

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Estudio de la relación entre la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad estático para hormigones fabricados con cemento por desempeño y compuesto en el Ecuador

Omar Martí Osejo Mora

Ingeniería Civil

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, 11 de mayo del 2020

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

Estudio de la relación entre la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad estático para hormigones fabricados con cemento por desempeño y compuesto en el Ecuador

Omar Martí Osejo Mora

Nombre del profesor, Título académico

Juan José Recalde, Ph. D

Quito, 11 de mayo del 2020

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y apellidos: Omar Martí Osejo Mora

Código: 00123983

Cédula de identidad: 1721711396

Lugar y fecha: 11, mayo del 2020

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

El hormigón es un material de gran importancia para el campo de la construcción, así que es de suma importancia conocer las propiedades mecánicas de este mismo. El módulo de elasticidad es un determinante para el diseño y la construcción en hormigón armado y la Norma Ecuatoriana de la Construcción ha tomado la aproximación del módulo de elasticidad estático del ACI. Esta propiedad depende de diferentes factores como el material que se utilice, el cemento, entre otros, entonces no significa que la aproximación propuesta en el ACI sea la mejor opción para el Ecuador. En este trabajo se recopila información de diversas fuentes que haya realizado ensayos del módulo de elasticidad estático, además que se realiza dosificaciones para aumentar la información y a través de un modelo matemático dar una mejor aproximación para Ecuador en base a materiales locales. Uno de los resultados más notables es que la aproximación dada por el ACI-318 sobre estima el módulo de elasticidad estático del concreto ecuatoriano.

Palabras clave: hormigón, concreto, módulo de elasticidad estático, hormigón Ecuatoriano, propiedades mecánicas del hormigón.

ABSTRACT

Concrete is a material of great importance for the construction field, so it is essential to know its mechanical properties. The elasticity modulus is a determinant characteristic for the design and construction of the reinforced concrete, according to the “Norma Ecuatoriana de la Construcción” and its approximation of the static modulus of elasticity of the ACI. This feature depends on several factors such as: the material used, cement, among others. Therefore, it does not mean that the approach proposed in the ACI is the best option for Ecuador. In this study, information is collected from various sources that have carried out tests of the static elasticity module. In addition, we have applied dosifications to increase the information through a mathematical model to give a better approximation for Ecuador (based on local materials). One of the most notable results is the approximation given by ACI-318 on the estimation of the static modulus of elasticity of Ecuadorian concrete.

Key words: concrete, static modulus of elasticity, Ecuadorian concrete, mechanical properties of concrete.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. Antecedentes	10
1.2. Justificación	12
1.3. Objetivos	13
1.4. Actividades	13
1.5. Resultados esperados	14
1.6. Definiciones	14
2. DESARROLLO DEL TEMA	15
2.1. Revisión de literatura	15
2.1.1. Resistencia a compresión	15
2.1.2. Módulo de elasticidad	16
2.1.3. Estimación E_c	19
2.1.4. Aproximaciones	19
2.1.5. Determinación del módulo de elasticidad de manera experimental	20
2.1.6. Estudios previos	22
2.2. Recopilación de información	23
2.3. Fase experimental	25
2.3.1. Plan Experimental	25
2.3.2. Metodología (Materiales y Métodos)	26
2.3.3. Resultados	28
2.4. Análisis	33
2.4.1. Relación de la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad estático. ...	33
3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
3.1. Conclusiones de resultados	36
3.2. Recomendaciones	36
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
ANEXO A: INFORMACIÓN RECOPIADA	40
ANEXO B: DOSIFICACIONES Y ENSAYOS	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Recopilación de datos de resistencia a compresión y módulo de elasticidad estático	24
Tabla 2 Dosificación para mezcla MB.....	27
Tabla 3 Dosificación para mezcla MM.....	27
Tabla 4 Resultados de pruebas para el hormigón en estado fresco de la mezcla MM.	28
Tabla 5 Resultados de pruebas para el hormigón en estado fresco de la mezcla MM*.	28
Tabla 6 Resistencia a compresión de la mezcla MB a los 46 días.....	29
Tabla 7 Resistencia a compresión de la mezcla MM a los 42 días.....	29
Tabla 8 Dosificación para mezcla MM*	29
Tabla 9 Resistencia a compresión de la mezcla MM* a los 14 días.....	30
Tabla 10 Módulo de elasticidad estático de la mezcla MB ensayado a los 46 días.....	30
Tabla 11 Módulo de elasticidad estático de la mezcla MM ensayado a los 42 días.....	30
Tabla 12 Módulo de elasticidad estático de la mezcla MM* ensayado a los 14 días.....	31
Tabla 13 Resistencia a la compresión y Módulo de elasticidad estático.	31
Tabla 14 Tabla actualizada	32
Tabla 15 Estimación del módulo de elasticidad estático	33
Tabla 16 Regresión lineal	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Cemento hidráulico Tipo GU	12
Figura 2 Curva Esfuerzo vs Deformación con distinta relación de agua/cemento.	16
Figura 3 Módulo secante, Módulo Tangente inicial, Módulo Tangente.....	17
Figura 4 Módulo de cuerda	18
Figura 5 Compresómetro..	20
Figura 6 Deflexión..	21
Figura 7 Método para Determinar el Módulo de Elasticidad Cuerda	22
Figura 8 Regresión lineal	33
Figura 9 ACI318 vs ACI363 vs 3500raiz(fc)	34
Figura 10 Comparación de módulo de elasticidad estático	34

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Desde la prehistoria el hombre ha buscado un lugar en el cual se pueda refugiar y la construcción es una de las actividades más viejas para el ser humano. La construcción está vinculada al desarrollo de una sociedad, tanto social como económica. La misma permite realizar hospitales, escuelas, lugares de comercio, entre otros. El objetivo de la construcción desde un inicio ha sido saciar una demanda o necesidad de la comunidad de la manera más efectiva.

En la construcción, uno de los materiales más usados es el hormigón. Muchas personas han de pensar que el hormigón se ha venido desarrollando durante un largo tiempo, sin embargo, es relativamente nuevo. Uno de los primeros acercamientos es con la elaboración de una clase de mortero en Grecia donde se mezcló cal y arena. Luego Roma adaptó esta receta y le agregó el material puzolanas, con esto se elabora el Panteón y el Coliseo, estructuras que en la actualidad siguen en pie, a pesar que se trató de difundir este material por toda Roma a causa de su decadencia su uso se limitó.

A partir del siglo XVII se desarrolla en gran medida el cemento. John Smeaton reconoce la técnica Romana y construye un faro, el cual es la primera estructura de concreto desde la Roma antigua. Además, se patenta el cemento romano por James Parker, el cual consistía en agregar agua a la combinación de una mezcla natural de cal y silicato de aluminio. Se patenta el cemento Portland por el inglés llamado Joseph Aspidin, un cemento artificial el cual era la combinación de arcilla y piedra caliza de grano fino cuya procedencia era de la isla de Portland. Se obtuvo un modelo de cemento moderno, la formación del Clinker gracias a Isaac Johnson y se obtuvo el cemento hidráulico. Joseph Louis Lambot expuso un bote elaborado de concreto y de hierro en la exposición mundial de París en 1855. Se publica el libro “Los concretos

aglomerados aplicados al arte de construir” donde habla de usos del hormigón para construcciones. Se patentó un sistema de entresijos a William Boutland Wilkinson que utiliza hormigón y refuerzos metálicos, con esta técnica se construyó una casa de dos pisos. En 1867 se patentó el concreto reforzado por Joseph Monier, a quien se le conoce como su inventor. A pesar que Monier no era el único con esta idea, fue el que mejor la vendió (Lamus & Andrade, 2015, págs. 13-15).

El concreto es un material equivalente a una piedra que se lo obtiene mezclando de forma cuidadosa y proporcionada de agua, cemento, áridos y en algunos casos aditivos donde luego se endurecerá con la forma y dimensiones de donde lo vertamos. Los agregados estarán unidos por una pasta que se forma por una reacción química entre el cemento y el agua dando como resultado una masa sólida. Si se ajusta las cantidades de los materiales que constituyen el hormigón se puede obtener concretos con diferentes propiedades (Nilson, 1999, pág. 1). Una de las principales características del hormigón es su resistencia a la compresión y dependiendo de la obra civil se esperará una resistencia a compresión mínima. Para que el concreto pueda desarrollar su resistencia dependerá de algunos factores, como la edad, calidad y proporciones de los materiales que lo conforman, la elaboración y el manejo que se le dé al hormigón en estado fresco y el cuidado una vez endurecido (Rochel, 2007).

La resistencia del hormigón se verá influenciado a gran medida por los siguientes factores: cemento, agua, agregados, relación agua/cemento, colocación y compactación, curado y la edad (Rochel, 2007). Para el cemento se encuentra algunos tipos, como Portland, por desempeño o compuestos. Gran proporción de estudios como el del curado del concreto están basados en el uso del cemento Portland. A diferencia del cemento Portland, el cemento por desempeño o compuesto tienen materiales cementantes suplementarios como, arenas, calizas, escorias de altos hornos, cenizas entre otros. Usualmente los materiales cementantes suplementarios se tardan más en reaccionar con el agua (De La Cruz Alta, 2018, págs. 13-14).

Escoria de altos hornos, cenizas entre otros.



Figura 1: Cemento hidráulico Tipo GU

El conocimiento de las propiedades mecánicas del hormigón es de suma importancia para el campo del diseño. Estas propiedades serán: resistencia a la tracción, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, resistencia a la Flexión y resistencia al corte (Rochel, 2007, pág. 29).

1.2. Justificación

El hormigón hoy en día es el material que tiene mayor demanda en el sector de la construcción. Basado en estudios realizados por el INEC el material que más se utiliza para construcción de viviendas, locales comerciales e industriales, clínicas, edificios, entre otros, es el hormigón armado. La encuesta realizada para proporcionar esta información proviene de la encuesta de edificaciones 2017 (Permisos de construcción) (INEC, 2018, pág. 15). Además, esta información se la puede corroborar sin necesidad de ver tablas comparativas de los materiales ya que día a día se ve las grandes obras hechas por este material en nuestra vida diaria.

El módulo de elasticidad es una propiedad mecánica de los materiales. En el hormigón esta propiedad dependerá de ciertos factores como, la dosificación o los elementos empleados, tales como tipo de cemento, agregados, aditivos entre otros. Este estudio pretende ampliar la

información sobre esta propiedad tomando en cuenta materiales provenientes de la zona. En el mercado ecuatoriano se encuentra el cemento por desempeño o compuesto, mas no el cemento portland.

Es de importancia resaltar que en el Ecuador se utiliza ecuaciones y valores que se han obtenido en otros medios. La NEC proporciona la misma fórmula para determinar el módulo de elasticidad que el ACI-318-14, el cual está basado en estudios realizados en Estados Unidos y no necesariamente sea completamente apropiada para el Ecuador porque dichas ecuaciones provienen de investigaciones con sus propios materiales y no necesariamente van a tener el mismo comportamiento para los hormigones elaborados en nuestro país.

Es importante el módulo de elasticidad del hormigón para el diseño y análisis del hormigón armado y pretensado. Un mejor conocimiento del concreto en sus propiedades mecánicas permitirá realizar diseños y construcciones más económicas, seguras y se podrá evitar posibles accidentes en construcciones más complejas.

1.3. Objetivos

- Estudiar la relación empírica entre la resistencia a la compresión (f_c) y el módulo de elasticidad estático (E_c) de hormigones fabricados con cementos por desempeño y compuestos en el Ecuador.
- Validar si la fórmula para estimar (E_c) del ACI 318-14 es aplicable para hormigones convencionales ecuatorianos.

1.4. Actividades

- Recopilar datos de f_c y E_c existentes (Lab. Materiales y otros).
- En base a datos recopilados, realizar un plan de mezclas para completar datos de f_c y E_c .

1.5. Resultados esperados

- Base de datos de información recopilado (f_c y E_c existentes).
- Datos de ensayos de f_c y E_c de especímenes fabricados.
- Gráfico y análisis estadístico de la relación f_c - E_c .

1.6. Definiciones

- E_c = Módulo de elasticidad del concreto [MPa]
- w_c = Densidad del concreto [kg/m³]
- f'_c = Resistencia especificada a la compresión del concreto [MPa]
- E_d = Módulo dinámico de elasticidad

2. DESARROLLO DEL TEMA

2.1. Revisión de literatura

2.1.1 Resistencia a compresión

Una característica importante del hormigón ya endurecido es su alta resistencia a la compresión, su resistencia es semejante a la de las piedras naturales (Nilson, 1999, pág. 1). Es la capacidad del material para soportar una carga por unidad de área, la cual es expresada en términos de esfuerzo (MPa, kg/cm², lb/in²). Dependiendo del objetivo del hormigón se realizará un concreto con una resistencia específica, donde hasta 50MPa se considera hormigón normal y hasta 100MPa hormigón de alta resistencia.

La resistencia del hormigón se verá afectada por algunos factores como, el tipo y la cantidad del cemento, agua, relación agua-cemento, el agregado (distribución granulométrica, forma, textura, rigidez, resistencia, dosificación, absorción), tamaño máximo del agregado, colocación y compactación curado del concreto, edad del hormigón entre otros (Rochel, 2007, págs. 16-27). Esta propiedad física del concreto es importante para fines estructurales porque a partir del conocimiento de la resistencia se puede realizar cálculos para el diseño de infraestructuras como edificios, casas, puentes, muros entre otros.

Para obtener la resistencia del hormigón se realizan ensayos en probetas normalizadas cilíndricas las cuales estarán sometidas a fuerzas de compresión, todo lo necesario para este ensayo lo proporciona la ASTM C39/C39M-18. Para realizar los ensayos de compresión, es necesario obtener una muestra siguiendo la norma ASTM 172. La siguiente figura representa diferentes curvas esfuerzo-deformación obtenidas a partir de los ensayos de compresión con cilindros estándar a los 28 días.

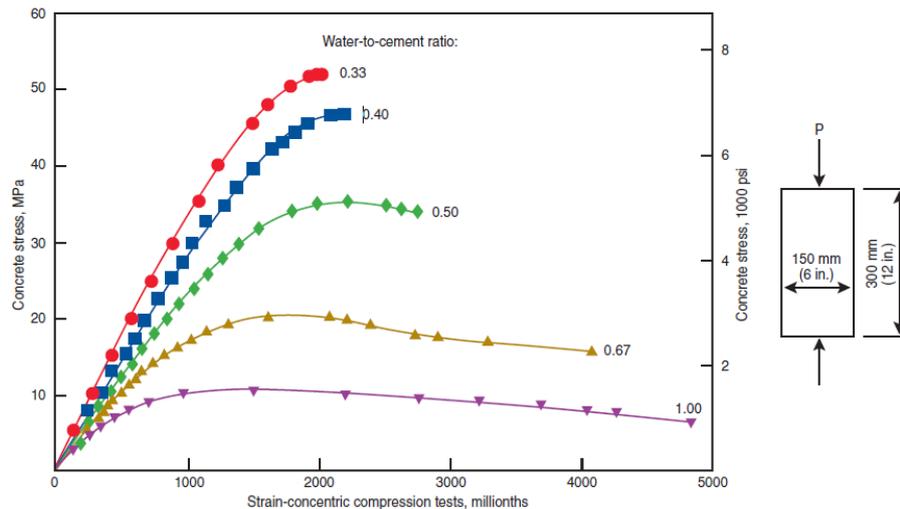


Fig. 15-22. Stress-strain curves for compression tests on 150 × 300-mm (6 × 12-in.) concrete cylinders at an age of 28 days (Hognestad, Hanson, and McHenry 1955).

Figura 2: Curva Esfuerzo vs Deformación con distinta relación de agua/cemento. Kosmatka, Kerkhoff, & Panarese (2002).

A partir de la figura 2 se puede denotar puntos importantes como:

1. Las curvas tienen un comportamiento similar a una recta desde 0 hasta aproximadamente un tercio de la resistencia última del concreto, a partir de esto no tiene un comportamiento lineal y adopta una configuración parabólica.
2. El hormigón independiente de la resistencia alcanza su resistencia ultima aproximadamente con la deformación unitaria de 0.002.

2.1.2. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad de un material es una medida de rigidez o la resistencia para ser deformado. El valor del módulo de elasticidad dependerá de las propiedades de los agregados, el cemento, la resistencia del hormigón, la edad, tamaño y forma de las probetas y velocidad a la cual se le aplica la carga (Rochel, 2007, p. 33). El concreto no es realmente un material elástico. La curva esfuerzo-deformación del hormigón no presenta un comportamiento lineal, sin embargo, se han dividido en diferentes tipos de módulos de elasticidad a partir de la curva esfuerzo-deformación:

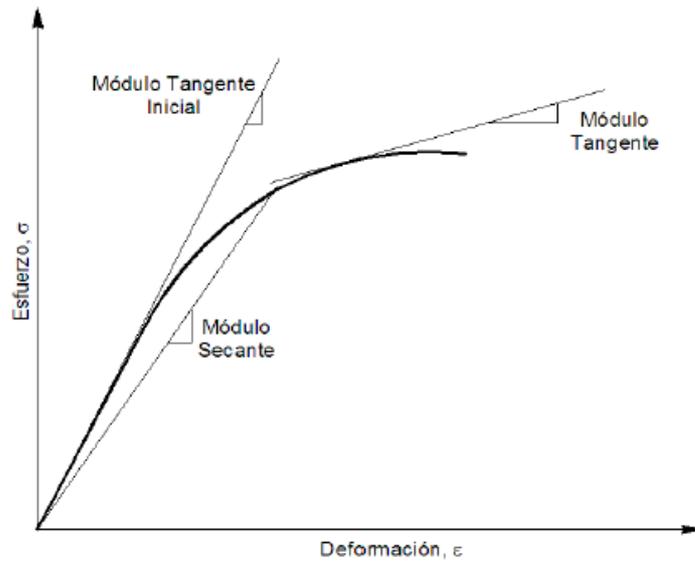


Figura 3 Módulo secante, Módulo Tangente inicial, Módulo Tangente. Rivadeneira Robalino (2013).

2.1.2.1. Módulo tangente inicial

Pendiente de una línea, la cual es tangente a la curva de esfuerzo-deformación desde el origen. En algunos gráficos se la aprecia como la pendiente de la línea recta del gráfico esfuerzo-deformación (Neville, 2011).

2.1.2.2. Módulo Acorde

Pendiente de una línea dibujada, la cual se conecta entre dos puntos en la curva esfuerzo-deformación (Natarara, pág. 3).

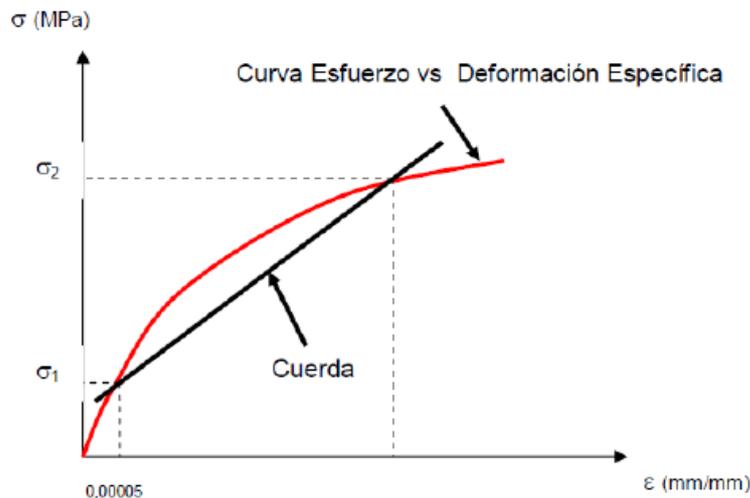


Figura 4 Módulo Cuerda. Cabrera (2014).

2.1.2.3. Módulo Secante

Pendiente que se forma en la línea trazada entre el origen de los ejes a un porcentaje de la resistencia final de la curva esfuerzo-deformación. Este módulo se lo considera estático porque se lo determina por medio de la relación esfuerzo-deformación experimental a partir de ensayos de cilindros a diferencia del módulo dinámico (Neville, 2011, pág. 414).

2.1.2.4. Módulo Tangente.

Pendiente de una línea trazada la cual es tangencial a la curva esfuerzo-deformación. Dicha línea puede estar tangencialmente a cualquier punto de esta curva (Natarara).

2.1.2.5. Módulo Dinámico

El módulo de elasticidad dinámico (E_d) representa las deformaciones unitarias instantáneas las cuales son muy pequeñas. Para determinarlo se realice un ensayo de pruebas sónicas. Es aproximado al módulo inicial tangencial y es un 20% a 40 % superior al módulo de elasticidad estático. Este módulo es adecuado utilizarlo cuando a una estructura se la analiza por cargas sísmicas o impacto (McCormac & Brown, pág. 13).

2.1.3. Estimación E_c

Opción 1:

$$\sigma = \frac{E\varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2}$$

$\varepsilon = \text{strain (deformacion)}$

$\sigma = \text{stress (esfuerzo)}$

$\varepsilon_0 = \text{strain at maximum stress}$

$E = \text{initial tangent modulus, assumed to be twice the secant modulus at maximum stress}$

$$E = \frac{2\sigma_{max}}{\varepsilon_0}$$

Sacado del libro de A.M. NEVILLE

2.1.4. Aproximaciones

2.1.4.1. ACI 318 -14:

En el capítulo 19, sección 19.2.2 del ACI 318-14 provee dos opciones para el cálculo del módulo de elasticidad.

La primera opción es $E_c = w_c^{1.5} 0.043 \sqrt{f'c}$ en MPa donde w_c está entre 1440 y 2560 kg/m³.

Para hormigones de peso normal se tiene $E_c = 4700 \sqrt{f'c}$ (MPa). En ambos casos $f'c$ es el esfuerzo a compresión del concreto.

2.1.4.2. State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete:

En el capítulo 6 y la sección 6.3 del ACI 363R-10 se provee algunas estimaciones para el módulo de elasticidad estático, por ejemplo:

1. $E_c = 3320 \sqrt{f'c} + 6900$ [MPa] donde; $21 \text{ MPa} < f'c < 83 \text{ MPa}$.
2. $E_c = 3.385 \times 10^{-5} w_c^{2.55} (f'c)^{0.315}$
3. $E_c = 3.385 \times 10^{-5} w_c^{2.5} (f'c)^{0.325}$ (MPa) para $f'c < 84 \text{ MPa}$

2.1.5. Determinación del módulo de elasticidad de manera experimental

Para la determinación del módulo de elasticidad del hormigón se usa la Norma ASTM C 469-14. Se utiliza una maquina denominada compresómetro la cual permitirá medir deformaciones con una aproximación de 5 millonésimas.

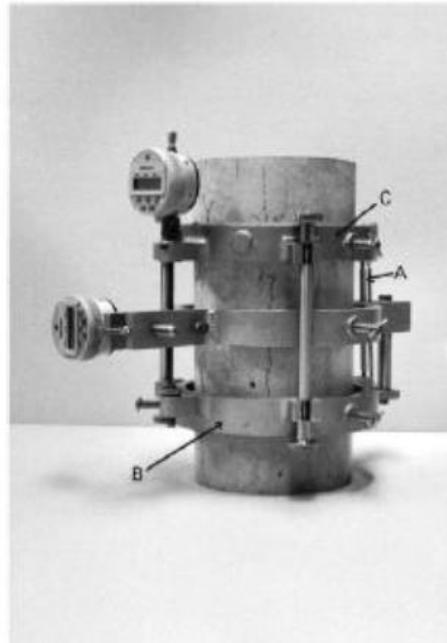


Figura 5 Compresómetro. ASTM C 469-14 (2014).

Consistirá en dos anillos que se colocaran alrededor del cilindro, uno en la parte superior y otro en la parte inferior. El anillo inferior estará fijado rígidamente al espécimen, mientras que el superior tendrá la opción de rotar. En el lado lateral habrá un pivote el cual no sufrirá ningún desplazamiento lo que mantendrá una distancia constante entre los anillos, mientras que en el lado opuesto no existirá ninguna restricción. Al momento de ensayar el espécimen se tendrá lo siguiente:

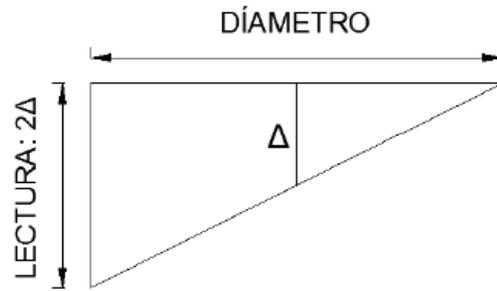


Figura 6 Deflexión. Cabrera (2014).

Donde:

ε : Deformación específica

Δ : Deformación al eje axial

L: Longitud =150mm

Cálculos

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{L}$$

$$\Delta = \frac{\text{Lectura}}{2}$$

$$\varepsilon = \frac{\text{Lectura} \times 1.0 \times 10^{-3} \text{ mm}}{2 \times L}$$

La lectura será la suma de la deformación por compresión más la deformación debido a la rotación. Para la obtención de la deflexión en el eje del cilindro se tendrá que esta deflexión será igual a dos veces la lectura obtenida.

Se encontrará la pendiente producida por una línea que pase por dos puntos en la curva esfuerzo vs deformación, tal como se muestra en la siguiente figura:

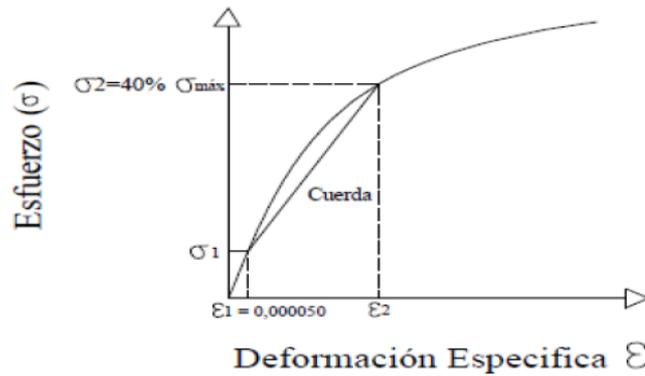


Figura 7 Método para Determinar el Módulo de Elasticidad Cuerda. Rivadeneira Robalino (2013).

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.000050}$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad cuerda [MPa]

σ_2 = Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga ultima [MPa]

σ_1 = Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal, ε_1 , de 50 millonésimas [MPa]

ε_2 = Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo σ_2 , en millonésimas [μm]

2.1.6. Estudios previos

2.1.6.1. “Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density By ADRIAN PAUW (Pauw, 1960, pág. 1)”

El siguiente estudio fue elaborado por Adrian Pauw y se basa en el estudio del módulo de elasticidad para diferentes agregados y resistencias del hormigón. En esta investigación se obtuvo una fórmula empírica que se la puede aplicar tanto a los hormigones de peso normal como a los ligeros y se afirma que el módulo de elasticidad estático depende del peso del hormigón y el método para obtenerlo que la resistencia de este mismo. La fórmula empírica que obtuvo es la siguiente: $E_c = w_c^{1.5} 33 \sqrt{f'c}$ (Pauw, 1960).

2.1.6.2. “STRENGTH, MODULUS OF ELASTICITY, CREEP AND SHRINKAGE OF CONCRETE USED IN FLORIDA (Haranki, 2009, pág. 1)”.

El presente estudio lo realizo Boris Haranki de la Universidad de Florida. En dicho documento se estudia la resistencia, módulo de elasticidad estático, el shrinkage y el creep del concreto en base a material de la zona. A partir de este estudio se obtiene algunas fórmulas empíricas para determinar el módulo de elasticidad en la zona local. Uno de los resultados es el siguiente $E_C = 63351\sqrt{f'c}$ (Haranki, 2009).

2.1.6.3. ‘Módulo estático de elasticidad del hormigón en base a su resistencia a la compresión (fc=24 MPa). Fabricado con materiales de la mina San Ramón, ubicado en la parroquia de Mulalo en la provincia de Cotopaxi y cemento Chimborazo (Rivadeneira Robalino, 2013)’

El siguiente estudio se realizo por parte de Byron Patricio Rivadeneira Robalino. Se investiga sobre el módulo de elasticidad del hormigon con un $f_c = 24$ MPa. Para este concreto se utilizo un cemento Chimborazo y materiales de la mina San Ramon. Se obtuvo el siguiente resultado a partir de los materiales mencionados : $E_C = 3470 * \sqrt{f'c}$ (MPa) (Rivadeneira Robalino, 2013).

2.2. Recopilación de información

Se recopilará datos de la resistencia a compresión y del módulo de elasticidad estático con 28 o más días de diferentes fuentes para tener mayor información y tener una mejor estimación del módulo de elasticidad estático. En la siguiente tabla se presentará los diferentes datos que se encontraron a partir de diversas fuentes, como Universidad San Francisco de Quito, Universidad Central del Ecuador, Escuela Politécnica Nacional, Escuela del Ejercito. Cada valor presente en la tabla está reportado siguiendo su respectiva norma.

Tabla 1 Recopilación de datos de resistencia a compresión y módulo de elasticidad estático

Mezcla	fc	Ec	Cemento	Fuente	
	MPa	GPa	Tipo IP		
M3	56,1	22,0	Tipo IP	Zhindón Salinas, A. M. (2018). <i>Cuantificación del deterioro de hormigones convencionales por carga</i> . Proyecto de investigación, Universidad San Francisco de Quito, Quito.	
M4	37,5	16,4	Tipo IP		
M5	32,9	16,6	Tipo IP		
G28180	54,0	24,0	Tipo GU	De La Cruz Alta, H. P. (2018). <i>Efectos del curado en las propiedades mecánicas</i> . Trabajo de titulación, Universidad San Francisco de Quito, Quito.	
21H	30,4	20,0	Tipo GU	Herrería Cisneros, S. E., & Villegas Dávila, F. M. (2008). <i>Módulos de elasticidad y curvas de esfuerzo deformación, en base a la compresión del hormigon a 21, 28, 35 MPa</i> . tesis de pregrado, Escuela Politécnica del ejército, Quito.	
21HS	31,5	20,4	Tipo GU		
21SA	30,8	20,0	Tipo IP		
21SAS	31,6	20,0	Tipo IP		
28H	30,6	20,0	Tipo GU		
28HS	31,1	21,0	Tipo GU		
28SA	31,9	20,8	Tipo IP		
28SAS	32,5	21,0	Tipo IP		
35H	44,0	21,4	Tipo GU		
35HS	44,4	20,6	Tipo GU		
35SA	44,4	20,4	Tipo IP		
35SAS	40,9	21,0	Tipo IP		
A	33,7	20,8	Tipo GU		Jiménez Lituma, M. I. (2018). <i>Diseño de un sistema de encapsulamiento de pilas en hormigón para el</i> . Trabajo de Titulación, Universidad San Francisco de Quito, Quito.
B	52,3	21,2	Tipo GU		
C	36,6	18,6	Tipo GU		
D	57,3	21,6	Tipo GU		
H21	22,0	18,6	Tipo IP	Cabrera, H. X. (2014). <i>MÓDULO DE ELASTICIDAD DE HORMIGONES DE PESO NORMAL EMPLEADOS EN EL ECUADOR FC: 21, 24, 28, 35 MPa</i> . Trabajo de titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito.	
H24	25,3	19,0	Tipo IP		
H28	28,6	20,6	Tipo IP		
H21	21,8	18,0	Tipo IP		
h24	25,0	19,2	Tipo IP		
h28	28,7	20,8	Tipo IP		
h35	35,9	23,0	Tipo IP		
h21	21,6	18,0	Tipo IP		
h24	25,9	19,8	Tipo IP		
h28	30,5	21,8	Tipo IP		
h35	36,7	23,8	Tipo IP		
M210	20,7	19,0	Tipo IP	Sánchez, J. (2013). <i>La resistencia a la compresión del hormigón y su influencia en el módulo de elasticidad estático en el cantón ambato, provincia de tungurahua</i> . Universidad Técnica de Ambato, Ambato.	
M240	23,9	20,4	Tipo IP		
M280	27,9	22,4	Tipo IP		
H350	34,8	22,6	Tipo IP	Laboratorio de Materiales de Construcción USFQ, (s/f)	
H450	43,5	22,8	Tipo IP		
SAP	29,1	17,0	Tipo GU	Paucar Paucar, M. A., & Sacasari Luzpa, G. S. (2017). <i>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. TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL</i> , Universidad Central Del Ecuador, Quito.	
G	29,9	22,0	Tipo GU		
San roque	30,7	16,4	Tipo IP	Coro, M. (2014). <i>Determinación del Módulo de Rotura en vigas de hormigón, fabricado con materiales procedentes de la cantera San Roque, para f'c=28 MPa</i> . Universidad Central Del Ecuador, Quito.	
Ramírez	27,6	26,4	Tipo IP	Avila, F. (2014). <i>Determinación del Módulo de Rotura en vigas de hormigón, fabricado con materiales procedentes de la cantera Ramírez, para f'c=28MPa</i> . Universidad Central del Ecuador, Quito	
180 Sin Fibra	22,3	17,2	Tipo GU	Que draogo Guayasamin, I. S., & Zapata Mera, J. O. (2014). <i>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DE HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS DE VIDRIO E INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE FIBRA ADICIONADO</i> . Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito.	
210 Sin Fibra	21,7	17,8	Tipo GU		
280 Sin fibra	32,9	20,2	Tipo GU		

En los anexos del A1 al A13 se puede encontrar información más específica sobre los datos mostrados, tanto procedencia de cada uno de ellos y como se calcularon algunos. Cada valor colocado en la anterior tabla es un promedio de los resultados del ensayo de compresión y del módulo de elasticidad estático.

En la siguiente figura se muestra la distribución de datos en base a la información recopilada:

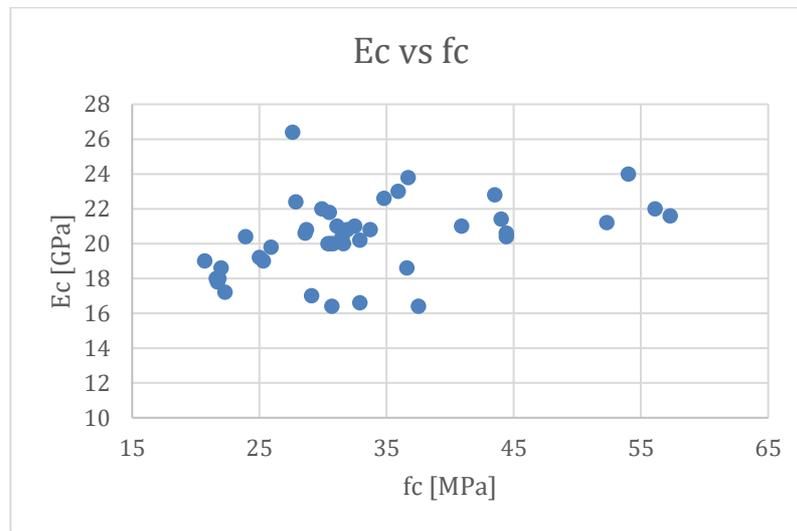


Figura 8 Ec vs fc de los datos recopilados

2.3. Fase experimental

En la tabla 1 se presenta la información recopilada y en la figura 8 se graficó la información de la resistencia a la compresión junto a su módulo de elasticidad estático. A partir de esta información se realizarán mezclas adicionales que completen posibles datos faltantes en la figura 8. Una vez obtenido la información se aplicará una técnica de estadística para obtener una ecuación que permita estimar el módulo de elasticidad estático en base a los datos de materiales locales.

2.3.1. Plan Experimental

Para el plan experimental se realizarán 2 mezclas para completar datos de fc y Ec tomando en cuenta la recopilación de datos de la tabla 1 y grafica de la figura 8. Para la selección de las

mezclas se tomará en cuenta la resistencia a la compresión que sean usuales en el Ecuador. La primera mezcla estará entre 15 MPa a 20MPa y la segunda entre de 35 MPa a 40 MPa.

En cada mezcla se elaborará seis cilindros. Tres cilindros serán de 100mm x 200mm y tres de 150mm x300mm. Los primeros tres cilindros se utilizarán para obtener la resistencia a compresión última del hormigón y los restantes para el ensayo del módulo de elasticidad estático.

2.3.2. Metodología (Materiales y Métodos)

Para las mezclas se utilizó el cemento SELVALEGRE PLUS tipo IP. Es un cemento Portland Puzolánico utilizado para construcciones de hormigón en general. Este cemento cumple con el ASTM C 595 “Especificación Normalizada para cementos Adicionados Hidráulicos” y la norma ecuatoriana NTE INEN 490 “Cementos Hidráulicos Compuestos. Requisitos”. Para el agregado se utilizó agregado procedente de la mina de Pifo, a excepción del agregado fino para la mezcla MM que se obtuvo en ADELCA.

Para el diseño de cada mezcla se utilizó el ACI211.1 :

1. Seleccionamos revenimiento. (Ver anexo B1)
2. Seleccionamos tamaño máximo nominal
3. Estimo cantidad de agua y contenido de aire. (Ver anexo B2)
4. Selección relación agua/cemento. (Ver anexo B3)
5. Cálculo contenido de cemento.
6. Estimo contenido de árido grueso. (Ver anexo B4)
7. Estimo contenido de árido fino.
8. Ajusto por contenido de humedad.

El diseño de cada mezcla se presenta en la tabla 2 y 3. El proceso para llegar al diseño de cada mezcla se encuentra en el anexo B5 y B6.

Tabla 2 Dosificación para mezcla MB

Dosificación Mezcla MB	
Material	[kg/m³]
Cemento	256,3
Agua	185,6
Agregado Grueso	926,7
Agregado Fino	903,9
Total	2272,5
Relación a/mc	0,72

Tabla 3 Dosificación para mezcla MM

Dosificación Mezcla MM	
Material	[kg/m³]
Cemento	455,6
Agua	256,5
Agregado Grueso	888,4
Agregado Fino	669,1
Total	2269,6
Relacion a/mc	0,56

Para la mezcla se utilizará la norma ASTM C192/C192M-16. Una vez realizada la mezcla se realizarán los siguientes ensayos en el hormigón en estado fresco: Preparación y curado (ASTM C31/C31-16), asentamiento (ASTM C143/C143-15a), densidad (ASTM C138/C138M-17a), contenido de Aire (ASTM C 213/C231M-17a). Para los ensayos anteriores se tomó en cuenta la ASTM C172/C172M-17. Posterior al tiempo de 28 días en fraguado final del hormigón se ensayarán los cilindros bajo las siguientes normas: ASTM C39/C39M-18 y la ASTM C469/C469M-14, las cuales permitirán sacar la resistencia última del hormigón y el módulo de elasticidad estático.

Se utilizará una regresión lineal con los datos recopilados más los datos obtenidos de las mezclas para obtener una ecuación que permita estimar el módulo de elasticidad estático. Se modelará una línea recta que pase lo más cerca por todos los puntos de interés, es decir que de la recta al punto exista la menor distancia posible. Con esta técnica estadística se puede formular una ecuación que permita estimar una variable cuantitativa en función de otra. En

nuestro caso de interés la resistencia a compresión tiene una relación con el módulo de elasticidad estático, mientras mayor sea la resistencia a compresión se tendrá un mayor módulo de elasticidad estático. Por lo tanto, se tendrá la siguiente ecuación:

$$y = b_1 + b_2x$$

Donde y es una variable la cual este en función de x, b1 y b2 serán constantes siendo b1 la intersección entre ejes y b la pendiente de la recta.

De la regresión lineal se podrá obtener el coeficiente de correlación y de determinación, los cuales permitirán validar la ecuación para estimar el módulo de elasticidad estático con cemento ecuatoriano y permitir validar la ecuación del ACI318.

2.3.3. Resultados

2.3.3.1 Ensayos en hormigón fresco

Tabla 4 Resultados de pruebas para el hormigón en estado fresco de la mezcla MM.

Resultados Mezcla MM		
Asentamiento	120	[mm]
Densidad	2176	[kg/m3]
Contenido de aire	3.2	%

Tabla 5 Resultados de pruebas para el hormigón en estado fresco de la mezcla MM*.

Resultados Mezcla MM*		
Asetamiento	115	[mm]
Densidad	2283	[kg/m3]
Contenido de aire	1,9	%

2.3.3.2. Resistencia a compresión

Para cada mezcla se ensayó un total de 3 cilindros y cada uno con dimensiones de 100x200 mm. Para obtener la resistencia a compresión se utilizó la norma ASTM C39/C39M-18 (anexo B12). Los resultados muestran en la tabla 6 - 8.

Tabla 6 Resistencia a compresión de la mezcla MB a los 46 días.

ASTM C39/C39 M-18.				
Resultados				
Mezcla	#	Pmax[kN]	fc[Mpa]	fc [MPa]
MB	C1	135.306	16.6	15.8
MB	C2	127.169	15.6	
MB	C3	125.541	15.4	

Tabla 7 Resistencia a compresión de la mezcla MM a los 42 días.

ASTM C39/C39 M-18.				
Resultados				
Mezcla	#	Pmax[kN]	fc[Mpa]	fc [MPa]
MM	C1	180,736	22,1	22,1
MM	C2	180,313	22,1	
MM	C3	184,731	22,2	

Al no obtener la resistencia esperado se realizó una nueva dosificación la cual permita obtener una resistencia mayor. La dosificación y los resultados de los ensayos a compresión se mostrarán a continuación:

Tabla 8 Dosificación para mezcla MM*

Dosificación Mezcla MM*	
Material	[kg/m3]
Cemento	500,0
Agua	210,6
Agregado Grueso	1006,2
Agregado Fino	588,8
Total	2305,6
Relación a/mc	0,42

Tabla 9 Resistencia a compresión de la mezcla MM* a los 14 días

ASTM C39/C39 M-18.				
Resultados				
Mezcla	#	Pmax[kN]	fc[Mpa]	fc [MPa]
MM*	C1	189,944	23,3	23,7
MM*	C2	194,171	23,8	
MM*	C3	189,578	24,1	

2.3.3.3. Módulo de elasticidad estático

Para cada mezcla se ensayó 3 cilindros con dimensiones 150x300 mm. Se uso la ASTM C469/C469M-14 (Ver anexo B14) para obtener le módulo de elasticidad estático. Los resultados se presentan en la tabla 10-12.

Tabla 10 Módulo de elasticidad estático de la mezcla MB ensayado a los 46 días

Ensayo ASTM C469/C469M-14					
Mezcla	Cilindro	Corrida	Ec[Gpa]	Ec[Gpa]	Ec[Gpa]
MB	C1	2	14.48	14.3	14.0
		3	14.17		
MB	C2	2	13.70	13.7	
		3	13.75		
MB	C3	2	14.35	13.9	
		3	13.51		

Tabla 11 Módulo de elasticidad estático de la mezcla MM ensayado a los 42 días

Ensayo ASTM C469/C469M-14					
Mezcla	Cilindro	Corrida	Ec[Gpa]	Ec[Gpa]	Ec[Gpa]
MM	C1	2	16.71	16.8	16.8
		3	16.87		
MM	C2	2	16.77	16.7	
		3	16.62		
MM	C3	2	17.08	16.8	
		3	16.56		

Tabla 12 Módulo de elasticidad estático de la mezcla MM* ensayado a los 14 días

Ensayo ASTM C469/C469 M-14					
Resultados					
Mezcla	Cilindro	Corrida	Ec[Gpa]	Ec[Gpa]	Ec[Gpa]
MM*	C1	2	13.9	13.9	13.4
		3	13.8		
MM*	C2	2	13.4	13.4	
		3	13.4		
MM*	C3	2	12.8	12.8	
		3	12.7		

2.3.3.4. Resistencia a la compresión y Módulo de elasticidad

Resultados		
Mezcla	fc [MPa]	Ec [GPa]
MB	15.8	14.0
MM	22.1	16.8
MM*	23.7	13.4

Tabla 13 Resistencia a la compresión y Módulo de elasticidad estático.

2.3.3.5. Tabla actualizada

Tabla 14 Tabla actualizada

Mezcla	fc	Ec	Raíz(fc)	Ec	Cemento
	MPa	GPa		MPa	
M3	56,1	22,0	7,490	22000	Tipo IP
M4	37,5	16,4	6,124	16400	Tipo IP
M5	32,9	16,6	5,736	16600	Tipo IP
G28180	54,0	24,0	7,348	24000	Tipo GU
21H	30,4	20,0	5,514	20000	Tipo GU
21HS	31,5	20,4	5,612	20400	Tipo GU
21SA	30,8	20,0	5,550	20000	Tipo IP
21SAS	31,6	20,0	5,621	20000	Tipo IP
28H	30,6	20,0	5,532	20000	Tipo GU
28HS	31,1	21,0	5,577	21000	Tipo GU
28SA	31,9	20,8	5,648	20800	Tipo IP
28SAS	32,5	21,0	5,701	21000	Tipo IP
35H	44,0	21,4	6,633	21400	Tipo GU
35HS	44,4	20,6	6,663	20600	Tipo GU
35SA	44,4	20,4	6,663	20400	Tipo IP
35SAS	40,9	21,0	6,395	21000	Tipo IP
A	33,7	20,8	5,805	20800	Tipo GU
B	52,3	21,2	7,232	21200	Tipo GU
C	36,6	18,6	6,050	18600	Tipo GU
D	57,3	21,6	7,570	21600	Tipo GU
H21	22,0	18,6	4,690	18600	Tipo IP
H24	25,3	19,0	5,030	19000	Tipo IP
H28	28,6	20,6	5,348	20600	Tipo IP
H21	21,8	18,0	4,669	18000	Tipo IP
h24	25,0	19,2	5,000	19200	Tipo IP
h28	28,7	20,8	5,357	20800	Tipo IP
h35	35,9	23,0	5,992	23000	Tipo IP
h21	21,6	18,0	4,648	18000	Tipo IP
h24	25,9	19,8	5,089	19800	Tipo IP
h28	30,5	21,8	5,523	21800	Tipo IP
h35	36,7	23,8	6,058	23800	Tipo IP
M210	20,7	19,0	4,550	19000	Tipo IP
M240	23,9	20,4	4,889	20400	Tipo IP
M280	27,9	22,4	5,277	22400	Tipo IP
H350	34,8	22,6	5,899	22600	Tipo IP
H450	43,5	22,8	6,595	22800	Tipo IP
SAP	29,1	17,0	5,394	17000	Tipo GU
G	29,9	22,0	5,468	22000	Tipo GU
San roque	30,7	16,4	5,541	16400	Tipo IP
Ramirez	27,6	26,4	5,254	26400	Tipo IP
180 Sin Fibra	22,3	17,2	4,722	17200	Tipo GU
210 Sin Fibra	21,7	17,8	4,658	17800	Tipo GU
280 Sin fibra	32,9	20,2	5,736	20200	Tipo GU
MM	22,1	16,8	4,701	16800	Tipo IP
MB	15,8	14,0	3,975	14000	Tipo IP
MM*	23,7	13,4	4,868	13400	Tipo IP

Los datos que están con un color rojo son los datos implementados a la tabla.

2.3.3.6. Ecuación obtenida para estimar el módulo de elasticidad estático

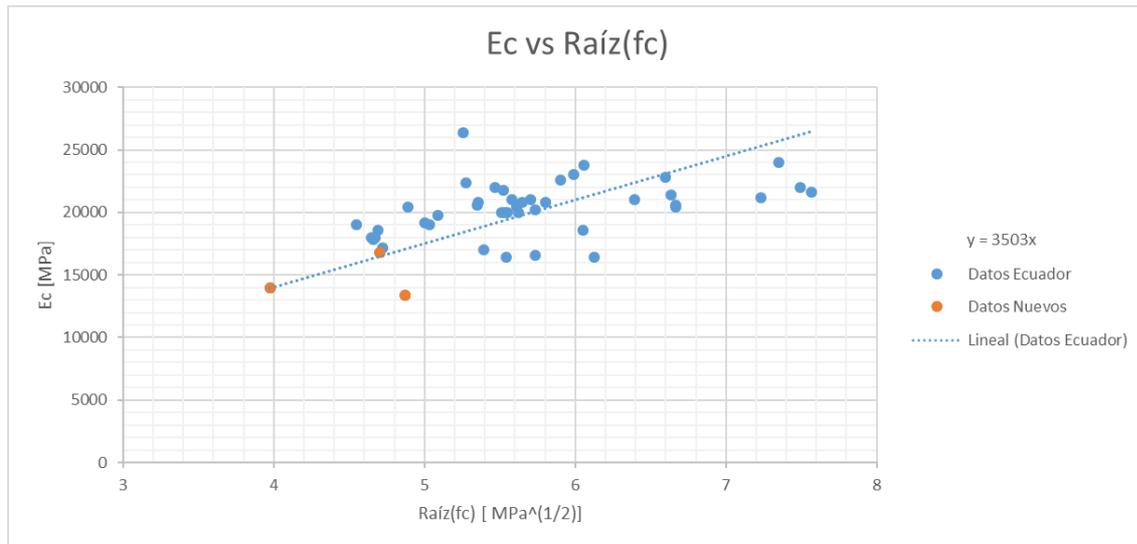


Figura 8 Regresión lineal

$$E_c = 3503\sqrt{f'_c} \text{ [MPa]}$$

2.4. Análisis

2.4.1. Relación de la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad estático.

Tabla 15 Estimación del módulo de elasticidad estático

ACI 318	$E = 4700\sqrt{f'_c}$ [MPa]
ACI 363	$E_c = 3320\sqrt{f'_c} + 6900$ [Mpa]
Datos Ecuador	$E_c = 3500\sqrt{f'_c}$ [MPa]
NEC	$E_c = 1.15 * \sqrt[3]{E_a} * \sqrt{f'_c}$ [GPa]

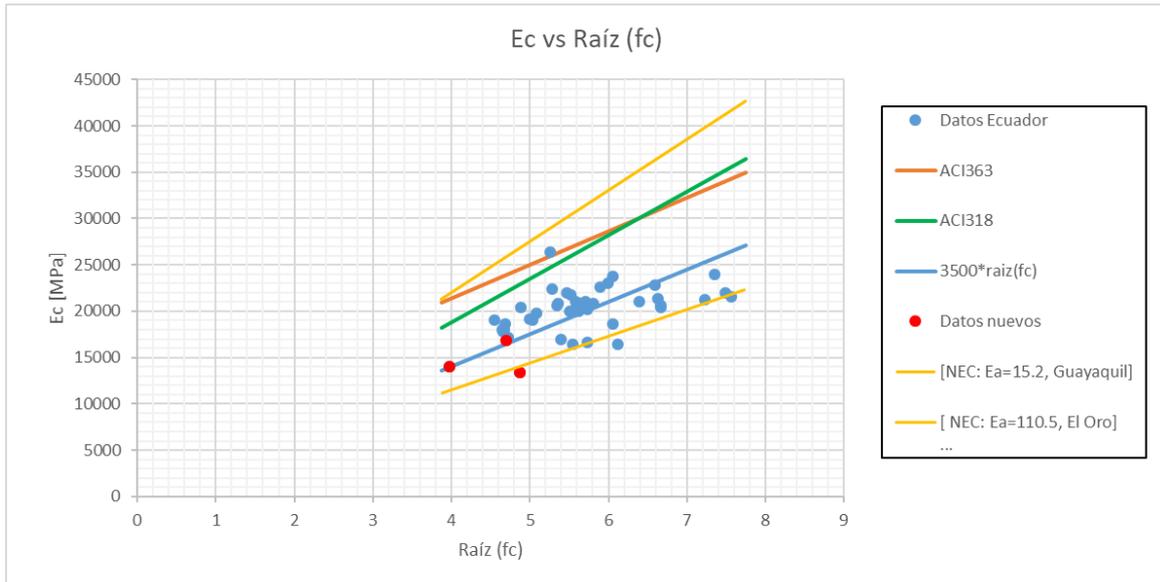


Figura 9 ACI318 vs ACI363 vs 3500raíz(fc)

Tabla 16 Regresión lineal

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación	0,991
Coefficiente de determinación R ²	0,983
Observaciones	46

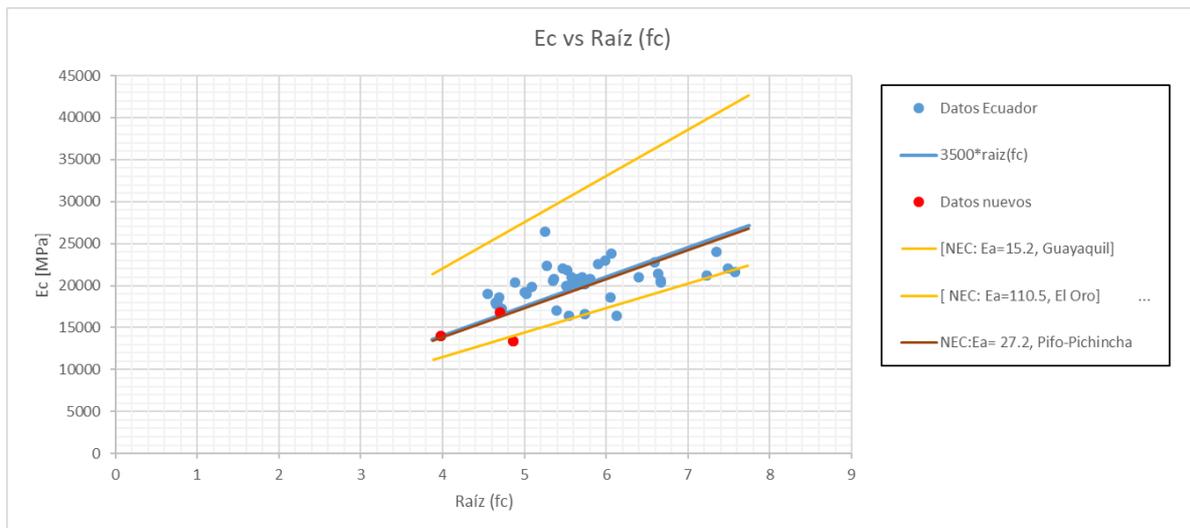


Figura 10 Comparación de módulo de elasticidad estático

A partir de la figura 9 se obtuvo la tabla 16 que muestra los resultados de la regresión lineal en base a los datos recopilados. El coeficiente de determinación permite decir la calidad o la confiabilidad del modelo, mientras más cerca este del 1, más confiable es la aproximación. Al

tener un valor del 0.98 como resultado se puede decir que la ecuación para estimar el módulo de elasticidad es confiable, por lo que sí se puede comparar con la ecuación que propone el ACI 318.

El coeficiente de correlación indica que tan fuerte es la relación lineal entre las dos variables, cuando se acerca a 1 tendrá una mayor relación y si se acerca a 0 tendrá una menor relación. Al tener un coeficiente de correlación de 0.99 podemos decir que tiene una fuerte relación lineal entre las dos variables.

La regresión lineal se encuentra entre los límites de Ecuador. Los límites se obtuvieron con otra fórmula que propone la NEC igualmente en la parte 3.3.3. la cual toma en cuenta el módulo de elasticidad del agregado. Se tomó el valor más bajo y el más alto de E_a para realizar los límites. Se puede notar que la regresión lineal está más cerca al límite inferior que al límite superior. Como gran parte de los datos se obtuvieron de Universidades de Quito se comparó con la estimación de la NEC con agregado de Pifo-Pichincha con la obtenido con los datos recopilados y se puede notar que el comportamiento de las rectas es muy similar, tal y como se muestra en la figura 10.

En la figura 9 se puede notar la diferencia entre los valores estimados por la ecuación del ACI 318, ACI 363 y el obtenido a partir de los datos recopilados. Un menor módulo de elasticidad representara mayores deformaciones unitarias. Se observa que, bajo una misma resistencia a compresión, la formula del ACI 318 o el ACI 363 otorga un mayor módulo de elasticidad estático que el obtenido con la información recopilada.

El factor propuesto por el ACI 318-14 es más elevado que el obtenido en este trabajo. Mientras el factor del ACI 318-14 es de 4700, el obtenido en esta investigación es de 3500. Esto representaría que el módulo de elástico estático obtenido por la formula del ACI 318-14 sea un 26% mayor que el obtenido con la ecuación propuesta en este documento.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1. Conclusiones de resultados

Tras la realización del presente proyecto se concluye lo siguiente:

1. Se sugiere la siguiente relación para hormigones ecuatorianos : $E_c = 3500\sqrt{f_c}$ [MPa].
2. El coeficiente de determinación de 0.98 indica alta confiabilidad.
3. El coeficiente de correlación del 0.99 indica una relación lineal fuerte.
4. La aproximación que propone el ACI 318 sobre-estima el módulo de elasticidad estático del hormigón ecuatoriano.
5. La ecuación propuesta por el ACI 318 sí puede ser aplicada, sin embargo, hay que tener cuidado y criterio para usarla.
6. A pesar de que sí es aplicable la aproximación del ACI 318, la ecuación obtenida de este trabajo es más recomendable por el hecho que se obtuvo a partir de materiales locales y obtuvo un coeficiente de determinación de 0.98.

3.2. Recomendaciones

Tras la realización del presente proyecto se recomienda lo siguiente para futuras investigaciones:

1. Para obtener un modelo matemático que permita una mejor aproximación recopilar más información.
2. Se debe considerar datos de la resistencia del módulo de elasticidad en la NEC ya que las formulas empíricas pueden sobrestimar el módulo de elasticidad y al ser menor se puede estar calculando diferentes deflexiones y rigideces.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 363R-10. (2010). *State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete*. (A. C. Institute, Ed.)
- ACI318-14. (2014). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*. American Concrete Institute.
- ASTM 138/C138M. (2017a). *Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gracimetric) of Concrete*. ASTM International.
- ASTM C143/C143M. (2015). *Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. ASTM international.
- ASTM C172/172M. (2017). *Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete*. ASTM International.
- ASTM C231/C231M. (2017a). *Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method*. ASTM International.
- ASTM C31/C31M. (2018). *Estándar Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. ASTM International.
- ASTM C469/C469M-14. (2014). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete*. ASTM International.
- Cabrera, H. X. (2014). *Módulo de Elasticidad de Hormigones de Peso Normal Emplados en el Ecuador fc: 21, 24, 28, 35 MPa*. Trabajo de titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- De La Cruz Alta, H. P. (2018). *Efectos del curado en las propiedades mecánicas*. Trabajo de titulación, Universidad San Francisco de Quito, Quito.
- Garzón Calderón, M. V., & Ávila Cuatucamba, F. D. (2014). *Determinación del Módulo de Rotura en vigas de hormigón, fabricado con materiales procedentes de la cantera Ramírez, para $f'c=29MPa$* . Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Garzón Calderón, M. V., & Coro Paillacho, M. E. (2014). *Determinación del Módulo de Rotura en vigas de hormigón, fabricado con materiales procedentes de la cantera San Roque, para $f'c= 28 MPa$* . Universidad Central Del Ecuador, Quito.
- Haranki, B. (2009). *Strength, Modulus of Elasticity, Creep and Shrinkage of Concrete Used in Florida*. University of Florida. Retrieved from University of Pittsburgh: <https://psychiatry.pitt.edu/news/k-sads-becomes-one-most-widely-used-diagnostic-tools-research-and-clinical-care-and-example>
- Herrería Cisneros, S. E., & Villegas Dávila, F. M. (2008). *Módulos de elasticidad y curvas de esfuerzo deformación, en base a la compresión del hormigon a 21, 28, 35 MPa*. tesis de pregrado , Escuela Politécnica del ejército, Quito.

- INEC. (2018). *Encuesta de Edificaciones 2017*. Quito. Retrieved from https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Encuesta_Edificaciones/2017/2017_EDIFICACIONES_PRESENTACION.pdf
- Jiménez Lituma, M. I. (2018). *Diseño de un sistema de encapsulamiento de pilas en hormigón para el Distrito Metropolitano de Quito*. Trabajo de Titulación, Universidad San Francisco de Quito, Quito.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2002). *Design and Control of Concrete Mixtures*. 14 th.
- Lamus, F., & Andrade, S. (2015). Materiales Constitutivos. In *Concreto Reforzado* (pp. 14-28). Bogotá.
- McCormac, J. C., & Brown, R. H. (n.d.). Introducción. In *Diseño de concreto reforzado* (pp. 1-34).
- Natarara, M. (n.d.). *Elasticity, Shrinkage and Creep*.
- NEC. (2014). Propiedades mecánicas del hormigón armado. In *Estructuras De Hormigón Armado* (pp. 31-41).
- Neville, A. M. (2011). Elasticity, shrinkage, and creep. In *Properties of Concrete* (pp. 413-422). 5th edition.
- Nilson, A. H. (1999). Introducción y Materiales. In *Diseño De Estructuras De Concreto* (pp. 1-61). Mexico.
- Ouedraogo Guayasamin, I. S., & Zapata Mera, J. O. (2014). *Características Físicas y Mecánicas de Hormigones Reforzados con Fibra de Vidrio e Influencia del Porcentaje de Fibra Adicionado*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito.
- Paucar Paucar, M. A., & Sacasari Luzpa, G. S. (2017). *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*. Universidad Central Del Ecuador. Quito: .
- Pauw, A. (1960). *Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density*. The University Of Missouri.
- Rivadeneira Robalino, B. P. (2013). *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 mulalo en la provincia de cotopaxi y cemento Chimborazo*. Trabajo de graduación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Rochel, R. (2007). *Hormigón Reforzado*. Medellín: EAFIT.

Sánchez, J. (2013). *La resistencia a la compresión del hormigón y su influencia en el módulo de elasticidad estático en el cantón ambato, provincia de tungurahua*. Universidad Técnica de Ambato, Ambato.

Zhindón Salinas, A. M. (2018). *Cuantificación del deterioro de hormigones convencionales por carga*. Proyecto de investigación, Universidad San Francisco de Quito, Quito.

ANEXO A: INFORMACIÓN RECOPIADA

Anexo A1 : fc y Ec de Ana María Zhindon (Universidad San Francisco de Quito).

Mezcla m3				
Autor	Especimen	fc estandar	fc en obra	Ec
		MPa	MPa	Gpa
Ana Maria Zhindon Salinas	1	55,82		
	2	48,67		
	4		55,68	
	5		54,86	
	10		57,77	
	12			22,2
	13			21,6
	Promedio		52,25	56,10
Mezcla m4				
Autor	Especimen	fc estandar	fc en obra	Ec
		MPa	MPa	Gpa
Ana Maria Zhindon Salinas	1	34,59		
	2	35,51		
	3		37,69	
	5		38,40	
	7		36,41	
	12			16,8
	13			16
	Promedio		35,05	37,50
Mezcla m5				
Autor	Especimen	fc estandar	fc en obra	Ec
		MPa	MPa	Gpa
Ana Maria Zhindon Salinas	1	32,55		
	2	33,26		
	3		33,91	
	4		34,15	
	5		33,25	
	6		30,41	
	12			16,2
	13			17
Promedio		32,91	32,93	16,6

Fuente: Datos extraídos del proyecto de investigación Cuantificación del deterioro del hormigón convencional realizado por Ana María Zhindon Salinas de las tablas 3,4,6,7,9,10.

Anexo A2 : fc y Ec de Huiqui Papsi De la Cruz Alta (Universidad San Francisco de Quito).

	fc	Ec
Mezclas	MPa	GPa
P28180	76,3	28,2
G28180	54,0	24,0

Fuente: Datos extraídos del trabajo de titulación Efectos del Curado en las Propiedades Mecánicas del Hormigón con Cementos Portland y por Desempeño Trabajo Experimental por Huiqui Papsi De la Cruz Alta de las pg: 26,27,28,29.

Anexo A3 : f_c y E_c por Sofía herrería Cisneros y Fausto Villegas Dávila (Escuela Politécnica del Ejército).

Cilindros	f_c	E_c
	MPa	GPa
21H	30,4	20,0
21HS	31,5	20,4
21SA	30,8	20,0
21SAS	31,6	20,0
28H	30,6	20,0
28HS	31,1	21,0
28SA	31,9	20,8
28SAS	32,5	21,0
35H	44,0	21,4
35HS	44,4	20,6
35SA	44,4	20,4
35SAS	40,9	21,0

Fuente: Datos extraídos del trabajo de titulación Módulos de Elasticidad y Curvas de Esfuerzo Deformación, en Base a la Compresión del Hormigón a 21,28,35 MPA por Sofía Elizabeth Herrería Cisneros y Fausto Marcelo Villegas Dávila de las pg:157-162.

Anexo A4: f_c y E_c por Milagros Jiménez (Universidad San Francisco de Quito).

Tabla 5: Resultados Obtenidos del Ensayo de Resistencia a Compresión para los Especímenes de todas las Mezclas.

Mezcla	Especimen	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Mpa	Promedio
"A"	1	102,7	200,5	31,2	33,7
	2	101,7	201,6	39,7	
	3	101,8	201,6	30,3	
"B"	1	100,3	203,0	53,2	52,3
	2	101,0	202,0	52,3	
	3	101,0	203,0	51,4	
"C"	1	101,8	203,3	41,1	36,6
	2	102,5	200,7	35,9	
	3	102,8	202,0	32,9	
"D"	1	102,6	202,5	56,5	57,3
	2	102,9	202,0	57,29	
	3	102,6	203,9	57,97	

Tabla 7: Informe de resultados obtenidos del Ensayo de Módulo de Elasticidad

Mezcla	Especimen	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Módulo de Elasticidad [GPa]	Promedio [GPa]	Coefficiente de Poisson	Promedio
"A"	1	152,5	300,0	21,0	20,8	0,2	0,2
	2	152,0	302,0	20,6		0,2	
"B"	1	152,5	303,0	22,6	21,1	0,2	0,2
	2	153,0	303,0	19,6		0,3	
"C"	1	152,0	299,0	18,0	18,5	0,2	0,2
	2	152,5	300,0	19,0		0,2	
"D"	1	152,0	301,0	20,8	21,5	0,2	0,2
	2	152,0	302,0	22,2		0,2	

Fuente: Datos extraídos del trabajo de titulación Diseño de un sistema de encapsulamiento de pilas en hormigón para el Distrito Metropolitano de Quito realizado por Milagros Izel Jiménez Lituma de las páginas 52 y 53.

Anexo A5: fc y Ec elaborado por Henry Alejandro (Escuela Politécnica Nacional).

TABLA 9.3. Probetas de hormigón (edad=28 días) Hormigonera Equinoccial

PROBETAS CILÍNDRICAS DE HORMIGÓN HORMIGONERA EQUINOCCIAL (EDAD=28 DÍAS)				
CILINDRO	CARGA (Ton)	RESISTENCIA (Mpa)	% RESISTENCIA	Ec (Mpa)
H21-07	38,90	22,16	105,53	18767
H21-08	39,72	21,89	104,23	18950
H21-09	40,77	22,77	108,41	19003
H21-10	39,98	22,32	106,31	18323
H21-11	38,24	21,22	101,03	18398
H21-12	38,10	21,42	101,99	18063
PROMEDIO	39,29	21,96	104,58	18584
H24-07	42,48	24,20	100,83	18603
H24-08	45,13	25,20	105,00	19951
H24-09	47,98	27,15	113,14	19676
H24-10	43,26	24,48	102,01	18697
H24-11	45,54	25,77	107,38	17831
H24-12	44,92	25,09	104,52	19488
PROMEDIO	44,89	25,32	105,48	19041
H28-07	49,42	27,41	97,90	19678
H28-08	51,76	29,10	103,92	21676
H28-09	50,27	28,45	101,59	20700
H28-10	49,30	28,09	100,31	19467
H28-11	50,81	28,75	102,68	20853
H28-12	52,84	29,50	105,37	21213
PROMEDIO	50,73	28,55	101,96	20598

ELABORADO POR: Henry Alejandro

Anexo A6: fc y Ec elaborado por Henry Alejandro (Escuela Politécnica Nacional).

TABLA 9.6. Probetas de hormigón (edad=28 días) Hormigonera METRHORM

PROBETAS CILÍNDRICAS DE HORMIGÓN HORMIGONERA METRHORM (EDAD=14 DÍAS)				
CILINDRO	CARGA (Ton)	RESISTENCIA (Mpa)	% RESISTENCIA	Ec (Mpa)
H21-07	38,13	21,57	102,74	17801
H21-08	40,76	22,61	107,67	18077
H21-09	38,44	21,61	102,91	17690
H21-10	38,06	21,39	101,87	17525
H21-11	39,23	22,05	105,01	18575
H21-12	38,40	21,58	102,78	17460
PROMEDIO	38,84	21,80	103,83	17855
H24-07	43,70	24,24	101,00	19266
H24-08	44,75	25,16	104,82	19069
H24-09	44,87	25,05	104,40	19127
H24-10	44,30	24,74	103,08	19401
H24-11	46,22	25,64	106,84	19822
H24-12	44,80	25,02	104,23	18992
PROMEDIO	44,77	24,97	104,06	19279
H28-07	53,29	29,56	105,58	20612
H28-08	50,16	28,19	100,69	20369
H28-09	50,08	28,15	100,54	21315
H28-10	50,60	28,63	102,26	20444
H28-11	50,71	28,69	102,48	21007
H28-12	51,84	28,95	103,39	20426
PROMEDIO	51,11	28,70	102,49	20696
H35-07	62,45	35,34	100,97	23385
H35-08	64,58	36,30	103,71	22912
H35-09	63,65	35,54	101,55	22620
H35-10	65,26	36,69	104,82	23454
H35-11	65,16	36,38	103,95	23609
H35-12	63,21	35,07	100,19	22270
PROMEDIO	64,05	35,89	102,53	23042

ELABORADO POR: Henry Alejandro

Anexo A7 :fc y Ec elaborado por Henry Alejandro (Escuela Politécnica Nacional).

TABLA 9.9. Probetas de hormigón (edad=28 días) Hormigonera Q

PROBETAS CILÍNDRICAS DE HORMIGÓN HORMIGONERA QUITO (EDAD=14 DÍAS)				
CILINDRO	CARGA (Ton)	RESISTENCIA (Mpa)	% RESISTENCIA	Ec (Mpa)
H21-07	38,23	21,63	103,02	18027
H21-08	39,02	21,65	103,07	17820
H21-09	39,99	21,89	104,25	18379
H21-10	38,85	21,55	102,63	18160
H21-11	38,77	21,23	101,08	17843
H21-12	39,83	21,52	102,48	17778
PROMEDIO	39,11	21,58	102,76	18001
H24-07	47,42	26,13	108,88	19848
H24-08	48,29	26,44	110,16	20437
H24-09	44,56	25,22	105,06	19744
H24-10	47,48	26,17	109,02	19746
H24-11	45,63	24,98	104,08	19103
H24-12	47,33	26,08	108,67	19390
PROMEDIO	46,78	25,84	107,65	19711
H28-07	52,22	28,78	102,78	20333
H28-08	54,89	31,06	110,93	22797
H28-09	53,73	30,20	107,87	22139
H28-10	57,81	31,65	113,03	21467
H28-11	55,78	31,56	112,73	22611
H28-12	53,81	29,65	105,91	21384
PROMEDIO	54,71	30,48	108,87	21789
H35-07	63,67	35,79	102,25	23521
H35-08	67,45	37,42	106,91	24164
H35-09	68,16	37,56	107,33	24367
H35-10	65,57	35,90	102,57	22961
H35-11	66,11	35,96	102,74	24068
H35-12	65,93	37,31	106,60	23551
PROMEDIO	66,15	36,66	104,73	23772

ELABORADO POR: Henry Alejandro

Anexo A8 : fc y Ec por Sánchez (Universidad Técnica de Ambato).

Tabla 106: Curva de relación entre Módulo de Elasticidad Estático Experimental y la Resistencia a la Compresión para un hormigón de edad de 28 días

EDAD DÍAS	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (Mpa)	MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO NORMA ASTM - 469 (Mpa)
28	20,73	18935,76
28	23,89	20516,00
28	27,85	22396,73

Fuente: Sánchez, J. (2013). La resistencia a la compresión del hormigón y su influencia en el módulo de elasticidad estático en el cantón Ambato, provincia de Tungurahua. Universidad Técnica de Ambato, Ambato.

Anexo A9 : fc y Ec por Paucar Mayra y Sacasari Grace (Universidad Central Del Ecuador).

Tabla 64: Módulos de Elasticidad experimentales del Sector San Antonio de Pichincha

CILINDRO	RESISTENCIA	ASTM C469-49
N°	MPa	MPa
13	27.65	16904.74
14	29.54	16418.66
15	31.33	16252.61
16	30.22	18376.89
17	28.24	16635.36
18	27.73	16835.80
19	29.86	17385.33
20	27.60	17149.53
21	29.59	17627.51
22	29.47	16704.35
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1.26	632.89
PROMEDIO ARITMÉTICO	29.12	17029.08

Fuente: PAUCAR Mayra & SACASARI Grace, (2017)

Fuente :Paucar Paucar, M. A., & Sacasari Luzpa, G. S. (2017). Caracterización del módulo estático de elasticidad del hormigon a partir de pruebas a compresión simple en probetas cilíndricas con diferentes agregados del cantón Quito, provincia de Pichincha. Universidad Central Del Ecuador. Quito pg 209.

Anexo A10: fc y Ec de Paucar Mayra y Sacasari Grace (Universidad Central del Ecuador).

Tabla 66: Módulos de Elasticidad experimentales del Sector Guayllabamba

CILINDRO	RESISTENCIA	ASTM C469-49
N°	MPa	MPa
1	29.48	21800.32
2	31.38	21945.19
3	31.19	21635.14
4	29.37	21900.14
5	28.72	22645.08
6	29.92	22146.72
7	29.97	22061.06
8	29.51	21386.68
9	29.60	22632.67
10	30.27	22256.53
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0.82	401.78
PROMEDIO ARITMÉTICO	29.94	22040.95

Fuente: PAUCAR Mayra & SACASARI Grace, (2017)

Fuente: Paucar Paucar, M. A., & Sacasari Luzpa, G. S. (2017). Caracterización del módulo estático de elasticidad del hormigon a partir de pruebas a compresión simple en probetas cilíndricas con diferentes agregados del cantón Quito, provincia de Pichincha. Universidad Central Del Ecuador. Quito pg 209 .

Anexo A11: f_c y E_c de Coro Mayra (Universidad Central Del Ecuador).

Tabla N° 5.3.- Comparación entre los valores del Módulo Estático de Elasticidad experimental y teórico.

CANTERA	f'_c DISEÑO (MPa)	f'_c EXPERIMENTAL (MPa)	MÓDULO DE ESTÁTICO DE ELASTICIDAD (MPa)		
			EXPERIMENTAL	ACI -318	ACI -363
SAN ROQUE	28	30.66	16479.64	26024.59	25283.33

Fuente: Coro Mayra.

Fuente: Garzón Calderón, M. V., & Coro Paillacho, M. E. (2014). Determinación del Módulo de Rotura en vigas de hormigón, fabricado con materiales procedentes de la cantera San Roque, para $f'_c = 28$ MPa. Universidad Central Del Ecuador, Quito.

Anexo A12 : f_c y E_c de Ávila Franklin (Universidad Central del Ecuador).

ECUACIÓN No. 5. 2 Módulo de elasticidad.

Cantera	f_c Diseño (Mpa)	f_c Experimental (Mpa)	Módulo de Elasticidad (MPa)		
			Experimental	ACI 318	ACI 363
Ramírez	28	27,59	26454,79	24687,31	24338,69

TABLA No. 25 Comparación entre valores del módulo de elasticidad teórico y experimental.

Nota: los resultados de los módulos de elasticidad teóricos, calculados en base a las ecuaciones del ACI 318 y ACI 363, fueron determinados con la resistencia experimental a la compresión del hormigón.

Fuente: Avila, F. (2014). *Determinación del Módulo de Rotura en vigas de hormigón, fabricado con materiales procedentes de la cantera Ramírez, para $f'_c = 29$ MPa.*, Universidad Central del Ecuador, Quito.

Anexo A13: f_c y E_c de Ian Guayasamín y Jaime Zapata (Pontificia Universidad Católica del Ecuador)

RESISTENCIA f_c (28 días)	RELACION A/C	PROMEDIO kg/cm^2	F_c característica	%MEJORA
180 SIN FIBRA	0,585	226,84	224,01	0
180 CON 0,05% FIBRA DE VIDRIO	0,585	281,87	277,33	24,26
180 CON 0,3% FIBRA DE VIDRIO	0,585	251,26	242,15	10,76
180 CON 0,6% FIBRA DE VIDRIO	0,585	239,83	235,08	5,73
210 SIN FIBRA	0,523	220,92	214,96	0
210 CON 0,05% FIBRA DE VIDRIO	0,523	251,50	245,53	13,84
210 CON 0,3% FIBRA DE VIDRIO	0,523	241,87	238,55	9,48
210 CON 0,6% FIBRA DE VIDRIO	0,523	226,08	220,51	2,33
280 SIN FIBRA	0,435	335,48	330,22	0
280 CON 0,05% FIBRA DE VIDRIO	0,435	324,18	319,41	-3,37
280 CON 0,3% FIBRA DE VIDRIO	0,435	342,19	336,35	2,00
280 CON 0,6% FIBRA DE VIDRIO	0,435	300,77	292,85	-10,35

Tabla 6-1. Resumen de Datos a compresión. Fuente propia.

RESISTENCIA f_c (28 días)	RELACION A/C	PROMEDIO kg/cm^2	α	% INCREMENTO M.E.
180 SIN FIBRA	0,585	176277,44	13138,94	0
180 CON 0,05% FIBRA DE VIDRIO	0,585	211389,54	15756,05	19,92
180 CON 0,3% FIBRA DE VIDRIO	0,585	194432,40	14492,14	10,30
180 CON 0,6% FIBRA DE VIDRIO	0,585	187620,28	13984,39	6,43
210 SIN FIBRA	0,523	180998,93	12490,11	0,00
210 CON 0,05% FIBRA DE VIDRIO	0,523	187340,35	12927,71	3,50
210 CON 0,3% FIBRA DE VIDRIO	0,523	198747,40	13714,87	9,81
210 CON 0,6% FIBRA DE VIDRIO	0,523	208631,07	14396,91	15,27
280 SIN FIBRA	0,435	205834,48	12300,96	0,00
280 CON 0,05% FIBRA DE VIDRIO	0,435	197228,46	11786,65	-4,18
280 CON 0,3% FIBRA DE VIDRIO	0,435	189144,90	11303,57	-8,11
280 CON 0,6% FIBRA DE VIDRIO	0,435	173753,97	10383,79	-15,59

Tabla 6-7. Resumen de datos ensayo módulo de elasticidad. Fuente propia.

Fuente: Ouedraogo Guayasamin, I. S., & Zapata Mera, J. O. (2014). Características Físicas y Mecánicas de Hormigones Reforzados con Fibra de Vidrio e Influencia del Porcentaje de Fibra Adicionado. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito.

ANEXO B: DOSIFICACIONES Y ENSAYOS

Anexo B1: Slump

TABLE A1.5.3.1 — RECOMMENDED SLUMPS FOR VARIOUS TYPES OF CONSTRUCTION (SI)

Types of construction	Slump, mm	
	Maximum*	Minimum
Reinforced foundation walls and footings	75	25
Plain footings, caissons, and substructure walls	75	25
Beams and reinforced walls	100	25
Building columns	100	25
Pavements and slabs	75	25
Mass concrete	75	25

*May be increased 25 mm for methods of consolidation other than vibration

Fuente: Extraído de las diapositivas de Juan José Recalde. (2016). Programas de prevención: Control de calidad del hormigón. Universidad San Francisco de Quito.

Anexo B2: Cantidad de agua

TABLE A1.5.33 — APPROXIMATE MIXING WATER AND AIR CONTENT REQUIREMENTS FOR DIFFERENT SLUMPS AND NOMINAL MAXIMUM SIZES OF AGGREGATES (SI)

Slump, mm	Water, Kg/m ³ of concrete for indicated nominal maximum sizes of aggregate							
	9.5"	12.5"	19"	25"	37.5"	50†*	75†‡	150†‡
Non-air-entrained concrete								
25 to 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 to 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 to 175	243	228	216	202	190	178	160	—
Approximate amount of entrapped air in non-air-entrained concrete, percent	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Air-entrained concrete								
25 to 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 to 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 to 175	216	205	197	184	174	166	154	—
Recommended average total air content, percent for level of exposure:								
Mild exposure	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5****	1.0****
Moderate exposure	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5****	3.0****
Extreme exposure††	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5****	4.0****

Fuente: Extraído de las diapositivas de Juan José Recalde. (2016). Programas de prevención: Control de calidad del hormigón. Universidad San Francisco de Quito.

Anexo B3 : Relación agua/cemento

TABLE A1.5.3.4(a) — RELATIONSHIPS BETWEEN WATER-CEMENT RATIO AND COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE (SI)

Compressive strength at 28 days, MPa*	Water-cement ratio, by mass	
	Non-air-entrained concrete	Air-entrained concrete
40	0.42	—
35	0.47	0.39
30	0.54	0.45
25	0.61	0.52
20	0.69	0.60
15	0.79	0.70

Fuente: Extraído de las diapositivas de Juan José Recalde. (2016). Programas de prevención: Control de calidad del hormigón. Universidad San Francisco de Quito.

Anexo B4 :Volumen del agregado grueso

TABLE A1.5.3.6 – VOLUME OF COARSE AGGREGATE PER UNIT OF VOLUME OF CONCRETE (SI)

Nominal maximum size of aggregate, mm	Volume of dry-rodded coarse aggregate* per unit volume of concrete for different fineness moduli† of fine aggregate			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

*Volumes are based on aggregates in dry-rodded condition as described in ASTM

Fuente: Extraído de las diapositivas de Juan José Recalde. (2016). Programas de prevención: Control de calidad del hormigón. Universidad San Francisco de Quito.

Anexo B5: Dosificación MB

Mezcla MB																	
$C.H_{AG} = 0,2\%$	$f_c = 15 - 20MPa$																
$Absorcion_{AG} = 4,1\%$	$Mód.Finura = 2.6$																
1. Asentamiento = 75mm																	
2. TMN = 19mm																	
3. $w = 205 \text{ kg/m}^3$																	
4. $w/c = 0,8$																	
5. $c = \frac{205}{0,8} = 256,3$																	
6. $MAG = 0,63 \times 1413 = 890,2 [kg]$																	
7. $AF = 2250 - (890,2 + 205 + 256,3) = 898,5 [kg]$																	
8. $AG = x * (1,002) = 892,0 [kg]$ $x = 890,2 [kg]$																	
$AG = 890,2 * (0,2\% - 4,1\%) = 34,7 [kg] \text{ (quitar)}$																	
$AG = 890,2 * (1,041) = 926,7 [kg] \text{ (SSD)}$																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Dosificación para 1 m3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cemento</td> <td>256,3</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>249,3</td> </tr> <tr> <td>Agregado Grueso</td> <td>892</td> </tr> <tr> <td>Agregado Fino</td> <td>903,9</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>2301,5</td> </tr> </tbody> </table>		Dosificación para 1 m3		Cemento	256,3	Agua	249,3	Agregado Grueso	892	Agregado Fino	903,9	Total	2301,5				
Dosificación para 1 m3																	
Cemento	256,3																
Agua	249,3																
Agregado Grueso	892																
Agregado Fino	903,9																
Total	2301,5																
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Dosificación Mezcla MB</th> </tr> <tr> <th>Material</th> <th>[kg/m3]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cemento</td> <td>256,3</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>185,6</td> </tr> <tr> <td>Agregado Grueso</td> <td>926,7</td> </tr> <tr> <td>Agregado Fino</td> <td>903,9</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>2272,5</td> </tr> <tr> <td>Relación a/mc</td> <td>0,72</td> </tr> </tbody> </table>		Dosificación Mezcla MB		Material	[kg/m3]	Cemento	256,3	Agua	185,6	Agregado Grueso	926,7	Agregado Fino	903,9	Total	2272,5	Relación a/mc	0,72
Dosificación Mezcla MB																	
Material	[kg/m3]																
Cemento	256,3																
Agua	185,6																
Agregado Grueso	926,7																
Agregado Fino	903,9																
Total	2272,5																
Relación a/mc	0,72																

Anexo B6: Dosificación MM

Mezcla MM																	
$C. H_{AG} = 0,2\%$	$f_c = 35 - 40MPa$																
$Absorción_{AG} = 4,1\%$	$Mód. Finura = 2.6$																
1. Asentamiento = 75mm																	
2. $TMN = 19mm$																	
3. $w = 205kg/m^3$																	
4. $w/c = 0,45$																	
5. $c = \frac{205}{0,45} = 455,56$																	
6. $M_{AG} = 0,63 \times 1413 = 890,2[kg]$																	
7. $AF = 2250 - (890,2 + 205 + 455,7) = 669,1[kg]$																	
8. $AG = x * (1,002) = 890,2[kg]$																	
$x = 888,42[kg] \text{ (OD)}$																	
$AG = 888,42 * (0,2\% - 0,41\%) = 34,6 [kg] \text{ (quitar)}$																	
$AG = 888,42 * (1,041) = 924,8 [kg] \text{ (SSD)}$																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Dosificación para 1 m3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cemento</td> <td>455,6</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>278,8</td> </tr> <tr> <td>Agregado Grueso</td> <td>890,2</td> </tr> <tr> <td>Agregado Fino</td> <td>669,1</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>2293,7</td> </tr> </tbody> </table>		Dosificación para 1 m3		Cemento	455,6	Agua	278,8	Agregado Grueso	890,2	Agregado Fino	669,1	Total	2293,7				
Dosificación para 1 m3																	
Cemento	455,6																
Agua	278,8																
Agregado Grueso	890,2																
Agregado Fino	669,1																
Total	2293,7																
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Dosificación Mezcla MM</th> </tr> <tr> <th>Material</th> <th>[kg/m3]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cemento</td> <td>455,6</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>256,5</td> </tr> <tr> <td>Agregado Grueso</td> <td>924,8</td> </tr> <tr> <td>Agregado Fino</td> <td>669,1</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>2306,0</td> </tr> <tr> <td>Relación a/mc</td> <td>0,56</td> </tr> </tbody> </table>		Dosificación Mezcla MM		Material	[kg/m3]	Cemento	455,6	Agua	256,5	Agregado Grueso	924,8	Agregado Fino	669,1	Total	2306,0	Relación a/mc	0,56
Dosificación Mezcla MM																	
Material	[kg/m3]																
Cemento	455,6																
Agua	256,5																
Agregado Grueso	924,8																
Agregado Fino	669,1																
Total	2306,0																
Relación a/mc	0,56																

Anexo B7: Asentamiento mezcla MM



Anexo B8: Densidad mezcla MM



Anexo B9: Densidad mezcla MM



Anexo B10: Contenido de aire



Anexo B11: Cilindros elaborados



Anexo B12: Ensayo a compresión



Anexo B13: Curado acelerado



Anexo B14: Ensayo de módulo de elasticidad estático.

