



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS
AGREGADOS OBTENIDO DE LAS MINAS DE SAN ANTONIO Y PINTAG EN EL
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE 21 Y 28 MPa, CANTÓN QUITO,
PROVINCIA PICHINCHA**

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

AUTORES: Michael Andrés Ibarra Ocaña
Ángel Gerardo Naveda Alarcón

TUTOR: Francisco Roberto Ortiz Navas

Quito – Ecuador
2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Michael Andrés Ibarra Ocaña con documento de identificación N°1722431952 y Ángel Gerardo Naveda Alarcón con documento de identificación N°2100793609; 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, 31 de julio del 2023

Atentamente,



Michael Andrés Ibarra Ocaña
1722431952



Ángel Gerardo Naveda Alarcón
2100793609

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

Nosotros, Michael Andrés Ibarra Ocaña con documento de identificación N°1722431952 y Ángel Gerardo Naveda Alarcón con documento de identificación N°2100793609; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Análisis de la influencia del Módulo de Elasticidad de los Agregados obtenido de las Minas de San Antonio y Pintag en el Módulo de Elasticidad del Hormigón de 21 y 28 MPa, Cantón Quito, Provincia Pichincha”, 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, 31 de julio del 2023

Atentamente,



Michael Andrés Ibarra Ocaña

1722431952



Ángel Gerardo Naveda Alarcón

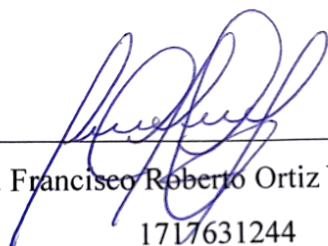
2100793609

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Francisco Roberto Ortiz Navas con documento de identificación N°1717631244, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS AGREGADOS OBTENIDO DE LAS MINAS DE SAN ANTONIO Y PINTAG EN EL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE 21 Y 28 MPA, CANTÓN QUITO, PROVINCIA PICHINCHA, realizado por Michael Andrés Ibarra Ocaña con documento de identificación N°1722431952 y Ángel Gerardo Naveda Alarcón con documento de identificación N°2100793609, 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, 31 de julio del 2023

Atentamente,



Ing. Francisco Roberto Ortiz Navas, PhD.
1717631244

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS AGREGADOS OBTENIDO DE LAS MINAS DE SAN ANTONIO Y PINTAG EN EL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE 21 Y 28 MPa, CANTÓN QUITO, PROVINCIA PICHINCHA

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE ELASTICITY MODULUS OF AGGREGATES OBTAINED FROM SAN ANTONIO AND PINTAG MINES ON THE ELASTICITY MODULUS OF CONCRETE OF 21 AND 28 MPa, QUITO CANTON, PICHINCHA PROVINCE

Michael Ibarra-Ocaña¹, Ángel Naveda-Alarcón²

Resumen

El hormigón armado en la industria de la construcción en el Ecuador se emplea gracias a sus propiedades mecánicas y su versatilidad. Dependiendo de las propiedades de los materiales utilizados ya sean agregados o pasta de hormigón estas afectaran directamente a las propiedades del hormigón. Una de las principales propiedades afectadas siendo el módulo de elasticidad, el cual es de gran importancia ya que influye en las deflexiones, derivas y rigidez de una estructura.

La presente investigación mediante el uso de galgas extensiométricas obtiene el módulo de elasticidad de cilindros de hormigón, pasta de cemento, pasta de cemento más árido fino y núcleos de roca.

Con los resultados previos se procede a obtener el porcentaje de influencia que cada material tiene el módulo de elasticidad del hormigón. Este valor de módulo de elasticidad se analiza respecto a formulas obtenidas de normas, así como de otros proyectos de investigación. También se define el módulo de elasticidad de los agregados tanto para la mina de San Antonio como para la mina de Pintag y se forma una ecuación para el cálculo de módulo de elasticidad exclusivo para cuando se utilice material de las minas estudiadas.

Palabras Clave: ASTM, Módulo de elasticidad, NEC

Abstract

Reinforced concrete is used in the construction industry in Ecuador due to its mechanical properties and versatility. Depending on the properties of the materials used, whether aggregates or concrete paste, these will directly affect the properties of the concrete. One of the main properties affected is the modulus of elasticity, which is of great importance since it influences the deflections, drifts, and stiffness of a structure.

The present investigation by means of the use of strain gauges obtains the modulus of elasticity of concrete cylinders, cement paste, cement paste plus fine aggregate and rock cores.

With the previous results we proceed to obtain the percentage of influence that each material has on the modulus of elasticity of the concrete. This value of modulus of elasticity is analyzed with respect to formulas obtained from standards, as well as from other research projects. The modulus of elasticity of the aggregates is also defined for both the San Antonio and Pintag mines and an equation is formed for the calculation of the modulus of elasticity exclusively for when material from the mines studied is used.

Keywords: ASTM, Modulus of elasticity, NEC

¹ Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

² Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

Autor para correspondencia: mibarrao@est.ups.edu.ec anaveda@est.ups.edu.ec

1. Introducción

El módulo de elasticidad del hormigón (E_c), es una propiedad de los materiales que revela las deformaciones de éstos debido a esfuerzos, y gracias ésta se optimiza los diseños realizados.

Según Cabrera [1], el cálculo del módulo de elasticidad de los materiales utilizados para la realización del hormigón es fundamental ya que es un factor en la seguridad y estabilidad de la estructura. Formando parte importante para que al momento de realizar la estructura esta cumpla con todas las normas de seguridad correspondientes.

Por otra parte, Yanca [2] dice que el módulo de elasticidad afecta de manera directa a la hora de realizar el dimensionamiento de la estructura de hormigón. Tomando en cuenta que si el módulo de elasticidad no es el adecuado con el material utilizado esto conllevaría a un sobredimensionamiento o minimizado de las estructuras de la obra.

Por otro lado, la investigación realizada por Calderón [3] se da a entender que el módulo de elasticidad de los agregados varía de acuerdo con el lugar de donde se encuentra dicho material. Lo cual en la norma ecuatoriana NEC el módulo de elasticidad del agregado es muy general ya que no hay uno específico de cada una de las fuentes que encontramos en el país.

Los autores Serpa y Vásquez [4] concluyen que el módulo de elasticidad de los agregados y la dosificación de la mezcla es lo que define el módulo de elasticidad del hormigón. Un buen estudio del módulo de elasticidad del hormigón es de suma importancia dado que de él dependen las deformaciones estructurales, las mismas que deben mantenerse dentro de unos límites establecidos para evitar fallas en la estructura.

Además, según Herrería y Villegas [5] especifica que la dosificación en el hormigón debe llevar a una relación proporcional con sus

materiales para así encontrar una relación óptima entre la durabilidad y la economía de esta.

Al conocer el módulo de elasticidad de los materiales utilizados permite tener un mayor control en la mezcla ayudando así a optimizar a la economía del proyecto, pero sobre todo conocer la rigidez de los materiales utilizados.

2. Materiales y Métodos

2.1 Agregados

Se han empleado dos variedades de agregado grueso: el Tipo I, procedente de las minas de San Antonio, y el Tipo II, extraído de las minas de Pintag. En ambas mezclas se obtuvo el mismo tipo de agregado fino, obtenido de las mismas minas.

Se lleva a cabo pruebas de calidad en los agregados, incluyendo la determinación del tamaño máximo nominal según la norma INEN 696 [6], que se puede obtener a partir del 15% del retenido acumulado; la evaluación de la granulometría de los finos y gruesos [6], tal y como se muestra en la Figura 1, lo que permite garantizar una óptima adherencia de los agregados con el conglomerado utilizando la norma INEN 872 [7]; la prueba de abrasión, de acuerdo a la norma INEN 860 [8], para caracterizar la dureza de la grava, lo que es una medida esencial para obras sujetas a cargas de impacto, desgaste o pulimento; la medición de los pesos específicos del agregado grueso siguiendo la norma INEN 857 [9] y la norma INEN 856 para los agregados finos [10].

Además, se determinaron las masas unitarias y humedades según las normas INEN 858 [11] e INEN 862[12], respectivamente, lo que permite añadir o disminuir la cantidad de agua durante la fundición.



Figura 1. Cuarteo de la mezcla a ensayar.

La Figura 2 muestra las granulometrías y fajas granulométricas de los materiales evaluados. El Tipo I corresponde al número de tamaño 6, que cubre los tamices con aberturas de 19.0 a 2.36 mm cumpliendo los requisitos de la norma ASTM C33-03 [13], y se puede observar que la granulometría cumple parcialmente. El Tipo II corresponde al número de tamaño 467, que cubre tamices con aberturas de 25.0 a 4.75 mm según la norma ASTM C33-03 [13], y se puede observar que la granulometría se encuentra dentro de la faja. Por último, en el caso del agregado fino, la faja es estándar y se puede observar que la granulometría cumple parcialmente de la faja.

Se puede observar que el agregado fino Tipo I se caracteriza por tener un bajo contenido orgánico, lo que se refleja en un valor de 2 en la escala de colores estándar de Gardner [13].

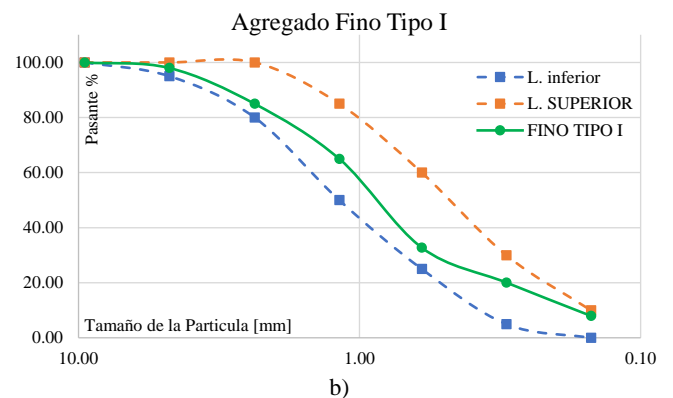
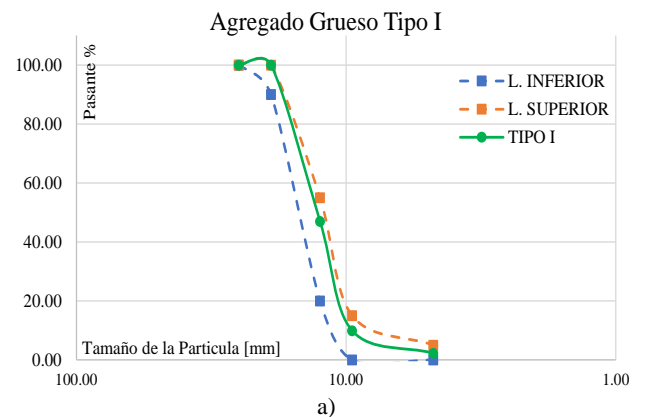
Por otro lado, en el caso del agregado fino Tipo II, se caracteriza por tener un contenido medio-bajo de materia orgánica, lo que se refleja con un valor de 3 en la escala de colores de Gardner [13]. Ambos valores indican que los materiales son aptos para su uso en la construcción.

En la

Tabla 1 se presenta el resumen de los ensayos realizados para los agregados.

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

Material	Grueso		Fino	
	Tipo I	Tipo II	Fino I	Fino II
Tipos de Materiales				
Peso Específico [gr/cm ³]	2.67	1.82	2.97	2.74
Peso Unitario Suelto [gr/cm ³]	1.38	1.37	1.20	1.57
Peso unitario Varillado [gr/cm ³]	1.53	1.51	1.33	1.72
Humedad Natural [%]	1.67	3.94	1.14	3.45
Absorción [%]	4.15	2.87	2.49	5.33
Tamaño Máximo Nominal [mm]	19.00	25.00	9.50	9.50
Desgaste a la Abrasión [%]	25.3	49.08	-	-
Módulo de Finura	-	-	3.14	2.96



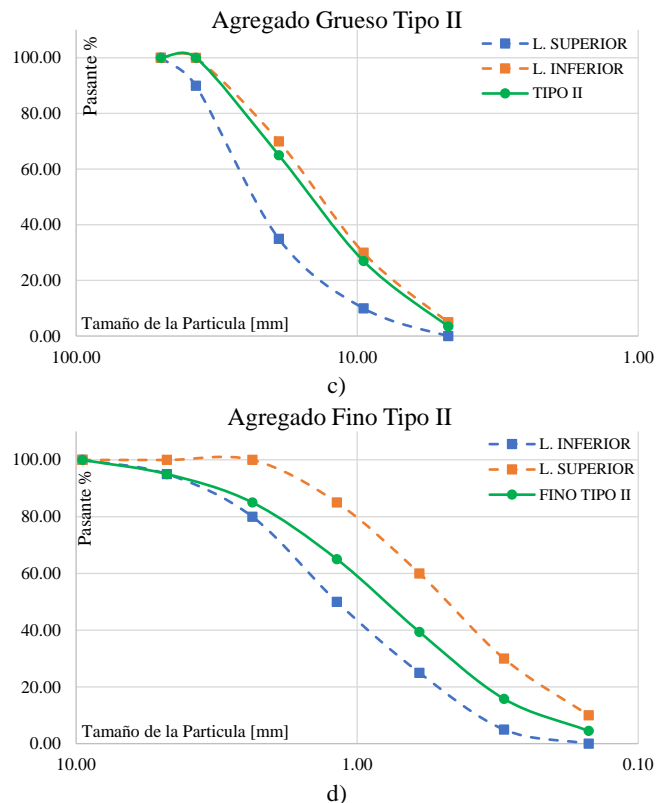


Figura 2. Curvas granulométricas y fajas de los materiales según ASTM C33 [26]: a) Agregado grueso Tipo I; b) Agregado fino Tipo I; c) Agregado grueso Tipo II; d) Agregado fino Tipo II.

2.2. Mezcla de Hormigón

Se realizaron cuatro combinaciones de hormigón utilizando cemento tipo GU, las cuales denominadas mezclas P21, P28, SA21 y SA28, producidos según la norma NTE INEN 490 [14], manteniendo una densidad media de 2916 kg/cm³ [13].

Las mezclas denominadas P21 y P28 tienen resistencias de 21MPa y 28MPa, respectivamente, utilizando agregado Tipo I (Pintag). Las mezclas SA21 y SA28 también tienen resistencias de 21MPa y 28MPa, respectivamente, pero utilizando agregado Tipo II (San Antonio).

Se usó el método ACI para diseñar las mezclas y los pesos, se presenta un resumen de los agregados en la Tabla 2 adjuntada.

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

Material para 1 m3 de hormigón [Kg]				
	Mezcla P21	Mezcla P28	Mezcla SA21	Mezcla SA28
Diseño de mezcla	21 MPa	28 MPa	21 MPa	28 MPa
Agua [Kg]	240.00	241.00	244	245
Cemento [Kg]	435.54	513.40	426.00	471.32
Arena [Kg]	901.05	926.07	768.12	494.91
Ripio [Kg]	788.17	788.17	1001.39	991.59
a/c	0.47	0.39	0.48	0.41
Asentamiento [cm]	12	8	11	6
f'c [MPa]	32.00	45.15	23.79	28.43
Coef. Varianza [%]	1.18	0.64	1.14	1.09

Se realizaron ensayos de resistencia a cilindros de hormigón a los 7, 14 y 28 días después del curado, y se observó un aumento en la resistencia a la compresión del hormigón con el paso del tiempo. A los 7 días, la mezcla P21 alcanzó una resistencia a la compresión de 20 MPa, mientras que la mezcla SA21 mostró una resistencia de 15 MPa. A los 14 días, la mezcla P21 incrementó su resistencia a la compresión a 28 MPa y la mezcla SA21 llegó a los 21 MPa. Finalmente, a los 28 días, la mezcla P21 alcanzó una resistencia a la compresión final de 32 MPa y la mezcla SA21 llegó a los 23 MPa. Estos resultados son consistentes con el diseño de hormigón de 21 MPa, como se muestra en la Figura 3.

En el caso de los hormigones diseñados para una resistencia a la compresión de 28 MPa, se registraron los siguientes resultados en la Figura 3: la mezcla P21 alcanzó una resistencia a la compresión de 29 MPa a los 7 días, mientras que la mezcla SA28 obtuvo una resistencia de 18 MPa. La resistencia a la compresión continuó aumentando gradualmente, a los 14 días la mezcla P28 incrementó su resistencia a 40 MPa y la mezcla SA28 llegó a los 25 MPa. Finalmente, a los 28 días de ensayo, la mezcla P28 alcanzó una resistencia a la compresión de 45 MPa y la mezcla SA28 alcanzó los 28 MPa.

Los resultados indican que el hormigón diseñado para una resistencia a la compresión de 28 MPa también mostró un aumento en la resistencia con el tiempo.

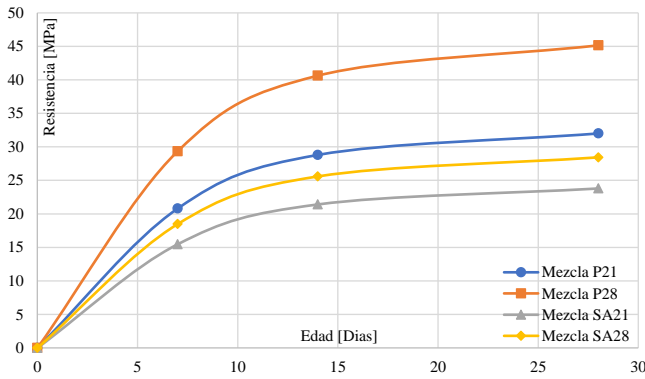


Figura 3. Curva Edad vs Resistencia de las mezclas respectivas.

Al fin de determinar el porcentaje de cada tipo de roca que se encuentra en cada cilindro, se contabilizó la cantidad de agregados gruesos presente en cada uno de los cilindros sometidos a ensayo, utilizando como referencia un tamaño mínimo de tamiz número 4 para separar el árido fino del árido grueso. Los resultados de este conteo se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Distribución de rocas por su tipo en cada mezcla.

Material	Tipos de roca			
	Roja	%	Gris	%
Mezcla P21	259.0	41.1	371.5	58.9
Mezcla P28	284.0	41.6	398.5	58.4
Mezcla SA21	120.0	27.0	324.0	73.0
Mezcla SA28	125.0	28.2	317.5	71.8

En dicho conteo se determinó que existen dos tipos de roca por cada mina, en la mina de Pintag existen rocas lavas andesíticas con hornblenda y plagioclasa las cuales dividimos en dos tipos: el Tipo I es una roca rojiza (PR) parecido a capas en la que se encontraban fallas en su interior y el Tipo II es gris oscuro (PG) de igual manera parecido a capas y es la más resistente de los 4 tipos de roca estudiado.

En la mina de San Antonio había dos tipos de roca las características que compartían ambas son una estructura como de puntos entre ambos tipos y la variable más característica entre el Tipo III y IV es color siendo el Tipo III más rojizo (SAR) mientras que el Tipo IV tomando un color gris más oscuro (SAG), las cuales podemos observar en la Figura 4, donde se encuentran los testigos de roca de cada una de ellas.



Figura 4. Testigos de roca.

Después del conteo previo se observa que la distribución de las mezclas P21 y P28, que pertenecen a la mina de Pintag tiene una proporción casi equiparada entre sus dos tipos de roca, por lo que las propiedades de ambas tienen un impacto similar en la mezcla.

En las mezclas SA21 y SA28, pertenecientes a la mina de San Antonio las rocas grises tienen una mayor proporción a comparación de las rocas rojas, por lo cual las propiedades de dichas rocas no tienen mayor relevancia en el diseño de la mezcla de hormigón.

Por lo cual se procedió a la elaboración de cilindros de pasta de cemento mezclados con árido fino, la cual sirvieron para tomar en cuenta el módulo de elasticidad que estos agregados aportan a la mezcla total de los cilindros, ya que el conteo previo estos se contaban despreciados.

Además, se realizó la elaboración de cilindros de pasta de hormigón, considerando la relación entre agua-cemento calculada para cada una de las mezclas, las cuales fueron de 0.47 y 0.39 para las mezclas P21 y P28 respectivamente, mientras que para las mezclas SA21 y SA28 se tomaron 0.48 y 0.41 para cada una de las mezclas. Dichos cilindros realizados con cada una de estas pastas se los visualiza en la Figura 5 la cual se utilizaron para obtener el módulo de elasticidad de estos.



Figura 5. Cilindros de pasta de hormigón.

2.3. Núcleos de roca

En el estudio se extrajeron núcleos de roca de cada mina y se trasladaron al laboratorio para su posterior extracción cumpliendo con la norma, manteniendo una relación 2:1 entre diámetro y altura de los núcleos, tal y como se muestra en la Figura 4.

Estas probetas, conocidas como testigos, se obtienen comúnmente mediante el empleo de máquinas perforadoras o de sondeo especializadas. Estas herramientas están diseñadas específicamente para realizar aperturas de orificios de diámetros pequeños en la roca, permitiendo la extracción de testigos continuos.

La realización de sondeos rotativos con recuperación de testigos continuos según la Figura 6 la cual se realiza de acuerdo con la norma ASTM D7401 [15], lo que permite la obtención de testigos con diámetros que varían desde los 45 hasta los 70mm.

Es importante destacar que la obtención de testigos de roca estandarizados es una práctica común en la ingeniería y es fundamental para la toma de decisiones en la planificación y diseño de diferentes proyectos.



Figura 6. Extracción de Núcleos de Roca con la utilización de la máquina universal.

2.4. Metodología de ensayos

2.4.1. Módulo de elasticidad de hormigón

Los modelos de hormigón fueron ensayados mediante la norma ASTM C469-02 [16] y mientras que los núcleos de roca fueron ensayados mediante la norma ASTM D7012 [17], así como se utilizaron dos métodos diferentes para el cálculo de módulo de elasticidad en los modelos de hormigón.

El primero de ellos es mediante anillo de medición como se ve la Figura 7 y el segundo utilizando galgas extensiométricas como se ve en la Figura 8, este método también fue utilizado para los núcleos de roca ya que estas se pueden usar en muestras de menor tamaño.

En los modelos de hormigón de mezcla completa se utilizó los anillos de medición previo a esto se realizó el cálculo de la compresión ya que se necesita conocer el 20 % y el 80% para precarga y carga máxima del ensayo del Módulo de Elasticidad (E_c).

La carga aplicada será constante de 241 +/- 34KPa/s se tomó las mediciones transversales y longitudinales cada 20 KN.



Figura 7. Método tradicional utilizando anillos de medición para calcular módulo de elasticidad.

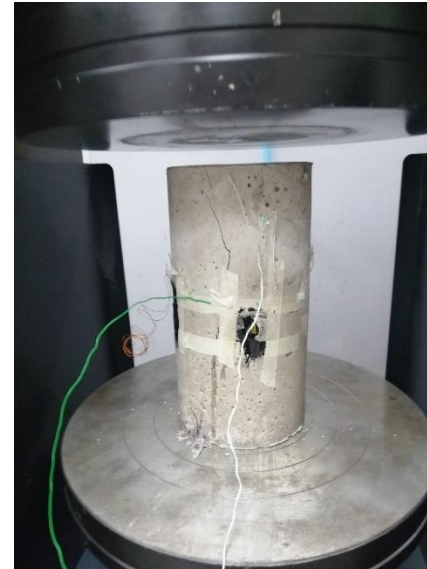


Figura 8. Método utilizando galgas extensiométricas para calcular módulo de elasticidad.

2.4.2. Módulo de elasticidad de núcleos de roca y pasta de cemento

Para los modelos de pasta de hormigón y agregado fino con pasta se utilizaron galgas extensiométricas, previo al ensayo se realizó un alizado de la zona de colocación para evitar fallos con liga número 260 primero y luego con número 400 con una gasa se aplica desengrasante (alcohol isopropílico), catalizador (ácido fosfórico), una vez seco se delimita la superficie de contacto con cinta en la medición y se usó un pegamento epoxico para colocar las galgas.

En la norma ASTM D7012[17], existen 4 métodos: El método A mide la resistencia a la compresión triaxial de muestras de núcleo de roca no drenadas sin mediciones de la presión de poros. El método B calcula el módulo de elasticidad de muestras de núcleo sin drenar en compresión triaxial sin mediciones de la presión de poros.

Mientras que el método C determina la fuerza de compresión uniaxial de las muestras de núcleo de roca intacta, la deformación en este método no se mide de manera convencional por lo que no hay curva tensión-deformación. El método D mide los módulos elásticos de muestras de núcleo de roca en compresión uniaxial.

Durante el ensayo se utilizó el método D para los núcleos de roca también se utilizó el mismo proceso de colocación de galgas extensiométricas que los cilindros de hormigón

3. Resultados y Discusión

Realizados los ensayos de módulo de elasticidad del hormigón, mediante el método de anillos se analizan los datos resultantes. Estos se graficaron visualizados en la Figura 9, así como los gráficos desde la 50 millonésima deformación hasta el 40% del esfuerzo máximo.

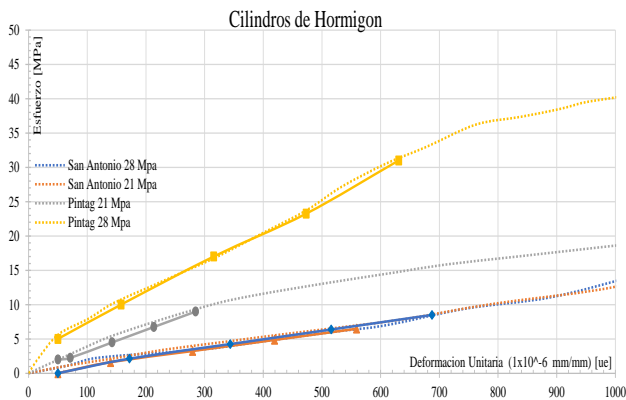


Figura 9. Resultados obtenidos de los ensayos cilindros de hormigón.

En la Figura 10, se encuentran las gráficas obtenidas del ensayo de Módulo de Elasticidad de los Núcleos de Roca (E_a), para cada tipo de ronca encontrado en las minas de San Antonio y Pintag

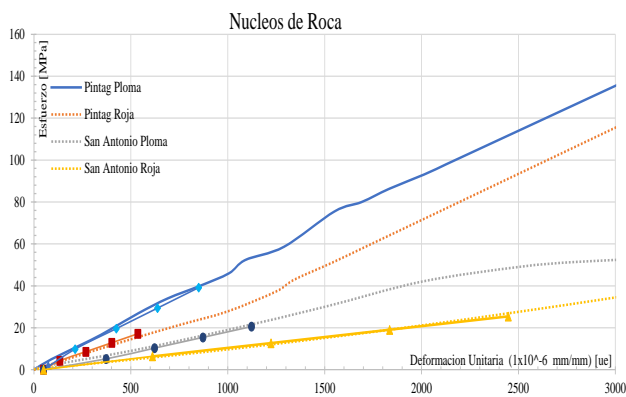


Figura 10. Resultados obtenidos de los ensayos en núcleos de roca.

En el conteo del tipo de arido grueso se desprecio el arido fino, por lo que se realizaron cilindros de arido fino mas pasta de cemento. Los siguientes resultados expresados en la Figura 11, serán analizados para tomar en cuenta solo el Módulo de Elasticidad del Arido Fino (E_f).

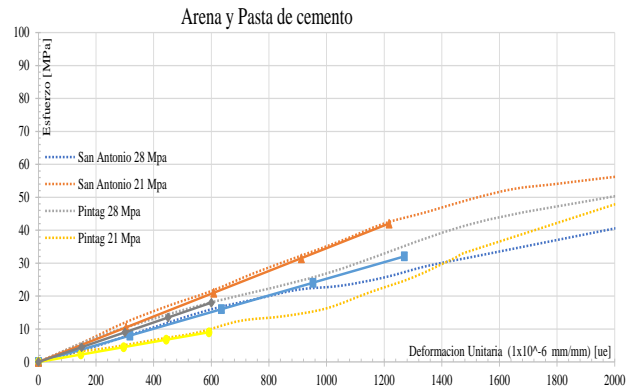


Figura 11. Resultados obtenidos de los ensayos en la pasta de hormigón mas arido fino.

Para el diseño de las mezclas solo se utilizo un tipo de cemento, por lo que el valor del Módulo de Elasticidad de la Pasta de Cemento (E_p) dependera de la variacion en la relacion agua-cemento y estos valores se observan en la Figura 12.

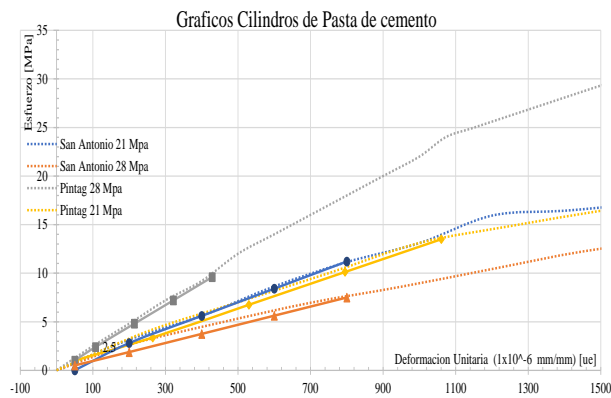


Figura 12. Resultados obtenidos de los ensayos en la pasta de hormigón.

Analisis del módulo de elasticidad del hormigón

Para obtener el módulo de elasticidad experimental del hormigón ($E_{c_{exp}}$) con los datos de las curvas se calcula con una precision de 50000 psi, utilizando el 40% del esfuerzo ultimo menos el esfuerzo equivalente 1 en 50 millones de deformacion (Δesf) dividido a la deformacion equivalente al 40% del esfuerzo ultimo menos la deformacion 0.00005 (Δdef). En la Tabla 4 se observa un resumen de los datos calculados de $E_{c_{exp}}$ para cada mezcla diseñada.

Tabla 4. Tabla módulo de elasticidad experimental

Material		Tipos de Mezcla			
Mezclas	Unidades	Mezcla P 21	Mezcla P 28	Mezcla SA 21	Mezcla SA 28
Δ_{def}	ue	0,0007	0,0018	0,0014	0,0017
Δ_{esf}	MPa	15,8448	47,3484	20,3860	27,63
E_{cexp}	GPa	22,2789	26,8143	14,3847	16,0261

CoMParativa del Ec con ecuaciones existentes

Para el cálculo del módulo de elasticidad normalmente se utiliza la ecuación:

$$Ec1 = 4700 * \sqrt[2]{f'c} \text{ (GPa)} \quad \text{Eq. [1]}$$

Obtenida de la norma ASTM-C469[16], en la Tabla 5 se observa la variación que tienen los valores de E_{cexp} con respecto a los calculados utilizando la Ec1.

Tabla 5. Tabla E_{cexp} vs Ec1

Mezclas	E_{cexp}	Ec1
P 21	22,279	26,587
P 28	26,814	31,581
SA 21	14,385	22,924
SA 28	16,026	25,060

En la Figura 13 se observa como los valores se alejan de la línea debido a que la formula Eq. 1 no funciona de manera exacta con los valores calculados en los ensayos del laboratorio, provocando que los resultados se disparen.

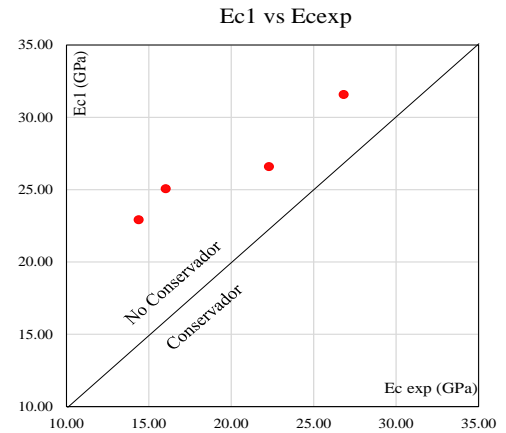


Figura 13. E_{c1} vs E_{cexp} .

Se aprecia como al utilizar la Eq 1 los valores de Ec se disparan de manera exagerada reafirmando que dicha formula no función para los agregados del Ecuador, ya que está diseñada para agregada de Estados Unidos. Esto puede dar lugar a que al obtener Ec mediante esta expresión estaríamos cometiendo errores.

El módulo de elasticidad de los agregados (Ea) se obtuvo mediante el conteo de cada tipo de roca como se ve en Tabla 3 y el Ea de cada roca, con estos valores se puede saber el Ea para las minas estudiadas. En la Tabla 6 se observa los Ea tanto para la mina de San Antonio si como la mina de Pintag.

Tabla 6. Tabla Módulo de elasticidad de los agregados.

Material		Tipos de roca			
Mezclas	Unidades	PR	PG	SAR	SAG
Δ_{def}	ue	0.0012	0.0022	0.0028	0.0062
Δ_{esf}	MPa	42.79	97.92	51.46	63.49
E_a	GPa	33.65	45.02	18.38	10.27
Ea total		40.36		16.19	

Con los datos de $f'c$ y E_a podemos utilizar la formula:

$$Ec2 = 1.15 \cdot \sqrt[3]{E_a} \cdot \sqrt{f'c} \text{ (GPa)} \quad \text{Eq. [2]}$$

Obtenida de la norma NEC-SE-HM [18], la ecuación Eq.2 es mucho más exacta que la Eq.1 ya que no solo toma en cuenta los valores de $f'c$, sino que también utiliza los valores de E_a . En la Tabla 7

podemos observar los valores de Ec2 utilizando los datos de Ea y f'c obtenidos en los ensayos.

Tabla 7. Tabla Módulo de elasticidad utilizando la Eq.2

Mezclas	Ea (GPa)	f'c (MPa)	Ec2 (GPa)
P 21	40.36	32.00	22.31
P 28	40.36	45.15	26.51
SA 21	16.19	23.79	14.19
SA 28	16.19	28.43	15.51

En la Figura 14 se ve que los valores tienen una relación más lineal, a lo que se refiere que tienen unos valores similares ya que al utilizar la ecuación Eq. 2 permitiéndonos ser más exactos al calcular Ec2 debido a que se utiliza el Ea del agregado utilizado.

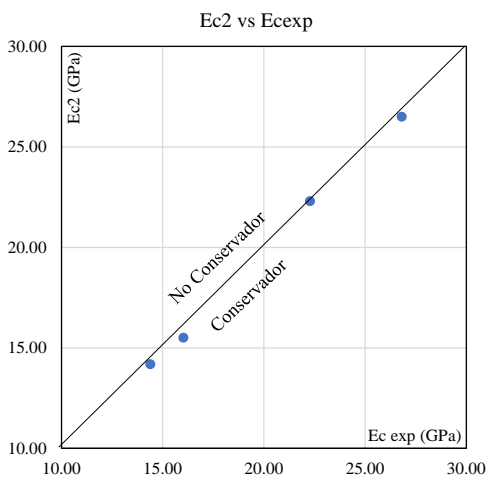


Figura 14. Ec2 vs Ecexp.

También se realizó el cálculo del módulo de elasticidad del hormigón utilizando las fórmulas:

$$Ec3 = 3.98 \cdot \sqrt{f'c}(GPa) \quad \text{Eq. [3]}$$

$$Ec4 = 4.47 \cdot \sqrt{f'c}(GPa) \quad \text{Eq. [4]}$$

$$Ec5 = 2.57 \cdot \sqrt{f'c}(GPa) \quad \text{Eq. [5]}$$

$$Ec6 = 3.07 \cdot \sqrt{f'c}(GPa) \quad \text{Eq. [6]}$$

Las cuales corresponden a 2 ecuaciones para la mina de San Antonio y la de Pintag, las cuales se obtuvieron de tesis anteriores [19], [20], [21], [22].

En la Tabla 8 podemos observar los valores obtenidos utilizando estas ecuaciones, al ser estas ecuaciones ajustadas para el agregado de cada mina se ve que los valores son mucho más parecidos a los obtenidos en los ensayos.

Tabla 8. Módulo de elasticidad utilizando la Eq.3-Eq.4-Eq.5-Eq.6

Mezclas	f'c (MPa)	Ec3 (GPa)	Ec4 (GPa)	Ec5 (GPa)	Ec6 (GPa)
P 21	32.00	22.51	25.28	-	-
P 28	45.15	26.74	30.04	-	-
SA 21	23.79	-	-	12.54	14.97
SA 28	28.43	-	-	13.70	16.37

En la Figura 15 se observa se los puntos se encuentran alejados de su línea de tendencia, debido que con una formula se obtiene valores similares a los ensayados, mientras que la otra tiene una variación aproximada de 3 GPa.

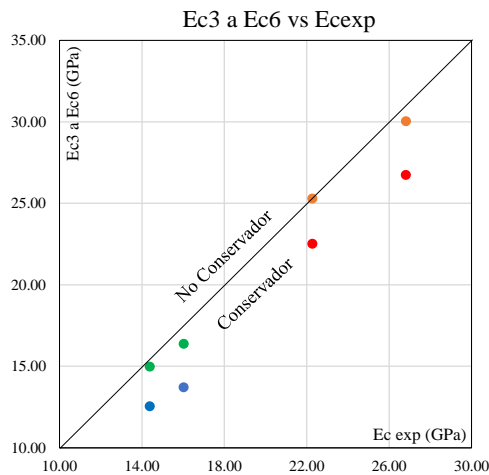


Figura 15. Ec3 a Ec6 vs Ecexp.

Utilizando las ecuaciones Eq.1 y Eq.2 se realizó una igualación despegando el valor de Ea, con esto se calculó el valor de módulo de elasticidad de forma teórica (Ea_{teo}), en la Tabla 9 se observa los valores obtenidos de Ea_{teo} y se puede apreciar que estas no tiene un gran variación con respecto a los valores de Ea obtenidos con los ensayo.

Tabla 9. Tabla coMParativa Ea con Eateo.

Mezclas	f'c (MPa)	Ea (GPa)	Ecexp (GPa)	Eateo (GPa)
P 21	32.00	40.36	22.28	40.17
P 28	45.15	40.36	26.81	41.78
SA 21	23.79	16.19	14.38	16.87
SA 28	28.43	16.19	16.03	17.85

En la Figura 16 comprobamos que el Ea obtenido coincide con el Eateo resultado de la igualdad anterior, siguiendo estos también una tendencia entre los valore de cada mina.

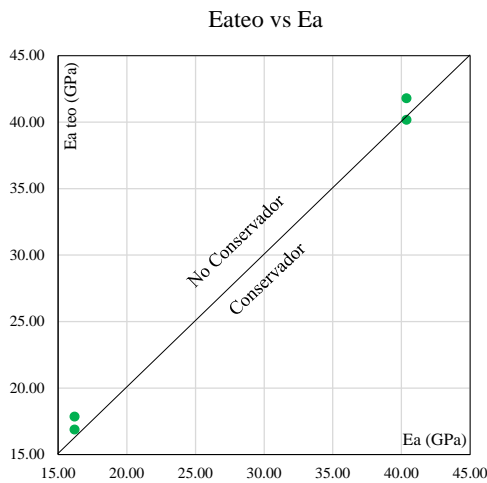


Figura 16. Eateo vs Ea.

Influencia del módulo de elasticidad de los materiales en Ec

Con el diseño de cada mezcla de determino el porcentaje de cada material utilizado, con este porcentaje se define la proporción de influencia que tiene cada material en el módulo de elasticidad de los cilindros, en este cálculo de descarto el porcentaje del agua debido a dificultad del cálculo de módulo de elasticidad de esta.

Tabla 10. Porcentaje de influencia de cada material

Mezclas	P 21 (%)	P 28 (%)	SA 21(%)	SA 28 (%)
Grueso	37.09	35.38	45.61	50.65
Fino	42.41	41.57	34.99	25.28
Cemento	20.50	23.05	19.40	24.07
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

Con los porcentajes de influencia podemos calcular el módulo de elasticidad que aporta cada

material al Ec pero primero se necesita conocer el módulo de elasticidad de la pasta de cemento (Ep) así como el módulo elasticidad del árido fino (Ef), el Ep se obtiene de los datos de la Tabla 10 para los cuales se mantuvo la misma relación agua cemento y las proporciones de la mezcla que se observar en la Tabla 3. En la Tabla 11 podemos ver un resumen de los resultados del Ep.

Tabla 11. Resultados módulo de elasticidad pasta de cemento.

Material		Tipos de Mezcla			
Mezclas	Unidades	P 21	P 28	SA 21	SA 28
Δdef	ue	0.003	0.004	0.002	0.003
Δesf	MPa	22.96	24.02	17.29	16.36
Ep	GPa	8.00	6.65	7.27	6.19

En la Tabla 12 se ve los resultados de Módulo Elasticidad de Árido Fino más Pasta de Cemento (Eap) así como el valor calculado de módulo de elasticidad de árido fino (Ef). El Ef se obtuvo mediante cálculos utilizando los porcentajes de la Tabla 10 así como los valores de Eap, se procedió con este método por la imposibilidad de realizar solo cilindros de árido fino.

Tabla 12. Resultados módulo de elasticidad de árido fino y pasta coMParada con módulo de elasticidad de árido fino.

Material		Tipos de Mezcla			
Mezclas	Unidades	P 21	P 28	SA 21	SA 28
Δdef	ue	0.00137	0.0033	0.0033	0.0015
Δesf	MPa	33.16	80.14	67.24	31.80
Eap	GPa	24.17	24.14	20.47	21.14
Ef	GPa	16.29	15.53	13.17	13.17

Multiplicando los porcentajes de influencia para el módulo de elasticidad de cada material se obtienen los valores de módulo de elasticidad que aporta cada material y sumando estos valores se obtiene un Ec (Ec%). En la Tabla 13 se resumen los resultados de estos cálculos de Ec y se observa que el valor obtenido con los diseños de 21 MPa de ambas minas no tiene una gran variación mientras que los valores de las mezclas de 28 MPa tienen una disparidad de 4 GPa aproximadamente con respecto a los datos de Ec_{ex} en ambos casos.

Tabla 13. CoMParación E_{exp} y E_c mediante porcentaje de influencia de materiales.

Material	Tipos de Mezcla			
	P21 (GPa)	P 28 (GPa)	SA 21 (GPa)	SA 28 (GPa)
Grueso	14.97	14.28	7.38	8.20
Fino	6.91	6.46	4.61	2.74
Cemento	1.64	1.53	1.41	1.49
Ec%	23.52	22.27	13.40	12.43
Ecexp	22.28	26.81	14.38	16.03

La Figura 17 se comprueba que obteniendo el módulo de elasticidad mediante los porcentaje se verifica un error considerable con respecto al E_{exp} , ya que muchos factores quedan fuera del análisis realizados.

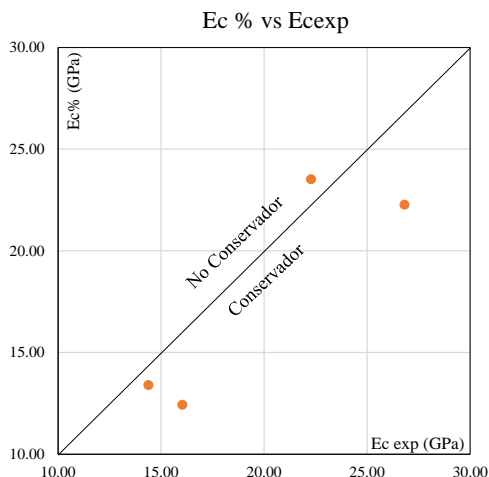


Figura 17. E_c % vs E_{cexp} .

Ecuación propuesta

Con todos los datos obtenidos de los ensayos y cálculos de E_c , E_f y E_p se formula una ecuación general para calcular el módulo de elasticidad del hormigón. En el estudio realizado, se empleó una regresión lineal de la ecuación Eq.2. Mediante un despeje adecuado, se aisló la parte de la raíz cúbica que únicamente depende del módulo de elasticidad del agregado E_a , permitiendo combinarla con la suma de los valores de $E_a + E_p$.

Posteriormente, se aplicó este enfoque al tamizaje de la fórmula para realizar ajustes tanto en Pintag como en San Antonio. El análisis consideró la regresión lineal para obtener conclusiones y establecer relaciones entre las variables estudiadas, buscando así una mejor comprensión de los factores

que influyen en el proceso y permitiendo tomar decisiones informadas para ambas localidades. El resultado de este proceso dio como resultado la siguiente ecuación utilizable tanto para la mina de San Antonio como para Pintag.

$$E_{c7} = 1.085 * \sqrt{f'c} * \sqrt[3]{E_a + E_{a_{pasta}}} \text{ (GPa)} \quad \text{Eq. [7]}$$

Donde:

E_c : Módulo de elasticidad del Hormigón.

E_a : Módulo de Elasticidad del Agregado.

$E_{a_{pasta}}$: Módulo de Elasticidad de la Pasta de Cemento.

$f'c$: Resistencia a la compresión especificada del Hormigón.

La que se basa en el supuesto de que el hormigón tiene las mismas propiedades en todas las direcciones. Sin embargo, este supuesto no siempre es válido, especialmente para hormigones con agregados grueso. La ecuación Eq.7 tiene en cuenta la anisotropía del hormigón al tener en cuenta los diferentes módulos de elasticidad de los agregados y la pasta de cemento.

Con la ecuación propuesta se realiza una coMParación de resultados utilizando los datos obtenidos en los ensayos, en la Tabla 14 podemos ver que los resultados de $E_{a_{exp}}$ con respecto a los valores obtenidos mediante la ecuación Eq.7 tienen una variación máxima de 1.3% de promedio siendo la variación máxima de 5% de la mezcla de Pintag de 28 MPa.

Tabla 14. CoMParación resultados E_{cexp} con los resultados de Eq.7.

Mezclas	$f'c$ (MPa)	E_a (GPa)	E_p (GPa)	E_{c7} (GPa)	$E_{a_{exp}}$ (GPa)
P 21	32.00	40.36	8.00	22.36	22.28
P 28	45.15	40.36	6.65	26.31	26.81
SA 21	23.79	16.19	7.27	15.15	14.38
SA 28	28.43	16.19	6.19	16.30	16.03

En la figura 18 se ve que los valores cumplen una tendencia casi perfecta, debido que al utilizar la ecuación Eq.7 que se ajusta a los agregados de las minas de San Antonio y Pintag nos permite obtener

unos valores de E_c similares a los resultados extraídos en los ensayos.

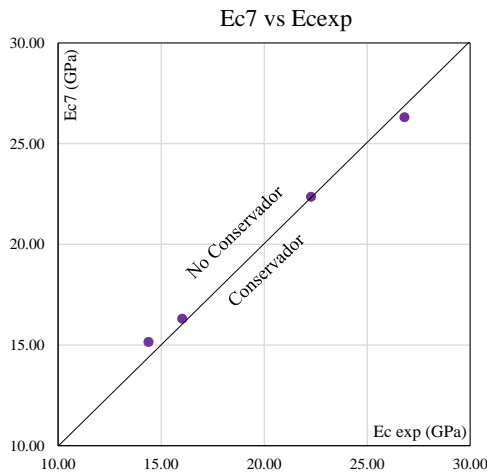


Figura 18. E_{c7} vs $E_{c\text{exp}}$.

4. Conclusiones

El módulo de elasticidad de los agregados de San Antonio y Pintag tiene un valor de 16,19 y 40,36 GPa estos difieren del valor recomendado por a la norma ecuatoriana, ya que estos valores difieren dependiendo su origen, así también estos cálculos inexactos afectan directamente a los valores de las propiedades mecánicas que posee el hormigón que se utilizara

Se obtuvieron unos valores de módulos de elasticidad para las muestras propuestas durante ensayo estos valores difieren mucho de los datos obtenidos mediante la ecuación propuesta $4700 * \sqrt[2]{f'c}$, obtenidos de la norma AST-C469. Con esta fórmula reafirmar que esta fórmula no funciona con los agregados del Ecuador, Por lo que se propone la siguiente ecuación:

$$1.085 * \sqrt[2]{f'c} * \sqrt[3]{Ea + Ea_{\text{pasta}}}$$

La cual se propone para las minas de Pintag y San Antonio. Se comprobó funcionalidad con datos obtenidos en los ensayos, manteniendo una relación estable con las ecuaciones propuestas por la NEC.

Al obtener los valores de los ensayos se define, que el módulo de elasticidad de nuestras mezclas depende en su gran mayoría sobre el agregado grueso, debido que este afecta aproximadamente un 45% al E_c , mientras el árido fino aporta

aproximadamente un 35% y a su vez la pasta de cemento aportar un aproximado en un 20% al módulo de elasticidad total. Con estos resultados se concluye que el módulo de elasticidad obtenidos de los agregados y la relación agua-cemento aportan en su gran mayoría al módulo de elasticidad resultante del hormigón, ya que un valor erróneo en estos datos puede suponer una variación considerable en el valor del módulo de elasticidad calculado.

Referencias

- [1] H. Cabrera, "Módulo de elasticidad de hormigones de peso normal empleados en el Ecuador $f'c$: 21, 24, 28, 35 MPa.," Proyecto de titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2014.
- [2] A. Yanca, "Módulo estático de elasticidad del hormigón con base a su resistencia a la compresión ($f'c = 28$ MPa), fabricado con materiales de la mina San ramón, ubicada en la parroquia de Mulaló en la provincia de Cotopaxi y cemento Chimborazo", Tesis de Grado, Univ. Central del Ecuador, 2013.
- [3] J. A. Calderón, "Determinación del módulo de elasticidad del hormigón hidráulico de ($f'c$ 21 y 24) MPa, con árido de la cantera Agre S.A del cantón Portoviejo", Tesis de Grado, Univ. Estatal del sur de Manabí, 2021.
- [4] J. Serpa, D. Vásquez, "Determinación del módulo de elasticidad y la resistencia a compresión del hormigón en función de la variabilidad y caracterización de los agregados", Tesis de Grado, Univ. De Cuenca, 2018.
- [5] S. Herrería, F. Villegas, "Módulos de elasticidad y curvas de esfuerzo deformación, en base a la compresión del hormigón a 21, 28, 35 MPa", Tesis de Grado, Escuela Politécnica del Ejercito, 2008.
- [6] NTE INEN 696, "Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso", Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, 2011.
- [7] NTE INEN 872, "Áridos para hormigón. Requisitos", Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, 2011.

- [8] NTE INEN 860, “Áridos, Estandarización del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37,5 mm mediante el uso de la máquina de los Ángeles”, Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, 2011.
- [9] NTE INEN 857, “Áridos. Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del árido grueso.” Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, 2010.
- [10] NTE INEN 856, “Áridos. Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del árido fino.” Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, 2010.
- [11] NTE INEN 858, “Áridos, Determinación de la Masa Unitaria (Peso Volumétrico) y el Porcentaje de Vacíos,” Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, 2010.
- [12] NTE INEN 862, “Áridos para hormigón. Determinación del contenido de humedad” Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, 2011.
- [13] ASTM C33-03, “Especificación estándar para agregados para concreto”, American Society for Testing and Materials, United States, 2003.
- [14] NTE INEN 490, “Cementos hidráulicos compuestos,” Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, 2011.
- [15] ASTM D7401, “Standard Test Methods for Laboratory Determination of Rock Anchor Capacities by Pull and Drop Tests,” American Society for Testing and Materials, United States, 2008.
- [16] ASTM C469-02, “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression,” American Society for Testing and Materials, United States, 2002.
- [17] ASTM D7012-14e1, “Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures,” American Society for Testing and Materials, United States, 2004.
- [18] NEC-SE-HM, “Estructuras de hormigón armado”, Norma Técnica Ecuatoriana, Quito, 2015.
- [19] A. R. Borja and J. D. Guanopatin, “Determinación del módulo de elasticidad del hormigón para la región de quito d.m, utilizando agregados de la mina de Pintag y cemento Selvalegre con resistencias a la compresión esperadas de 210, 280 y 350 kg/cm²”, Tesis de Grado, Pontífice Universidad Católica del Ecuador, 2022.
- [20] I. Jiménez and A. Valladares, “Determinación del módulo de elasticidad del hormigón para la región de quito d.m, utilizando agregados de la mina de Pintag y cemento Selvalegre con resistencias a la compresión esperadas de 210, 280 y 350 kg/cm²”, Tesis de Grado, Pontífice Universidad Católica del Ecuador, 2019.
- [21] A. Guamán and D. Orozco, “Influencia de fibras de yute como parte de los agregados del hormigón para la determinación del módulo elástico”, Tesis de Grado, Universidad Politécnica Salesiana, 2022.
- [22] D. Asmal; J. Ocaña; A. Perdomo and J. Pérez, “Estudio del módulo de elasticidad estático del hormigón en base a la resistencia a la compresión ($f'c= 21, 28$ MPa) fabricado con material de la mina de Pintag”, Tesis de Grado, Universidad Central del Ecuador, 2012.