14	1.08	4.69
Absorción [%]	3.18	2.33	4.55
Tamaño Máximo Nominal [mm]	19.05	25.40	-
Equivalente de Arena [%]	-	-	83.82
Desgaste a la Abrasión [%]	31.16	20.40	-
Módulo de finura	-	-	2.94

El diseño de mezclas se realiza mediante el metodo ACI, por consecuente se detalla el diseño en pesos de los hormigones en la Tabla 2.

Tabla 2. Peso por metro cubico y resistencia a la compresión de cada material

Material para 1 m ³ de hormigón [Kg]	Mezcla			
	I	II	III	IV
Diseño de mezcla	21 MPa	28 MPa	21 MPa	28 MPa
Agua:	205.00	205.00	193.00	193.00
Cemento:	386.79	459.64	384.46	453.05
Arena:	846.20	780.84	779.00	717.45
Ripio:	853.22	853.22	961.97	961.97
a/c:	0.530	0.446	0.502	0.426
Asentamiento [cm]:	6.0	8.0	5.0	7.0
f'c [MPa]	25.81	35.97	28.92	35.99
Coefficiente de Varianza:	(3,1)	(2,2)	(1,4)	(3,6)

Se ensayaron los cilindros de hormigón a los 7, 14 y 28 días del curado, construyéndose así la curva de edad vs resistencia

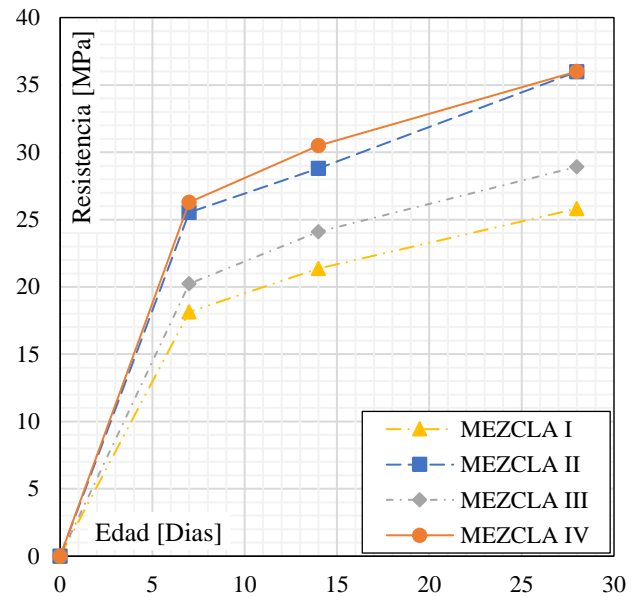


Figura 3, de tal forma se obtiene un 70% 80% y respecto a la resistencia media final.

Como puede visualizarse la resistencia de diseño correspondiente a la Mezcla I y II son de 21MPa y 28MPa respectivamente, la resistencia final a los 28 días de curado fue de 25 y 36 MPa.

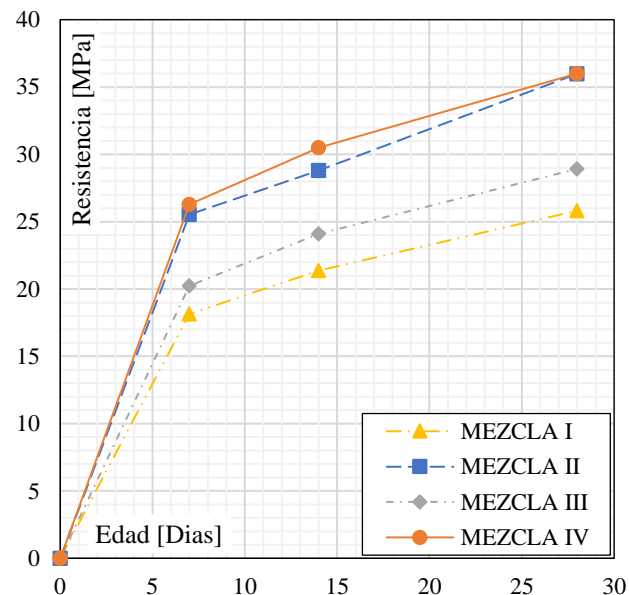


Figura 3. Curva Edad vs Resistencia de las mezclas respectivas.

2.2. Núcleos de Rocas

El material evaluado Tipo I y Tipo II procede de un proceso de trituración, por lo tanto, las rocas se encuentran a la intemperie y mantienen un tamaño superior a la piedra escollera. Para la caracterización del agregado: Tipo I se levantó información in situ encontrándose rocas volcánicas con contenido de cuarzo en forma de cristales de granos redondeados y corroídos, siendo asociadas en primera instancia con andesita ahora denominada como Roca I, dacita Roca II y andesita basáltica Roca III; Tipo II la textura de la roca estudiada es de tipo porfídica, conformándose de minerales como plagioclasa, piroxeno y hornblenda, se concluye que las rocas en su mayoría son andesitas Roca IV.

Durante el muestreo se toma cuenta que las muestras presenten un bajo estado de meteorización, posterior se tomó 3 testigos por cada tipo de roca siendo un total de 9 testigos para los agregados de la mina San Ramon y 3 testigos para la Concesión minera Prima 2.



Figura 4. Fotografía de la extracción de núcleos de los agregados Tipo I y Tipo II.

Se verifica la correlación de los datos medidos por diferentes metodologías, para ello se ensaya un núcleo de hormigón de 21MPa, mediante galgas extensiométricas de 60mm y anillos de deformación. También se utiliza epóxico como adhesivo, el coeficiente de variación (CV) es del 9% entre el promedio de las galgas y el valor medido con los anillos.

Antes de pegar la galga se debe preparar los especímenes, en primera instancia se debe lijar de

preferencia pasar con lija de grano No 80 y luego No 200, para limpiar la superficie de contacto con la galga se aplica mediante una gasa estéril libre de pelusas el correspondiente desengrasante (alcohol isopropílico), catalizador (ácido fosfórico) y neutralizante (hidróxido de amonio), una vez seco se delimita la superficie de contacto con cinta, para la adherencia de la galga se usa el epóxico previamente evaluado durante la etapa de prueba.

La toma de muestras se realizó a nivel del terreno con equipo comúnmente utilizado para la extracción de núcleos de hormigón, se realiza de esta manera debido a que no es un ensayo geológico donde se requiera profundizar dentro del suelo para la recuperación de testigos de roca. Se preparan los testigos utilizando el equipo descrito en la ASTM 4543[27]. Por otra parte, la presente investigación se limita a medir el módulo elástico de los testigos, estos son sometidos a carga de compresión simple sin confinamiento, en cumplimiento a la norma ASTM 4148[28] se utiliza 2 galgas extensiométricas por cilindro para lectura de deformaciones verticales, por lo que no se mide coeficiente de poisson.



Figura 5. Testigos de roca preparados

Los testigos de las Rocas I, II, III correspondientes al agregado Tipo I tienen las siguientes densidades: de 2.45 g/cm³, 2,74 g/cm³, 2.75 g/cm³, el CV es de 2.93%, 0.71% y 0.28% respectivamente.

Los testigos de la Roca IV que corresponden al agregado Tipo II tiene una densidad media de Roca IV 2.68g/cm³ y CV 1.09%. El CV es medido de acuerdo con los testigos tres testigos de cada tipo de roca.

2.3. Metodología del ensayo

Los cilindros de hormigón fueron elaborados, curados mediante la NTE INEN 3124 [29] y ensayados mediante la norma ASTM 469-02 [30] a fin de cumplir las dimensiones y tolerancias normadas, previo al ensayo del E_c se toma cuenta las siguientes consideraciones: pulir la cara de contacto entre el pistón y cilindro de hormigón; presentar al menos dos precargas aproximadamente del 20% de la carga máxima antes de ensayar el hormigón hasta el 80% de la carga máxima soportada por un cilindro gemelo.



Figura 6. Método tradicional empleado en cilindros de hormigón para la determinación del módulo elástico.

El equipo utilizado para la medición del módulo de elasticidad en las rocas trabaja con dos metodologías: Metodo A pruebas triaxiales con celda constante de presión, en el que se asigna una carga de confinamiento continua y se carga la probeta hasta la falla; Metodo B pruebas triaxiales en estado de falla múltiple, consiste en incrementar isotrópicamente las tensiones axiales y horizontales, por lo general la presión de celda permanece constante y la tensión axial incrementa en base a una tasa constante de deformación.

Durante el ensayo de los testigos se aplica el método A en el cual la presión de celda es 0, las galgas empleadas tienen una resistividad de 120Ω con un factor de 2.12 y trabajan a 2V, para cumplir con lo establecido en la norma donde el tamaño de la galga debe ser al menos 10 veces el tamaño de grano, su dimensión debe ser de 20mm como mínimo, la velocidad de ensayo es de 0.25 MPa/s.

Si el espécimen es mayor a 2 pulgadas se recomienda tener cuidado durante el ensayo porque los especímenes pueden llegar a soportar cargas de 100 toneladas y su rotura puede ser inesperada y explosiva.



Figura 7. Medición del módulo elástico mediante galgas extensiométricas y equipo de adquisición de datos.

Dentro del manual recomendando utilizar algunos especímenes para obtener la resistencia máxima a compresión, pero durante la práctica resulta inviable ya que independiente mente del tamaño de los testigos estos pueden traer poros internos o fisurarse durante el transporte, debido a que durante el ensayo el primer testigo que soporta un esfuerzo de 200 MPa, pero los dos testigos gemelos llegaron a un promedio de 115MPa.

3. Resultados y Discusión

En la Figura 8 se determina al módulo de elasticidad para la Mezcla I, II, III y IV como los graficos de puntos desde la 50 millonésima deformación hasta el 40% del esfuerzo máximo de la resistencia de cada hormigón, representándose así entre línea entrecortada todos los ensayos realizados para calcular el módulo de elasticidad y como línea continua el valor medio tomado para cada resistencia.

Se debe tener cuenta que la resistencia a la compresión simple (f'_c) evaluadas en todas las ecuaciones corresponde a la resistencia media de los cilindros de hormigón ensayados presente en la Tabla 2.

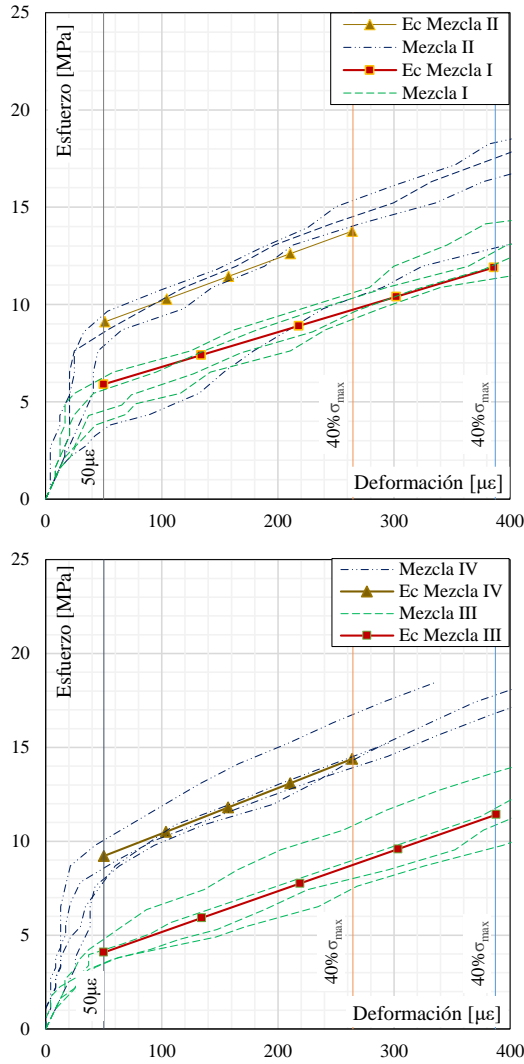


Figura 8. Resultados de los ensayos realizados para la obtención del Ec.

La Tabla 3 presenta los valores obtenidos experimentalmente y los estimados por la Eq (4), estos valores son muy distantes debido a que los agregados del Ecuador tienen un alto índice de sedimentación, por lo tanto, al fabricar el hormigón se obtiene un menor Ec, al aplicar la Eq (4) se sobre estima el módulo elástico desde un 12% a un 34% aproximadamente.

Los CV obtenidos del ensayo experimental se mantienen inferiores al 7%, es así que se toma el promedio como un valor representativo de las muestras de hormigones.

Tabla 3. Resultados de Ec experimentales y del código ACI 318-19 usando la Eq (4) para cada tipo de mezcla.

Módulo de Elasticidad (GPa)

Resistencia a la compresión (MPa)	ASTM C469 – 64		ACI 318 – 19 Eq (4)	
	Experimental		Teórico	
	Tipo I	Tipo II	Tipo I	Tipo II
21	17.89	21.69	23.88	25.27
28	21.87	24.19	28.19	28.20

En la Tabla 4 se representa el promedio pesos específicos obtenidos para cada diseño, su CV es menor al 1.5% para todos los casos, por lo tanto, se utiliza dentro de la Eq (3) para la estimación del Ec.

Tabla 4. Peso específico del hormigón medio de las mezclas.

Resistencia a la compresión (MPa)	Peso específico del hormigón (Kg/m3)	
	Tipo I	Tipo II
21	2262.88	2229.27
28	2241.36	2285.77

Los valores de Ec presentados en la Tabla 5 son los determinados mediante la Eq (3) teniendo de base los pesos específicos presentados anteriormente. A pesar de que la Eq (3) no se encuentre normada por la Norma Técnica Ecuatoriana esta funciona de mejor que la Eq (4) si se considera el valor experimental como real y el teórico como un valor a evaluar se aprecia que el error disminuye un 2%.

Tabla 5. Resultados de Ec experimentales y del código ACI 318-19 usando la Eq (3) para cada tipo de mezcla.

Resistencia a la compresión (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)			
	ASTM C469 – 64		ACI 318 - 19 Eq (3)	
	Experimental		Teórico	
	Tipo I	Tipo II	Tipo I	Tipo II
21	17.89	21.69	23.52	24.34
28	21.87	24.19	27.36	28.14

La Figura 9 muestra líneas entrecortadas que representan el comportamiento de los testigos de roca ensayados ante carga de compresión sin confinamiento y la línea continua identifica el

promedio tomado para la determinación del módulo elástico de los agregados (E_a).

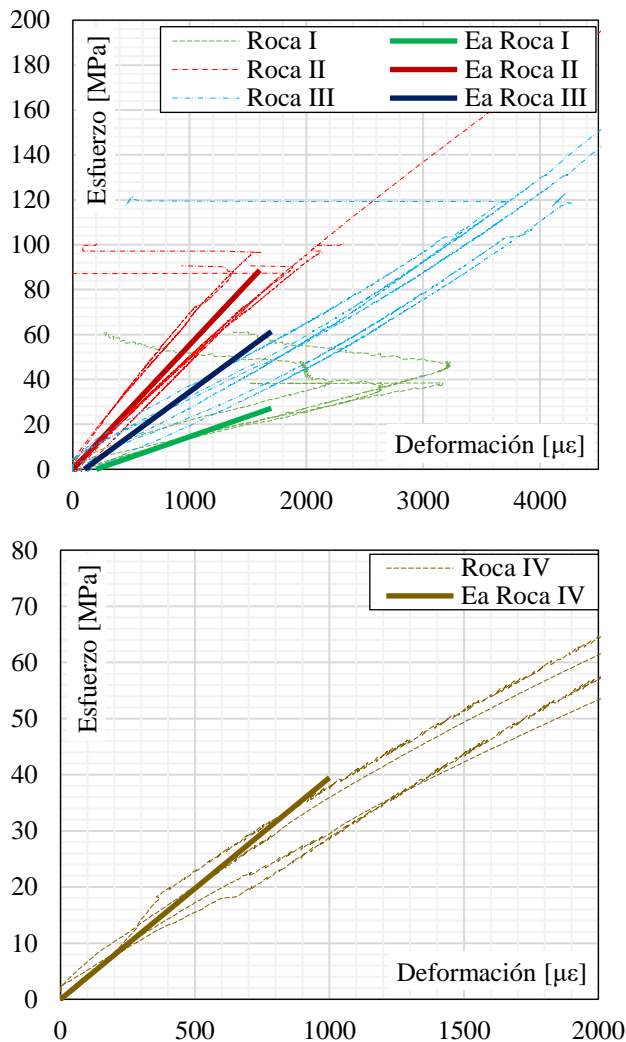


Figura 9. Resultados del ensayo realizado a los testigos de Roca para el cálculo del (E_a).

El máximo CV medido para los testigos de roca de los agregados Tipo I son inferiores al 18% y para el Tipo II es del 6%, para el cálculo individual del módulo de elasticidad de los agregados se lo realiza mediante el método (B) [28] correspondiente al módulo promedio medido en un punto lineal de la curva esfuerzo – deformación.

El comportamiento de la mayoría de los testigos puede ser considerados como materiales casi-elásticos debido a que su deformación no es lineal, pero decrece logarítmicamente.

Con el fin de cuantificar el valor del módulo de elasticidad para el agregado Tipo I, se lavó,

clasifico y peso los agregados de un total de 6 cilindros tres por cada diseño de la mezcla, para determinar ese valor mediante una ponderada, a este valor se lo denomina como módulo elástico equivalente de los agregados.

Tabla 6. Estimación del E_a para el material Tipo I

Roca	Tipo I 21MPa		
	Volumen [%]	$E_a i$ [MPa]	\bar{E}_a [GPa]
Roca I	60.9	18123	11.03
Roca II	14.9	55385	8.24
Roca III	24.3	38331	9.30
Ea Equivalente			28.57

Roca	Tipo I 28MPa		
	Volumen [%]	$E_a i$ [MPa]	\bar{E}_a [GPa]
Roca I	53.2	18123	9.95
Roca II	16.1	55385	8.89
Roca III	28.9	38331	11.09
Ea Equivalente			29.64

Para la aplicación de la Eq (1) se trabaja con el promedio de E_a Equivalentes, de esta forma se caracteriza al material tipo I con un E_a de 29.10GPa este valor mantiene un CV de 3%.

El agregado Tipo II en su mayoría se formaba por andesitas por lo que se extrajo únicamente 3 testigos de roca, los cuales fueron de diferentes rocas el valor medio obtenido es de 31.64 GPa valor de con un CV del 6% por lo tanto el E_a es aceptable.

El error obtenido utilizando la Eq (2) en relación con el E_a del ensayo difieren en un 8%, en la Tabla 7 se presentan ecuaciones que relacionan el E_c directamente con la resistencia característica del hormigón, los factores siguen siendo bajos en relación al factor de 4.7 presentado en la NEC-SE-HM [9].

Tabla 7. Ecuaciones propuestas para cada material.

Resistencia a la Compresión (MPa)	Tipo I	Tipo II
21	$E_c = 3,522\sqrt{f'_c}$	$E_c = 4,034\sqrt{f'_c}$
28	$E_c = 3,647\sqrt{f'_c}$	$E_c = 4,032\sqrt{f'_c}$

Dentro de la Figura 10 se representan las ecuaciones 1, 3 y 4 así también los puntos medios de f'_c y E_c para la resistencia de cada mezcla.

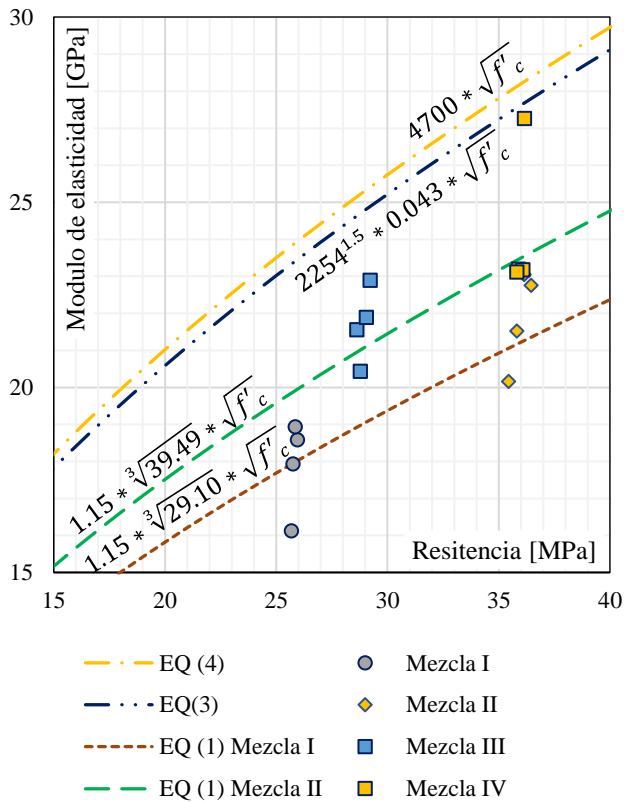


Figura 10. Representación de las Ecuaciones normadas y valores obtenidos de los ensayos.

La Figura 11 presenta la correlación que existe entre los factores de módulo de elasticidad y el porcentaje de abrasión, estos valores han sido obtenidos de diferentes tesis, ensayos y publicaciones, con el fin de aportar una gran diversidad de datos, su coeficiente de correlación (r^2) determinada por la regresión lineal, por la validez de los ensayos y mas no por su naturaleza se lo considera cómo un coeficiente alto.

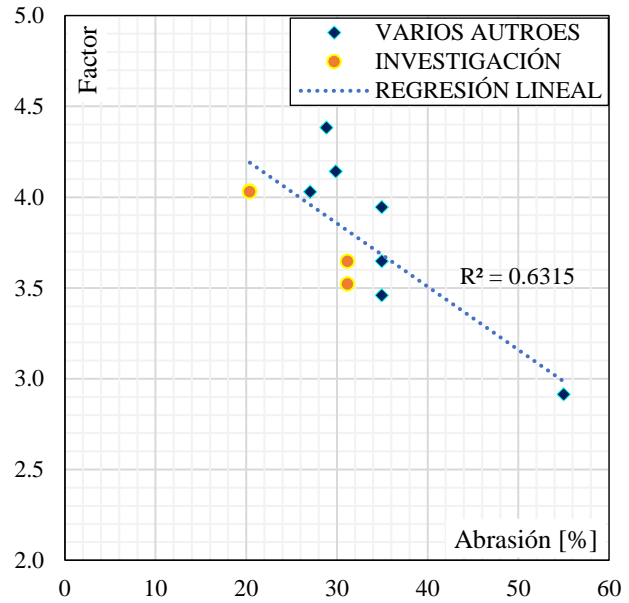


Figura 11. Relación Abrasión vs Factor.

En la Tabla 8 se describen todos los resultados obtenidos en ensayos y cálculos, el error obtenido con la Eq (1) con los E_a propuesto es menor al 3%.

Tabla 8. Resultados de E_c experimental y de la NEC-SE-HM empleando la Eq (1) y el código ACI 318-19 usando la Eq (3), (4) para cada tipo de mezclas.

	Módulo de Elasticidad (GPa)			
	Mezcla I	Mezcla II	Mezcla III	Mezcla IV
f'_c (MPa)	25.81	35.97	28.92	35.99
E_a (GPa)	29.1	29.1	39.49	39.49
E_c Experimental	17.89	21.69	21.87	24.19
E_c Eq(1)	17.97	21.21	21.06	23.49
E_c Eq (3)	23.52	27.36	24.34	28.14
E_c Eq (4)	23.88	28.19	25.27	28.20

4. Conclusiones

De los ensayos realizados se concluye que:

El módulo de elasticidad medio de los agregados correspondientes a la mina de Tipo I (Mulaló) y Tipo II (Guayllabamba) tienen un valor

de 29.10GPa y 39.49GPa respectivamente. Esto influye directamente en el módulo de elasticidad de los hormigones, donde aquellos hormigones que contienen agregado tipo I presentan más módulo de elasticidad que los hormigones que contienen agregados tipo II.

Los valores de módulo de elasticidad del hormigón obtenidos de los ensayos para hormigones son muy cercanos a los obtenidos con la ecuación propuesta en la NEC-SE-HM $E_c = 1,15 * \sqrt[3]{E_a} * \sqrt{f'_c}$ obteniendo donde incluyen como base el módulo de elasticidad de los agregados obteniéndose errores de 2% en promedio. Por otra parte, si se compara los resultados experimentales de módulo de elasticidad de los hormigones con la ecuación $E_c = 4.7\sqrt{f'_c}$ los errores aumentan al 24%. Estos valores permiten validar la efectividad de la ecuación $E_c = 1,15 * \sqrt[3]{E_a} * \sqrt{f'_c}$ para predecir correctamente los módulos de elasticidad de hormigones ecuatorianos.

La regresión lineal presentada con los datos obtenidos de algunas tesis, así también como los determinados en la presente investigados demuestran una relación entre el módulo de elasticidad del hormigón y el porcentaje de abrasión del agregado grueso, siendo este indirectamente proporcional.

Referencias

- [1] J. Carvajal, “Módulo estático de elasticidad del hormigón en base a su resistencia a la compresión ($f'_c = 21$ MPa), fabricado con materiales de la mina san ramón, ubicada en la parroquia de Mulaló en la provincia de Cotopaxi y cemento Chimborazo.” Proyecto de titulación, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2013.
- [2] C. Alvaro, “Clasificación de Roca Intacta,” Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, 1992.
- [3] M. Paucar and L. Sacasari, “Caracterización del módulo estático de elasticidad del hormigón a partir de pruebas a compresión simple en probetas cilíndricas con diferentes agregados del cantón Quito, provincia de Pichincha.” Proyecto de titulación, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2017.
- [4] E. Morales, O. Cueva, R. Narváez, and R. Benavides, “Módulo estático de elasticidad del hormigón, en base a su resistencia a la compresión: $f'_c = 21$ y 28 MPa, fabricado con materiales de la mina de Guayllabamba-Pichincha y cemento Selva Alegre.” Proyecto de titulación, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2012.
- [5] ACI 318-19, “Requisito de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318-19),” Junio, 2019.
- [6] H. Xavier and A. Cabrera, “Módulo de elasticidad de hormigones de peso normal empleados en el Ecuador f'_c : 21, 24, 28, 35 MPa.” Proyecto de titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2014.
- [7] A. Gonzalo, “Módulo estático de elasticidad del hormigón en base a su resistencia a la compresión ($f'_c = 28$ MPa), fabricado con materiales de la mina san ramón, ubicada en la parroquia de Mulaló en la provincia de Cotopaxi y cemento Chimborazo.” Proyecto de titulación, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2013.
- [8] B. Rivadeneira, “Módulo estático de elasticidad del hormigón en base a su resistencia a la compresión ($f'_c = 24$ MPa), fabricado con materiales de la mina san ramón, ubicado en la parroquia de Mulaló en la provincia de Cotopaxi y cemento Chimborazo.” Proyecto de titulación, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2013.
- [9] NEC-SE-HM, “Estructuras de hormigón armado,” Norma Técnica Ecuatoriana, Quito, 2015.
- [10] P. Idrovo and L. Quintanilla, “Aplicación de galgas extensiométricas en el laboratorio de mecánica de materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica para la obtención de deformaciones en elementos sometidos a cargas combinadas,” Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca, 2010.
- [11] María Fernanda Serrano-Guzmán and Diego Darío Pérez-Ruiz, “Análisis De Sensibilidad Para Estimar el Módulo De Elasticidad Estático del Concreto,” *Concreto y Cem. Investig. y Desarro.*, vol. 2, no. 1, pp. 17–30, 2010, [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112010000100002&lng=es&nrm=iso&tlng=es.
- [12] D. Kocab, B. Kucharczykova, P. Misak, P. Zitt, and M. Kralikova, “Development of the Elastic Modulus of Concrete under Different Curing Conditions,” *Procedia Eng.*, vol. 195, pp. 96–101, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.529.
- [13] NTE INEN 490, “Cementos hidráulicos compuestos. Requisitos,” 2011.
- [14] ASTM C 595-08, “Standard Specification for Blended Hydraulic Cements,” American Society for Testing and Materials, 2008.
- [15] E. Arequipa, W. Coba, D. Garzon, and L. Vargas, “Modulo estatico de elasticidad del hormigon en base a su resistencia a la compresion simple $F'_c = 21$ MPa y 30

- MPa,” Proyecto de titulación, Universidad Central del Ecuador, 2012.
- [16] Asocreto, *Tecnología del Concreto*. Asociación Colombiana de Productores de Concreto, Bogotá, 2010.
- [17] NTE INEN 696, “Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso.” Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, 2011.
- [18] NTE INEN 872, “Áridos Para Hormigón. Requisitos.” Intituto Ecuatoriano de Normalizacion, Quito, 2011.
- [19] NTE INEN 860, “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.” Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, 2011.
- [20] NTE INEN 857, “Áridos. Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Especifica) y Absorción del árido grueso.” Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, 2010.
- [21] NTE INEN 856, “Áridos. Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del árido fino.” Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, 2010.
- [22] NTE INEN 858, “Áridos, Determinación de la Masa Unitaria (Peso Volumetrico) y el Porcentaje de Vacíos,” Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, 2010.
- [23] NTE INEN 862, “Aridos para Hormigón, Determinacion del Contenido Total de Humedad,” Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, 2011.
- [24] NTE INEN 855, “Áridos. Determinación de las impurezas orgánicas en el árido fino para hormigón.” Quito, 2010.
- [25] NTE INEN 1578, “Determinación del asentamiento, cemento hidráulico.” Quito, 2010.
- [26] ASTM C33/C33M – 18, “Standard Specification for Concrete Aggregates,” United States, 2018.
- [27] ASTM D4543-85, “Standard Practice for Preparing Rock Core Specimens and Determining,” American Society for Testing and Materials, United States, 1991.
- [28] ASTM D 3148 - 02, “Standard method of test for elastic moduli of rock core specimens in uniaxial compression,” American Society for Testing and Materials, United States, 2002.
- [29] NTE INEN 3124, “Hormigón. Elaboración y curado de especímenes de ensayo de laboratorio,” Quito, 2017.
- [30] ASTM C469-02, “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression,” American Society for Testing and Materials, United States, 2002.