



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**INFLUENCIA DE LA CALIDAD DEL AGREGADO EN LA DETERMINACIÓN DEL
MÓDULO ELÁSTICO DEL HORMIGÓN**

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

Autores: Ximena Alexandra Celi Rogel
Félix Andrés González Del Pezo
Tutor: Francisco Roberto Ortiz Navas

Quito - Ecuador
2022

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

Nosotros, Ximena Alexandra Celi Rogel con documento de identificación N° 1723040232 y Félix Andrés González del Pezo con documento de identificación N° 2400187577; 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, 27 de julio del 2022

Atentamente,

Ximena Alexandra Celi Rogel
1723040232

Félix Andrés González del Pezo
2400187577

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

Nosotros, Ximena Alexandra Celi Rogel con documento de identificación N° 1723040232 y Félix Andrés González del Pezo con documento de identificación N° 2400187577; 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: “Influencia de la Calidad del Agregado en la determinación del Módulo Elástico 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, 27 de julio del 2022

Atentamente,

Ximena Alexandra Celi Rogel

1723040232

Félix Andrés González del Pezo

2400187577

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: INFLUENCIA DE LA CALIDAD DEL AGREGADO EN LA DETERMINACIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO DEL HORMIGÓN, realizado por Ximena Alexandra Celi Rogel con documento de identificación N° 1723040232 y por Félix Andrés González del Pezo con documento de identificación N° 2400187577, 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, 27 de julio del 2022

Atentamente,



Ing. Francisco Roberto Ortiz Navas, PhD

1717631244

INFLUENCIA DE LA CALIDAD DEL AGREGADO EN LA DETERMINACIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO DEL HORMIGÓN

INFLUENCE OF AGGREGATE'S QUALITY ON ELASTIC MODULE OF CONCRETE

Ximena Celi-Rogel¹, Félix González-Del Pezo²

Resumen

El módulo elástico (E_c) es una de las propiedades más importantes del hormigón ya que influencia en gran parte en el comportamiento en régimen línea de elementos estructurales y no estructurales. El E_c también juega un rol importante en el cálculo de deflexiones instantáneas y a largo plazo de elementos de hormigón armado. Por otra parte, el E_c combinado con las propiedades de la sección, influye en la rigidez y derivas de piso durante el análisis de estructuras de hormigón. Códigos internacionales como el Código Americano del Hormigón ACI 318-19, o el código modelo MC-2010, incluyen varias expresiones que permiten determinar el E_c en función de distintos parámetros, siendo la principal la resistencia a la compresión del hormigón (f'_c). Sin embargo, en ocasiones resulta insuficiente determinar el E_c en función de una única variable. Por otra parte, la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015 NEC-SE-HM, incluye formulaciones más refinadas para determinar el E_c , misma que se encuentra en función del módulo de elasticidad de los agregados (E_a), parámetro que en la práctica resulta complicado medirlo. Dentro de este contexto, la presente investigación intenta determinar la relación que tiene el E_c del hormigón con los parámetros de calidad de los agregados a fin

Abstract

The elastic modulus (E_c) is one of the most important properties of concrete since it largely influences the behavior of structural and non-structural elements in the line regime. E_c also plays an important role in calculating instantaneous and long-term deflections of reinforced concrete elements. On the other hand, the E_c combined with the section properties influences the stiffness and story drifts during the analysis of concrete structures. International codes such as the American Concrete Code ACI318-19, or the model code MC-2010, include several expressions that allow E_c to be determined based on different parameters, the main one being the compressive strength of the concrete (f'_c). However, sometimes it is insufficient to determine the E_c based on a single variable. On the other hand, the Ecuadorian Construction Standard 2015 NEC-SE-HM, includes more refined formulations to determine the E_c , which is based on the modulus of elasticity of the aggregates (E_a), a parameter that in practice is complicated to measure. Within this context, the present investigation tries to determine the relationship that the E_c of the concrete has with the quality parameters of the aggregates in order to determine if there is a direct relationship between them. For this, nine types of concrete

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

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

de determinar si existe una relación directa entre ellos. Para esto se han realizado nueve tipos de mezclas de hormigón empleando tres tipos de agregados y tres resistencias a la compresión (21MPa, 24MPa y 28 MPa). Una vez validados los resultados experimentales, los resultados muestran que existe una relación fuerte entre dos parámetros que sirven para caracterizar la calidad de los agregados gruesos con el módulo de elasticidad del hormigón.

Palabras Clave: Calidad del agregado, Módulo elástico experimental, Normas.

mixtures have been made using three types of aggregates and three compressive strengths (21MPa, 24MPa and 28 MPa). Once the experimental results have been validated, the results show that there is a strong relationship between two parameters that serve to characterize the quality of coarse aggregates with the modulus of elasticity of the concrete.

Keywords: Quality of aggregates, Experimental elastic modulus, Standards.

1. Introducción

1.1. Simbología utilizada

Simbología

E	Módulo elástico del hormigón.
α_E	Factor de corrección según el tipo de agregado.
f_{ck}	Resistencia a la compresión de acuerdo a la clase del agregado.
γ	Peso específico del hormigón
f'_c	Resistencia a la compresión del hormigón.
Ea	Módulo elástico del agregado.
TMN	Tamaño máximo nominal.
A/C	Relación agua cemento.
CV	Covarianza
$\Delta\sigma$	Diferencia de esfuerzo
$\Delta\varepsilon$	Diferencia de deformación unitaria
σ_{max}	Esfuerzo máximo
σ_1	Esfuerzo a una deformación de cincuenta a la millonésima
ε_x	Deformación unitaria respecto al 40% del σ_{max}
ε	Deformación unitaria
R ²	Ji cuadrado
MF	Módulo de finura
MPa	Mega Pascales.
GPa	Giga Pascales

Según la publicación realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Censos [1], en su Encuesta de Edificaciones 2016, en más del 90% de las edificaciones existentes en el país se ha utilizado al hormigón como material principal de construcción. Una de las propiedades más importantes que tiene el hormigón es el módulo elástico el cual ayuda a conocer el comportamiento real del concreto bajo la acción de sismo, las deformaciones grandes que pueden impedir que la estructura cumpla el propósito para el cual fue realizada, la acción directa al cálculo de las rigideces de la estructura; por lo cual, conociendo este parámetro se mejoraría los diseños a uno más acertado en los proyectos de construcción.

En el Ecuador, para la determinación del Módulo de elasticidad del hormigón se han adoptado ecuaciones impuestas por institutos internacionales como; el Código Americano del Hormigón ACI 318-19 [2], las cuales están fundadas en investigaciones elaboradas con materiales de su propio medio, lo cual no asegura resultados similares con los hormigones de nuestro país.

Con referencia a la investigación [3] las ecuaciones planteadas por el ACI 318-19 [2] sobreestiman los valores del módulo de elasticidad ya que realizado de forma experimental de acuerdo a la Normativa ASTM C469 [4], donde después de realizado el proceso se obtienen ecuaciones ajustadas para dicha zona, ya que varían en sus escenarios y características de los materiales, también el curado en obra y laboratorio influyen notablemente en la resistencia del hormigón.

Según el estudio realizado [5] en el Centro Técnico del Hormigón de Guayaquil, demuestran que módulos de elasticidad de hormigones preparados con distintas clases de agregados y calculados mediante la Normativa ASTM C469 [4], difieren notablemente de la ecuación planteada por el Código Americano del Hormigón ACI 318-19 [2]. Asimismo, se demostró que el módulo de elasticidad del hormigón depende del módulo de elasticidad del agregado utilizado.

Según la información de los resultados obtenidos en el análisis [6], en la Escuela Politécnica Nacional concluyeron que los valores de módulo de elasticidad del hormigón obtenidos experimentalmente dieron menores a los obtenidos con el código ACI donde llegan a representar un valor de 82.43% del valor propuesto por el Código Americano del Hormigón ACI 318-19 [2], lo que condujo a verificar que los valores experimentales están alejados del Código

porque se trabaja directamente con el agregado propio de cada zona.

Ahora bien, es importante mencionar y citar la ecuación del Código Modelo MC-2010 [7] donde se toma en cuenta el tipo de agregado dentro de los parámetros de la expresión. A continuación, se detalla el modelo en donde E_c representa el módulo elástico del hormigón a los 28 días en Mpa, α_E es el factor de corrección según el tipo de agregado y f_{ck} : resistencia a la compresión característica en MPa.

$$E_c = 21500 * \alpha_E * \left(\frac{f_{ck} + 8MPa}{10} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{EQ (1)}$$

Cualquiera que sea la interpretación que se emplee, no se puede ignorar que el valor que se consiga es útil solamente a nivel de anteproyecto, para el proyecto final de una obra se debe utilizar el módulo de elasticidad del concreto que se presenta en la obra, esto es factible si el estructurista reúne la información del productor local del concreto, o en su defecto realizar las pruebas respectivas de laboratorio. Es muy peligroso para la seguridad de la estructura emplear indiscriminadamente fórmulas cuando se desconocen las características elásticas del concreto que se fabrica.

En resumen, se ha explicado la importancia del módulo elástico en el comportamiento estructural del hormigón, según estudios citados en su mayoría detallan la variación en el resultado del módulo experimental con respecto a normativas internacionales, donde en las expresiones citadas de cada método interfieren varios factores, por tal motivo se opta a explicar las expresiones a utilizar en la presente investigación para la obtención del módulo elástico donde se tomara en cuenta la normativa NEC-SE-HM (2015) [8], ACI 318-19 [2], ASTM C469 [4], para una respectiva comparación de

resultados y posteriormente analizar los factores del agregado determinantes para la obtención del módulo elástico del hormigón.

El módulo de elasticidad se obtiene a partir de algunos parámetros, entre ellos la resistencia a la compresión del hormigón (f'_c), el peso específico del hormigón (w_c), el módulo del agregado (E_a) como lo expresa en el código [2] donde plantea las siguientes formulas:

$$E_c = 4,7\sqrt{f'_c} \quad \text{EQ (2)}$$

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

Donde en la EQ (2) se emplea como factor fundamental la (f'_c) y la EQ (3) emplea el peso w_c conjuntamente con el f'_c .

Y para posteriores cálculos se trabajará con el valor de peso específico obtenido en laboratorio que lo caracterizará como un hormigón de peso normal.

Por otra parte, la NEC-SE-HM [8] expresa el cálculo del módulo de elasticidad implementando el E_a simultáneamente con el f'_c como podemos observar en la EQ (4).

$$E_c = 1,15 * \sqrt[3]{E_a} * \sqrt{f'_c} \quad \text{EQ (4)}$$

Con este contexto, en la presente investigación se intenta evaluar la influencia de la calidad de los agregados en el módulo de elasticidad del hormigón para esto se planteó desarrollar mezclas con los f'_c de 21 MPa, 24 MPa y 28 MPa de tres diferentes canteras tales como cantera Gualoto (Mitad del Mundo), Ripconci (Pifo), Pampón (Rio Esmeraldas) con el objetivo de encontrar una relación directa o indirecta representativa entre las propiedades de los agregados hacia el E .

2. Materiales y Métodos

2.1. Materiales

En total se elaboró 9 mezclas de hormigón para evaluar el módulo elástico del hormigón, para las cuales se empleó cemento tipo IP con una densidad de $2,09 \text{ gr/cm}^3$ fabricado bajo NTE INEN 490 [9]. Se utilizaron tres tipos de fuentes para los agregados gruesos y finos usados en la fabricación del hormigón.

El Tipo I corresponde a material obtenido de la cantera Gualoto ubicado en la parroquia de San Antonio en la provincia de Pichincha con un tamaño máximo nominal de 25 mm en el agregado grueso, este material está constituido por aglomerados, piroclastos, toba y ceniza, en gran mayoría por lavas que son representadas por andesitas, dacitas, grises y rosadas, riolacitas compactas de textura afanítica, son hornbléndicas, compuestas por plagioclasas con una matriz de vidrio volcánico parcialmente recristalizado (ver Figura 1a).

El tipo II corresponde un material conformado por Andesita Basáltica, está clasificada como una roca ígnea extrusiva o plutónica, presenta características de coloración definidas de dos tipos: rojizo pálido y blanquecino, con un tamaño máximo nominal de 25 mm en el agregado grueso este material fue obtenido de la Cantera Ripconci ubicado en la parroquia de Pifo en la provincia de Pichincha (ver Figura 1b).

Finalmente, el agregado Tipo III corresponde a un material compuesto por conglomerados, areniscas, lulitas, material ígneo. Las lulitas son de color café a gris café, limosas, calcáreas, en parte tobáceas y localmente glauconitas, su agregado grueso cuenta con un tamaño máximo nominal de 25 mm el material fue obtenido de la Cantera Pampón ubicada en la provincia de Esmeraldas (ver Figura 1c).



Figura 1. Fotografías del agregado grueso empleado. a) Tipo I, b) Tipo II y c) Tipo III

Tanto agregado fino y agregado grueso fueron ensayados para conocer las características físico mecánicas del material esenciales para el diseño de mezcla, donde se inició con la granulometría [10] cuyos resultados se muestra en la Figura 2, pesos unitarios [11], desgaste de los materiales [12], equivalente de arena [13], contenidos orgánicos [14], humedades de los agregados [15], y finalmente pesos específicos y absorciones de los agregados [16], [17], a continuación en la Tabla 1 se detalla los resultados obtenidos del estudio de los agregados para cada tipo de material.

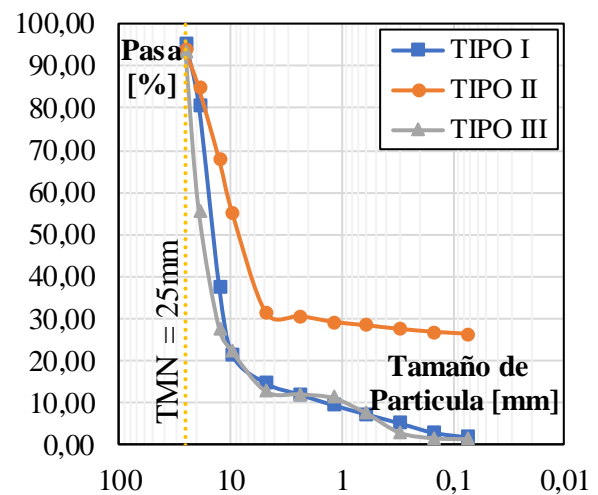


Figura 2. Gráfico de curva granulométrica de los tipos de materiales.

Con la obtención de estas propiedades se procedió al respectivo diseño de la mezcla de hormigón con cada tipo de material según la Normativa ACI 211 (2002) [18], adoptando un

asentamiento de 10 cm mediante el procedimiento de la NTE INEN 1578 [19] en los 3 modelos de resistencias; 21MPa, 24MPa, 28MPa, manteniendo humedad y realizando una optimización de la granulometría en las canteras que no cumplan con la normativa ASTM C33 [20]. Posteriormente se realizó el ensayo de

determinación de la resistencia a la compresión de cada espécimen de hormigón, de acuerdo a la NTE INEN 1573 [21] para la obtención de la resistencia máxima a los 28 días para hormigón creado con cada tipo de material, los resultados se presentan en la Tabla 2 detalladamente.

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

Material	Agregado Grueso			Agregado Fino		
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Peso Específico [gr/cm ³]	2,52	2,37	2,66	2,61	2,52	2,63
Peso Unitario Suelto [gr/cm ³]	1,40	1,43	1,53	1,54	1,22	1,51
Peso Unitario Varillado [g/cm ³]	1,46	1,51	1,56	1,68	1,38	1,61
Humedad Natural [%]	0,18	2,37	0,56	1,99	6,55	1,44
Absorción [%]	3,60	1,69	5,25	3,13	2,61	3,86
Tamaño Natural [mm]	25,00	25,00	25,00	-	-	-
Equivalente de Arena [%]	-	-	-	73,33	72,58	87,13
Desgaste a la Abrasión [%]	43,18	26,24	22,64	-	-	-
Módulo de finura	-	-	-	2,86	2,54	2,96

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

Diseño de mezcla	Cantidad de material para 1 m ³ de hormigón [Kg]								
	Tipo I			Tipo II			Tipo III		
	21 MPa	24 MPa	28 MPa	21 MPa	24 MPa	28 MPa	21 MPa	24 MPa	28 MPa
Agua:	195,00	195,00	195,00	195,00	195,00	195,00	195,00	195,00	195,00
Cemento:	336,21	368,92	414,89	336,21	368,92	414,89	336,21	368,92	414,89
Arena:	737,81	725,58	708,38	704,47	692,79	676,36	710,90	699,11	682,54
Ripio:	995,88	979,36	956,14	945,34	929,66	907,63	1083,40	1065,43	1040,18
a/c:	0,58	0,53	0,47	0,58	0,53	0,47	0,58	0,53	0,47
Asentamiento [cm]:	10,00	8,00	10,00	10,00	10,00	8,00	8,00	8,00	10,00
f'c [MPa]	20,28	21,78	25,21	23,95	26,44	31,92	24,09	27,32	35,09
	(2,21)	(1,72)	(2,41)	(1,04)	(2,06)	(3,38)	(1,25)	(3,82)	(3,74)

Nota: "Coeficiente de variación (CV) en paréntesis.

2.2. Metodología De Ensayo

Para la obtención del Módulo de elasticidad se realizó el respectivo ensayo conforme a la Norma ASTM C-496 [22], teniendo en cuenta que los especímenes cumplan con el elaborado y adecuado curado según la NTE INEN 3124 [23], también deben cumplir con la dimensión estándar de 150mm de diámetro y 300 mm de altura según la

normativa y donde se debe constatar que las caras de los especímenes tanto inferior y superior sean perpendiculares a la superficie.

Antes de realizar el ensayo se debe tener el respectivo valor de resistencia máxima de los especímenes, donde para iniciar se colocara el espécimen de prueba en el aparato de medición (compresómetro, extensómetro), con los

respectivos deformímetros calibrados y alineados unidos a las platinas (abrazaderas), donde las diales se ajustaron para tomar la respectiva deformación como se puede observar en la Figura 3, consecutivamente se ubicó el espécimen en la máquina de ensayo y se colocó una precarga de un valor del 30% de la carga máxima, punto aproximado al valor de la deformación a la 50 millonésima representativa de la deformación unitaria de cada espécimen, luego se va elevando la carga y tomando lectura, en este caso se tomó lectura de una manera ascendente cada 5 KN y posteriormente cada 10 KN para tener datos que ayuden a una mejor representación gráfica de la curva esfuerzo - deformación, el ensayo se detuvo en el momento que la carga aplicada llegó al 70% de la carga máxima para evitar el fallo en el espécimen y daños en los deformímetros.

Los datos en cada ensayo fueron recopilados por dos observadores, donde uno informo la carga aplicada y el segundo anotó los valores de los deformímetros, con estos resultados se procedió al cálculo del módulo experimental según la normativa de cada tipo de material.



Figura 3. Especimen para ensayo del módulo de elasticidad.

Para la obtención del E_c se optó seguir el procedimiento de la norma ASTM C469 [4] donde expresa que se puede desarrollar con la siguiente fórmula.

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{0.4 \sigma_{max} - \sigma_1}{\varepsilon_x - 0.00005} \quad \text{EQ (5)}$$

Donde E_c representa el módulo elástico del hormigón en GPa, σ_{max} representa al esfuerzo máximo en MPa, σ_1 representa al esfuerzo en MPa respecto a una deformación de 50 millonésima y ε_x representa la deformación unitaria respecto al 40% del σ_{max} .

3. Resultados y Discusión

A continuación, en la Tabla 3 presentamos el cuadro comparativo de los resultados conseguidos del módulo elástico de forma experimental empleando la EQ (5) referente a la norma ASTM C469 [4] y de forma teórica del código ACI 318-19 [2] usando la EQ (2) para las diferentes canteras, donde resalta a la vista que los valores están alejados entre sí exceptuando el valor experimental del material Tipo III en cada resistencia, donde es el valor más acercado al teórico.

Tabla 3. Resultados de módulo elástico experimental y del código ACI 318-19 usando la EQ (2) para cada tipo de material.

Resistencia a la compresión (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)					
	ASTM C469 – 64			ACI 318 - 19		
	Experimental			Teórico		
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo I	Tipo II	Tipo III
21	13,46	15,80	18,46	21,16	23,00	23,07
24	13,74	16,55	19,34	21,81	24,17	24,73
28	14,43	17,42	20,31	23,61	26,55	28,16

Expresando en porcentaje; se obtuvieron acercamientos entre (61% – 64%) para el material tipo I, (66% - 69%) para el material tipo II y (72% - 80%) para el material tipo III todos respecto al valor teórico, en este caso el módulo elástico experimental estuvo en el orden del 69% del módulo de elástico teórico calculado con la EQ (2).

Por otra parte, la Tabla 4 refleja los resultados del módulo elástico obtenidos bajo el Código ACI 318-19 [2] con la EQ (3) donde se observa un aumento del módulo de cada tipo de material en relación a su f'_c y con respecto a cada cantera (Tipo I, II y III).

Tabla 4. Resultados de módulo elástico experimental y del código ACI 318-19 usando la EQ (3) para cada tipo de material.

Resistencia a la compresión (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)					
	ASTM C469 – 64			ACI 318 - 19		
	Experimental			Teórico		
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo I	Tipo II	Tipo III
21	13,46	15,80	18,46	21,07	21,38	24,01
24	13,74	16,55	19,34	21,97	22,67	25,93
28	14,43	17,42	20,31	24,04	25,26	30,01

Por consiguiente, los porcentajes de acercamientos para este caso son los siguientes: para el material tipo I (60% – 64%) para el material tipo II (69% - 74%) y para el material tipo III (68% - 77%) lo que nos lleva a un valor de orden del 69% del módulo elástico teórico, igual al obtenido con la EQ (2).

Por otro lado, también es preciso mencionar que en la Tabla 5 se presentan los valores obtenidos en laboratorio del peso específico del hormigón utilizados en la EQ (3) para el respectivo cálculo de E_c , valores que están dentro del rango del peso normal del hormigón.

Tabla 5. Resultados del peso específico del hormigón obtenido de cada material.

Resistencia a la compresión (Mpa)	Peso específico del hormigón (Kg/m3)		
	Tipo I	Tipo II	Tipo III
21	2278,86	2177,44	2347,74
24	2296,22	2190,80	2358,85
28	2312,82	2211,05	2384,45

De acuerdo a lo expuesto, se puede distinguir que cuando se emplea la EQ (2) los valores del módulo elástico calculados son ligeramente menores con respecto a la EQ (3).

Seguidamente se observa en la Figura 4 los respectivos diagramas esfuerzo vs deformación de cada tipo de material, en donde se puede percatar el comportamiento en regimen elástico medido durante el ensayo realizado que establece la Norma ASTM C469 [4] donde se visualiza diferente comportamiento en cada cantera.

Cada grafico muestra individualmente los tres tipos de agregados usados con las resistencias a la compresión donde se puede observar que la línea amarilla vertical en cada uno representa un punto de intersección donde se encuentra el esfuerzo a una deformación unitaria de 50 millonésima, por otro lado, la intersección de líneas iguales significa el punto cuando el esfuerzo máximo está al 40% de su valor total.

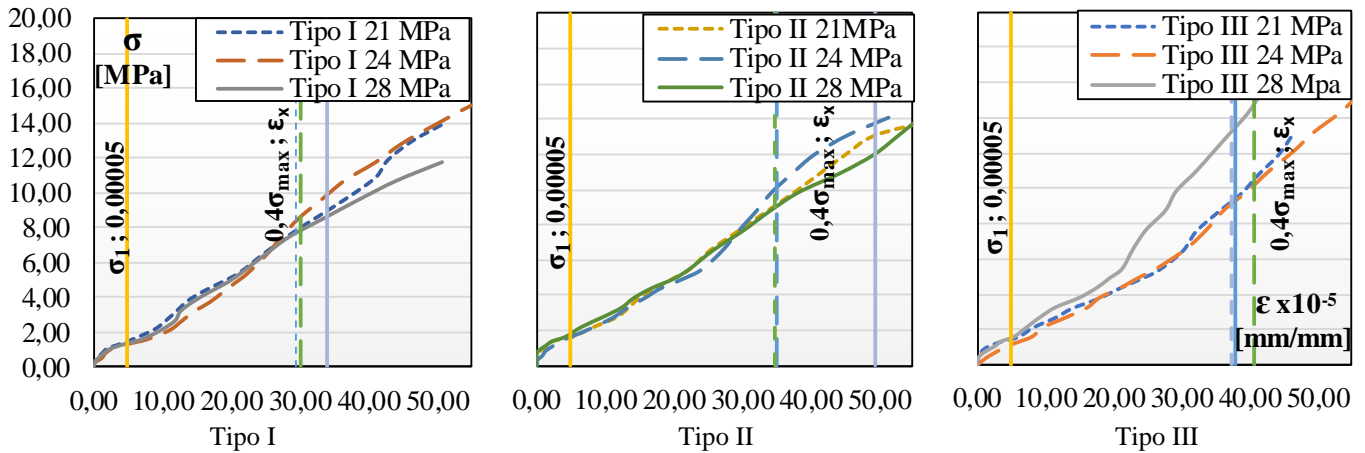


Figura 4. Diagrama de Esfuerzo vs Deformación de los diferentes tipos de materiales.

Continuamente en la Tabla 6 se visualiza los respectivos valores del módulo elástico teórico obtenidos del material tipo II con la NEC-SE-HM (2015) [8] utilizando la EQ (4), donde la misma nos proporciona el dato de E_a igual a 27,2 GPa (Cantera Pifo), conjuntamente con los valores del módulo elástico experimental efectuados mediante la Norma ASTM C469 - 64 [4] de este material.

Tabla 6. Resultados de módulo elástico experimental y de la norma NEC-SE-HM usando la EQ (4) para el material tipo II.

Resistencia a la compresión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	
	Tipo II	
	ASTM C469 - 64	NEC-SE-HM
	Experimental	Teórico
21	15,8	16,93
24	16,55	17,78
28	17,42	19,54

En base a lo mencionado anteriormente se comprueba que los resultados son muy próximos, con un porcentaje de acercamiento entre el (89% - 93%), donde se percató la relación directa entre estos dos procedimientos, lo que sirvió para validar los resultados experimentales obtenidos, por lo tanto, la expresión propuesta por la Norma Ecuatoriana que está en función del módulo del agregado da muy buenos resultados.

Mas adelante, se realizó un análisis de correlación respecto a las propiedades más características de los agregados tales como; peso específico, porcentaje de equivalencia de arena, porcentaje de desgaste a la abrasión, y módulo de finura de los diferentes tipos de materiales, donde se obtuvo una relación directa del módulo elástico con equivalencia de arena y el porcentaje a la abrasión, como se observa en la Figura 6 y Figura 7, caso contrario ocurrió con las otras propiedades donde no existe esta relación como se visualiza en la Figura 5 y Figura 8.

Para un mayor entendimiento se cuenta con los valores obtenidos del R^2 (ji cuadrado), que nos ayuda a comprender la relación de estas propiedades con el módulo elástico, ya que mientras más cercano sea a 1 mayor es su relación, en cuanto a esto se observa en la figura 5 que el valor de R^2 está entre (0,22 - 0,26) con el peso específico, así mismo sucede en la figura 8 donde se encuentra con un valor de relación entre (0,04 - 0,06) para el módulo de finura, por otro lado en la figura 6 el valor de R^2 está entre (0,70 - 0,74) en equivalente de arena, y para finalizar en la figura 7 se tiene al R^2 en entre (0,85 - 0,88) con desgaste a la abrasión.

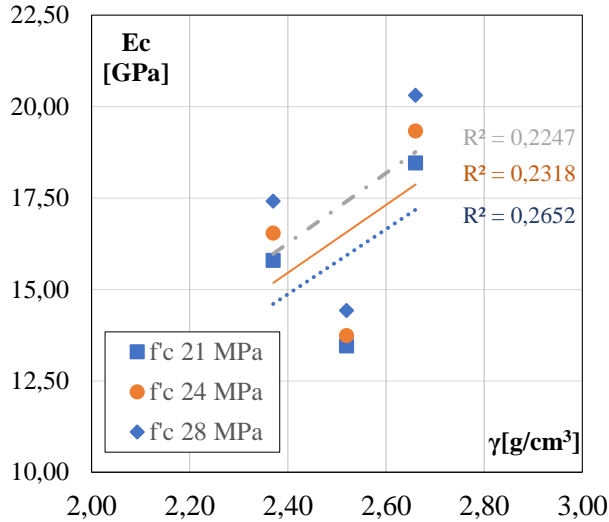


Figura 5. Relación entre el Módulo elástico y el Peso específico de los Tipos de Materiales.

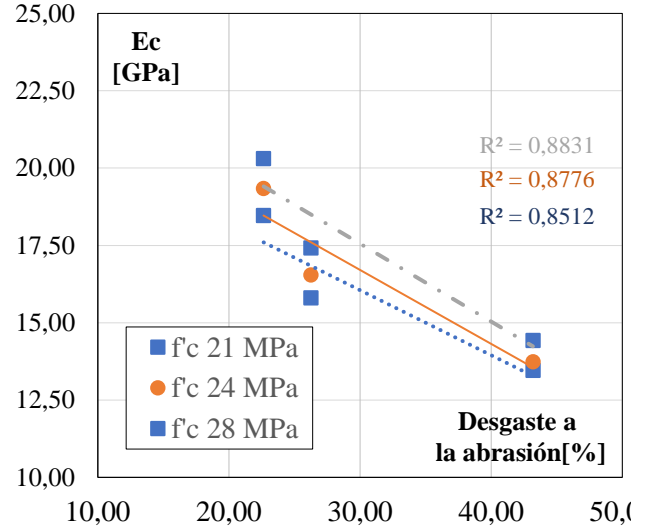


Figura 7. Relación entre el Módulo elástico y el porcentaje de Desgaste a la Abrasión de los Tipos de Materiales.

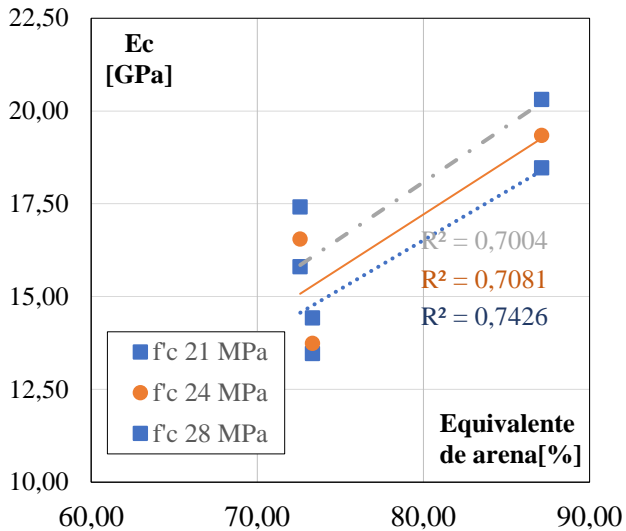


Figura 6. Relación entre el Módulo elástico y el porcentaje de equivalencia de arena de los Tipos de Materiales.

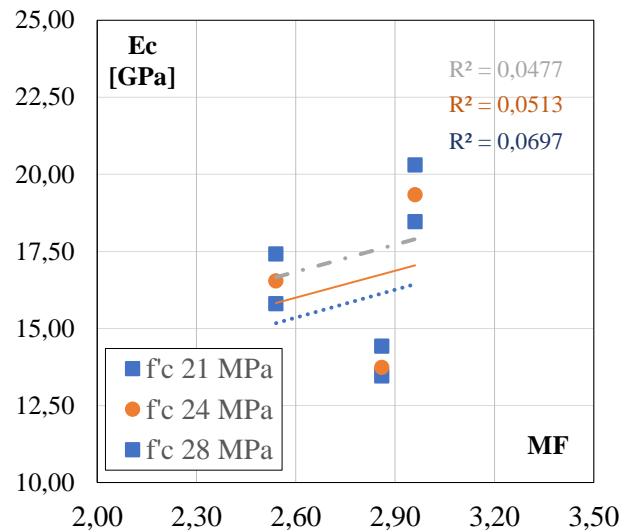


Figura 8. Relación entre el Módulo elástico y el Módulo de Finura de los Tipos de Materiales.

En otro aspecto con los resultados conseguidos experimentalmente, se obtuvieron coeficientes que relacionan directamente la resistencia a la compresión del hormigón con el módulo elástico del hormigón, valores que se expresan en la Tabla 7 obsérvese que estos valores son muy inferiores a los que se encuentran propuestos tanto en código ACI 318-19 [2] obtenidos con la EQ (2) y en la NEC-SE-HM

(2015) [8] obtenidos con la EQ (4). Por otro lado, es importante destacar que usando la EQ (4) se realizó un retro cálculo para la obtención del módulo del agregado para el material tipo I y tipo III, donde cabe destacar que estos valores pueden ser utilizados como referencia para una potencial comparación con futuras investigaciones, valores presentados en la Tabla 8.

Tabla 7. Resultados de las ecuaciones obtenidas para cada material.

Resistencia a la Compresión (MPa)	Tipo I	Tipo II	Tipo III
21	$E_c = 2,990\sqrt{f'_c}$	$E_c = 3,229\sqrt{f'_c}$	$E_c = 3,762\sqrt{f'_c}$
24	$E_c = 2,959\sqrt{f'_c}$	$E_c = 3,218\sqrt{f'_c}$	$E_c = 3,677\sqrt{f'_c}$
28	$E_c = 2,869\sqrt{f'_c}$	$E_c = 3,084\sqrt{f'_c}$	$E_c = 3,392\sqrt{f'_c}$

Tabla 8. Modulo del agregado para el material Tipo I, Tipo III. Obtenida con EQ (4).

Ecuación utilizada	$E_c = 1,15 * \sqrt[3]{E_a} * \sqrt{f'_c}$
Material Tipo I	$E_a = 16,71$ GPa
Material Tipo III	$E_a = 31,07$ GPa

Y finalmente en la Figura 9 se puede apreciar la nube de datos del módulo elástico experimental del hormigón de cada tipo de material, en el cual se puede observar las franjas representativas, donde las líneas entrecortadas representan los límites de la expresión que nos otorga la NEC-SE-HM (2015) [8] donde toma en consideración el módulo del agregado en este caso el valor más bajo de 15,8 GPa y el más alto de 110,5 GPa de esta manera se percibe que la nube de datos en forma de cruz perteneciente al material tipo II se encuentra dentro de esta franja y es la más cercana a la primera línea punteada dibujada con el valor de $E_a=27.2$ GPa perteneciente a la Cantera Pifo, por otro lado con los valores obtenidos anteriormente del módulo del agregado de $E_a=16,71$, $E_a=31,07$ para el material tipo I y tipo III respectivamente contribuyen para poder apreciar que primero, para la nube de puntos del material tipo I esta cercana al límite de la línea obtenida con la Normativa Ecuatoriana con valor de agregado de 15,8 GPa y segundo que la nube de puntos del material tipo III está sobre la línea obtenida con el $E_a=27.2$ GPa.

Concluyendo con el grafico también se puede observar que la segunda línea punteada perteneciente al código ACI 318-19 [2] es la más apartada de los 3 tipos de materiales.

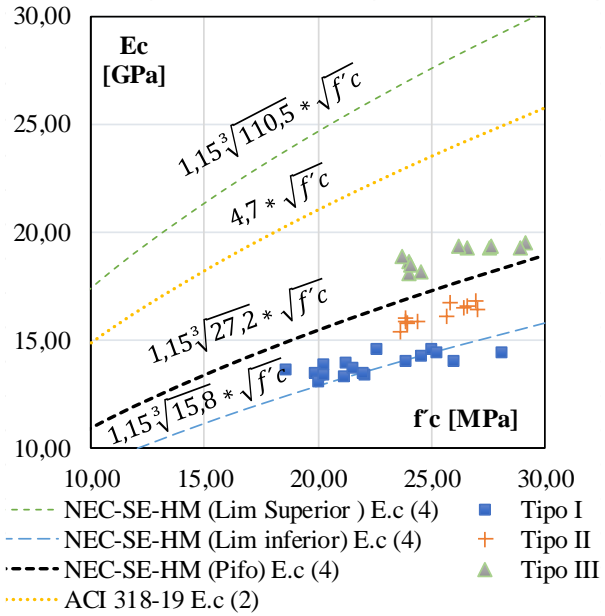


Figura 9. Módulo elástico del hormigón vs f_c de los diferentes agregados y códigos.

4. Conclusiones

Después de haber realizado una campaña experimental donde se han evaluado tres tipos de agregados y se ha estudiado la influencia de la calidad de estos en el módulo elástico del hormigón se puede concluir lo siguiente:

Los módulos de elasticidad experimentales se encuentran al orden del 69% (CV=8,5) cuando se comparan con la expresión $E_c = 4,7\sqrt{f'_c}$ presentada por el código ACI 318-19 por otro lado con la expresión $E_c = w_c^{1,5} * 0,043 * \sqrt{f'_c}$ dada por el mismo código nos da un valor de orden del 69% (CV=7,1), consecutivamente con la expresión $E_c = 1,15 * \sqrt[3]{E_a} * \sqrt{f'_c}$ establecida por la norma NEC-SE-HM se obtuvo un valor de orden del 92% (CV=2,08), de modo que se concluye que en la comparación del módulo elástico respecto a las expresiones dadas por el Código existe más variabilidad de datos caso contrario ocurre con la expresión dada por la Normativa Ecuatoriana, por lo que resulta más confiable usar la NEC-SE-HM (2015) para la estimación del módulo.

Tras el análisis de los resultados se interpreta que al usar la fórmula de la Normativa Ecuatoriana $E_c = 1,15 * \sqrt[3]{E_a} * \sqrt{f'_c}$ en la obtención del módulo elástico existe una relación de acercamiento de (0,89 - 0,93) con respecto al módulo experimental lo que demuestra que es muy válido utilizar la expresión siempre y cuando se tenga el módulo del agregado.

A partir del método estadístico ji cuadrado se pudo determinar que los resultados de equivalencia de arena son representativos en la obtención del módulo elástico del hormigón ya que este ensayo determina la calidad del agregado fino, así obteniendo un $R^2 = (0,70 - 0,74)$ donde nos verifica la una relación fuerte entre los dos parámetros con un valor cercano a 1, de la misma manera ocurre con los resultados del porcentaje al desgaste a la abrasión determinando la calidad del agregado grueso, expresando un $R^2 = (0,85 - 0,88)$.

Ahora bien, con los datos obtenidos del módulo elástico experimental y la resistencia a la compresión se utilizó la expresión $E_c = 4,7\sqrt{f'_c}$, en la obtención de coeficientes en el entorno de estos 3 tipos de materiales, valores que van desde 2,86 hasta 3,76 donde se proponen fórmulas para un cálculo rápido del módulo elástico.

Tal y como hemos podido comprobar se debe estudiar más este fenómeno de módulo elástico en el país ya que se observó que todos los resultados fueron menores a la expresión $E_c = 4,7\sqrt{f'_c}$ propuesta por el código ACI 318-19, evidenciándose que en proyectos se puede estar diseñando desde un punto de vista muy conservador.

Referencias

- [1] INEN, “Encuesta de Edificaciones 2016,” Sep. 2017.
<https://www.ecuadorencifras.gob.ec/encuesta-de-edificaciones-2016/> (accessed Jun. 01, 2022).
- [2] ACI 318, “Requisito de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318-19),” Jun. 2019.
- [3] X. S. Huo, N. Al-Omaishi, and M. K. Tadros, *Creep, Shrinkage, and Modulus of Elasticity of High-Performance Concrete*, 6th ed., vol. 98. 2001.
- [4] ASTM C469, “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression,” Dec. 2010.
- [5] J. Camposano, “Hormigón armado, hormigón preesforzado. diseño de elementos mediante ábacos electrónicos,,” ESPOL, Guayaquil, 2018.
- [6] H. Alejandro, “Módulo de elasticidad de hormigones de peso normal empleados en el Ecuador 21, 24, 28, 35 MPa.,” EPN, Quito, 2014.
- [7] fib, “Model Code,” vol. 1. pp. 117–120, 2010.
- [8] NEC-SE-HM, “Estructuras de Hormigón Armado.” Quito, pp. 33–35, Dec. 2014.
- [9] NTE INEN 490, “Especificación Normalizada para Cementos Adicionados Hidráulicos,” vol. 1. Quito, 2011.
- [10] NTE INEN 696, “ÁRIDOS. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS FINO Y GRUESO.,” vol. 1. Quito, 2011.

- [11] NTE INEN 858, “ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LA MASA UNITARIA (PESO VOLUMÉTRICO) Y EL PORCENTAJE DE VACÍOS,” vol. 1. Quito, 2010.
- [12] NTE INEN 860, “ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DEL VALOR DE LA GRADACIÓN DEL ÁRIDO GRUESO DE PARTÍCULAS MENORES A 37,5 mm MEDIANTE EL USO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES,” vol. 1. Quito, 2011.
- [13] ASTM D2419, “Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate1.” Estados Unidos, 2002.
- [14] NTE INEN 855, “ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LAS IMPUREZAS ORGANICAS EN EL ÁRIDO FINO PARA HORMIGÓN,” vol. 1. Quito, 2010.
- [15] NTE INEN 862, “ÁRIDOS PARA HORMIGÓN. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO TOTAL DE HUMEDAD,” vol. 1. Quito, 2011.
- [16] NTE INEN 856, “ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL ÁRIDO FINO,” vol. 1. Quito, 2010.
- [17] NTE INEN 857, “ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL ÁRIDO GRUESO,” vol. 1. Quito, 2010.
- [18] ACI 211, “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.” Estados Unidos, 2002.
- [19] NTE INEN 1578, “HÓRMIGON DE CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO,” vol. 1. Quito, 2010.
- [20] ASTM C33, “Especificación estándar para AGREGADOS PARA CONCRETO.” Estados Unidos, 2003.
- [21] NTE INEN 1573, “HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO,” vol. 1. Quito, 2010.
- [22] ASTM C-496, “MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO Y RELACIÓN DE POISSON DEL CONCRETO EN COMPRESIÓN,” vol. 4. Estados Unidos, 2003.
- [23] NTE INEN 3124, “ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE ENSAYO EN EL LABORATORIO.” Quito, Dec. 30, 2017.