



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA MATRIZ CEMENTANTE EN EL MÓDULO DE
ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN, EMPLEANDO AGREGADOS OBTENIDOS DE LAS
MINAS: SAN ANTONIO, GUAYLLABAMBA, PINTAG Y PIFO**

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

AUTORES: Jairo Julio Grefa Grefa
Jhimson David Umajinga Ante

TUTOR: Francisco Roberto Ortiz Navas

Quito - Ecuador
2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Jairo Julio Grefa Grefa con documento de identificación N°1500573942 y Jhimson David Umajinga Ante con documento de identificación N°0504583071; 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, 10 de agosto del 2023

Atentamente,



Jairo Julio Grefa Grefa
1500573942



Jhimson David Umajinga Ante
0504583071

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

Nosotros, Jairo Julio Grefa Grefa con documento de identificación N°1500573942 y Jhimson David Umajinga Ante con documento de identificación N°0504583071; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Evaluación del efecto de la Matriz cementante en el Módulo de Elasticidad del Hormigón, empleando Agregados obtenidos de las Minas: San Antonio, Guayllabamba, Pintag y Pifo”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de; Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando a la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos concedidos 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, 10 de agosto del 2023

Atentamente,



Jairo Julio Grefa Grefa
1500573942



Jhimson David Umajinga Ante
0504583071

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Francisco Roberto Ortiz Navas con documento de identificación N°1717631244, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA MATRIZ CEMENTANTE EN EL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN, EMPLEANDO AGREGADOS OBTENIDOS DE LAS MINAS: SAN ANTONIO, GUAYLLABAMBA, PINTAG Y PIFO, realizado por , Jairo Julio Grefa Grefa con documento de identificación N°1500573942 y Jhimson David Umajinga Ante con documento de identificación N°0504583071, 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, 10 de agosto del 2023

Atentamente,



Ing. Francisco Roberto Ortiz Navas,PhD.

1717631244

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA MATRIZ CEMENTANTE EN EL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN, EMPLEANDO AGREGADOS OBTENIDOS DE LAS MINAS: SAN ANTONIO, GUAYLLABAMBA, PINTAG Y PIFO

EVALUATION OF THE EFFECT OF THE CEMENTING MATRIX ON THE MODULE OF ELASTICITY OF CONCRETE, USING AGGREGATES OBTAINED FROM THE MINES: SAN ANTONIO, GUAYLLABAMBA, PINTAG AND PIFO

Jairo Grefa-Grefa¹, Jhimson Umajinga-Ante²

Resumen

Durante varios años, la NEC ha utilizado ecuaciones basadas en el módulo de elasticidad obtenido del ACI. Estas ecuaciones se han investigado y ajustado para cumplir con los requisitos de cada zona de estudio. Sin embargo, debido a la falta de información sobre la relación entre el módulo de elasticidad del hormigón y la matriz cementante, en este artículo se compararon los módulos de elasticidad de cuatro minas y cuatro tipos de cemento diferentes para una resistencia de 24MPa. Se llevó a cabo la caracterización de los agregados de las minas y se realizaron 16 mezclas de hormigón con relaciones agua/cemento de 0.488 y 0.502. También se tuvieron en cuenta varias relaciones a/c para la pasta de cemento. El resultado fue una resistencia a la compresión simple máxima de 57.36 MPa. Utilizando galgas extensiométricas se obtuvieron los módulos de elasticidad de las pastas con los diferentes tipos de cemento. Al comparar los valores teóricos y experimentales del módulo de elasticidad, se observó que no difieren mucho entre sí. Además, se verificó que a menor relación a/c, mayor es el módulo de elasticidad de la pasta de cemento, independientemente del tipo de cemento. También se observó que el comportamiento de la pasta de cemento es lineal y que el cemento tipo GU tiene un mejor comportamiento. Sin embargo, en conjunto con el hormigón, el cemento tipo HE proporciona una mayor resistencia.

Abstract

For several years, NEC has used equations based on the modulus of elasticity obtained from ACI. These equations have been investigated and adjusted to meet the requirements of each study area. However, due to the lack of information on the relationship between the concrete elasticity module and the cement matrix, this article compared the elasticity modules of four mines and four different cement types for a strength of 24MPa. The mine aggregates were characterized and 16 concrete mixtures with water/cement ratios of 0.488 and 0.502 were made. Several a/c ratios for cement pulp were also taken into account. The result was a maximum single compression strength of 57.36 MPa. Using strain gauges, the elasticity modules of the pastes were obtained with the different types of cement. When comparing the theoretical and experimental values of the modulus of elasticity, it was observed that they do not differ much from each other. In addition, it was verified that the lower a/c ratio, the higher the modulus of elasticity of the cement paste, regardless of the type of cement. It was also observed that the behavior of cement paste is linear and that GU type cement has a better behavior. However, in conjunction with concrete, HE type cement provides greater strength.

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

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

Autor para correspondencia: jgrefag@est.ups.edu.ec¹; jumajingaa@est.ups.edu.ec²

Palabras Clave:

Matriz cementante, a/c, galgas extensiométricas,
NEC, ACI.

Keywords: Cementing matrix, a/c, strain gauges,
NEC, ACI.

1. Introducción

En Ecuador se han adoptado ecuaciones basadas en el ACI, para determinar el valor del módulo de elasticidad del hormigón, lo que ha dado origen a la norma ecuatoriana de la construcción (NEC).

El módulo de elasticidad es una propiedad de gran importancia, ya que muestra la relación entre el esfuerzo y la deformación del material [1]. Es decir, que a mayor esfuerzo mayor será su deformación, no obstante éstas características deben mantenerse en la zona de fluencia la cual se deforma bajo una tensión constante.

Diversos factores afectan al módulo de deformación, como la edad del hormigón, la humedad de la probeta, velocidad de carga, la composición del hormigón y el tipo de agregado utilizado [2].

Al analizar estos factores, permite alcanzar la resistencia óptima o esperada, considerando el proceso de curado.

El módulo de elasticidad puede variar según la región y lugar de origen de los agregados [3].

Debido a las diferentes propiedades físicas y mecánicas, propias que posee cada zona de extracción de los agregados, el módulo de elasticidad presentará variaciones considerables, esta dependerá directamente del material a utilizarse [4].

Es así que varios autores investigan las propiedades e influencia en el módulo de elasticidad del hormigón. Londoño y Terán [5], obtuvieron aproximaciones estimadas de la ecuación del módulo de elasticidad para la mina de Pifo. Concluyendo que se considera más adecuado el uso de la ecuación del módulo de elasticidad conseguida para la zona específica de estudio, en lugar que la especificada por la normativa.

Es decir, la ecuación obtenida con los materiales de la zona de estudio refleja las condiciones reales de los materiales pétreos, tanto sus características físicas como mecánicas existentes en las minas de la parroquia de Pifo.

Por otra parte, hay que indicar que la matriz cementante es uno de los componentes más importantes del hormigón, ya que es la que mantiene unida a los agregados. La mezcla típica consiste en pasta de cemento, agregados y agua [6].

Teniendo en cuenta que uno de los factores que influyen mayormente en la pasta de cemento es la relación agua/cemento.

Vélez [7]; en su investigación sobre la variabilidad del módulo de elasticidad del concreto convencional en el diseño de estructuras, observa que la curva esfuerzo-deformación de pasta de cemento es lineal, mientras que el concreto se encuentra entre las curvas del cemento y el agregado, siendo el agregado el que presenta mayor módulo de elasticidad como se muestra en la Figura 1.

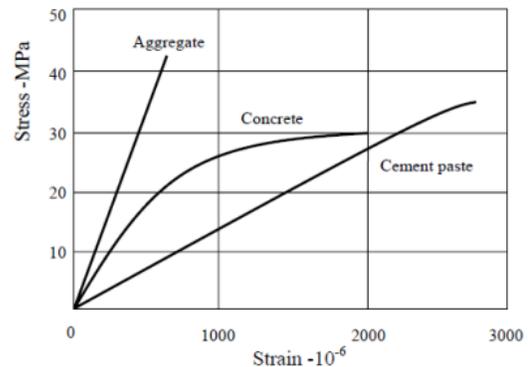


Figura 1. Relaciones esfuerzo-deformación para pasta de cemento, agregados y concreto.

Existe en literatura escasa información sobre el módulo de elasticidad de pastas y como estas afectan al módulo de elasticidad del hormigón.

Basados en este contexto el presente trabajo intenta evaluar la influencia de la pasta en el módulo de elasticidad del hormigón, elaborando probetas cilíndricas de hormigones de resistencia $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$, con agregados de cuatro minas y cuatro tipos de cementos comerciales: GU, HE, MS, HS de la marca Holcim.

Se inicia con la caracterización de las propiedades mecánicas de los agregados de las minas: San Antonio, Guayllabamba, Pifo y Pintag utilizando normativa nacional.

Recopilar los datos necesarios de los cuatro tipos de cementos en fichas técnicas publicados por la empresa fabricante, posteriormente diseñar cuatro tipos de mezclas para cada una de las minas, mediante el método de diseño de mezcla ACI 211, el cual dependerá directamente del tipo de material y tipo de cemento.

Las mezclas son ensayadas a los 28 días de

curado para obtener las propiedades de su resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y módulo de rotura basándose en ensayos según normativas establecidas en el Ecuador.

2. Materiales y Métodos

Para el análisis comparativo entre la pasta de cemento y el módulo de elasticidad fue preciso la utilización de agregados de cuatro minas San Antonio, Guayllabamba, Pifo y Pintag y cuatro distintos tipos de cementos GU, HE, MS, HS.

2.1. Agregados

Los agregados utilizados en la investigación se encuentran en minas dentro de la provincia de Pichincha, facilitando la obtención de los agregados de distintas minas por la cercanía en las que estas se encuentran.

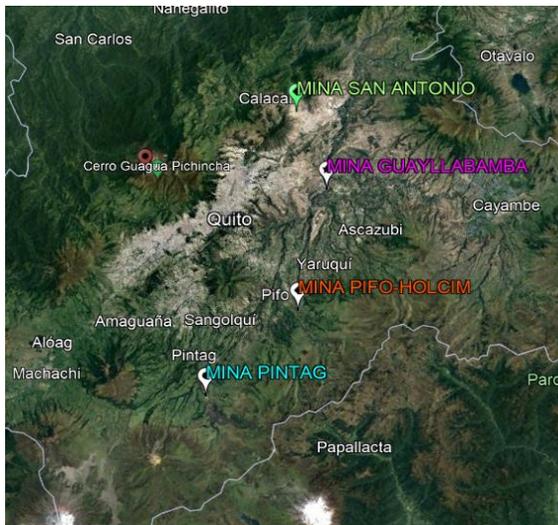


Figura 2. Minas Pifo, Pintag, San Antonio y Guayllabamba

2.1.1. Caracterización De Los Agregados

Se ha caracterizado los agregados y se realiza los siguientes ensayos:

Homogenización y reducción de muestra para árido fino y grueso. Según la NTE INEN 695 [8], se precede a seleccionar una muestra representativa de los áridos obtenidos de las cuatro minas, para luego homogenizar y reducir dichas muestras.

Con los valores de las masas obtenidos y mediante las fórmulas de este método de ensayo

según NTE INEN 856 y 857 [9], se calcula la densidad, la densidad relativa y la absorción de los agregados.

Las Masas unitarias compactadas del árido se determinan mediante NTE INEN 858 [10], se calcula los vacíos entre las partículas en condición suelta o compactada para árido fino o grueso.

Mediante la NTE INEN 860 [11], se obtiene la degradación del árido grueso, mediante la pérdida de su masa por impacto utilizando la máquina de los ángeles.

Análisis granulométrico en árido grueso y fino Según la NTE INEN 696 [12]. Se determina la distribución, el porcentaje, de diferentes tamaños de los agregados con una muestra representativa de cada mina.

Empleando la norma ASTM C40 [13], se determina la presencia de impurezas orgánicas en agregados finos.

Los resultados de los ensayos para la caracterización de los agregados de distintas minas se presentan en la tabla 1. Las curvas granulométricas de los agregados fino y grueso se muestran en la figura 3 y 4.

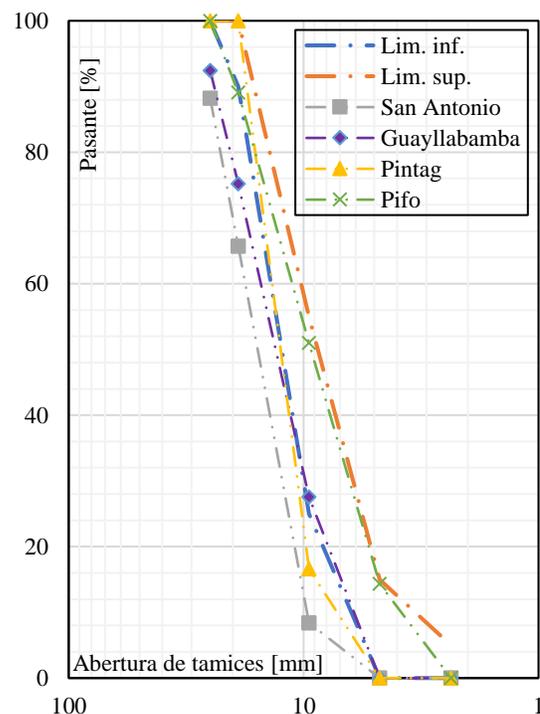


Figura 3. Curva granulométrica del agregado grueso.

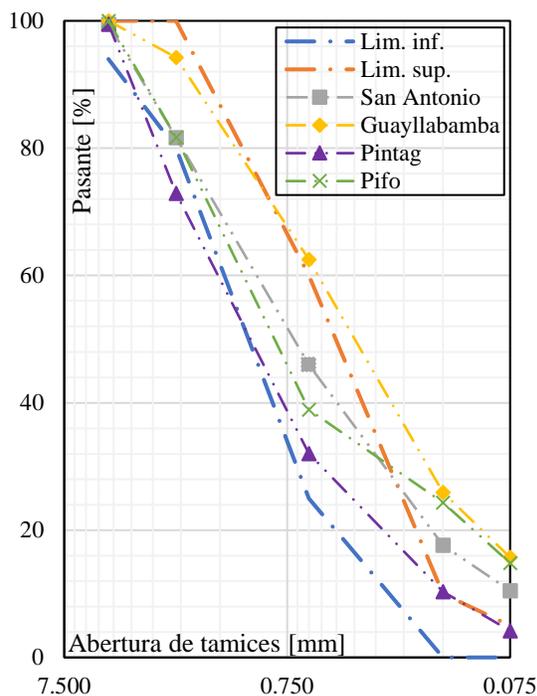


Figura 4. Curva granulométrica del agregado fino.

2.2. Cemento

Se han empleado cuatro tipos de cementos fabricados según la norma INEN 2380: GU, HE, MS, HS [14].

El cemento tipo GU, de uso general (pavimentos, pisos, puentes, etc.). Cemento tipo MS, con resistencia moderada al ataque de los sulfatos. Su aplicación es similar al cemento portland tipo II. Cemento tipo HS, alta resistencia a la acción severa de sulfatos. Su aplicación es similar al cemento portland tipo V. Cemento tipo HE ofrece alta resistencia inicial [6].

Para el diseño de mezcla de cilindros y vigas de hormigón se utiliza la densidad del cemento, el cual varía entre 2.9 y 3.15 ton/m^3 dependiendo del tipo de cemento y se determina mediante lo establecido en las normas NTE INEN 56 o su referencia ASTM C180 [15].

2.3. Diseño De Mezclas

Para el diseño de la mezcla se ha empleado la metodología de diseño ACI 211, debido a que, en

la caracterización de los agregados, estas se encuentran dentro de las recomendaciones establecidas por las normas.

Tabla 1. Caracterización de las minas de San Antonio, Guayllabamba, Pintag y Pifo

Parámetro	Unidad	San Antonio	Guaylla bamba	Pintag	Pifo
Peso específico (Ripio)	g/cm^3	2.53	2.51	2.84	2.75
Peso específico (Arena)	g/cm^3	2.73	2.63	2.66	2.73
Absorción (Ripio)	%	3.01	3.81	1.23	2.44
Absorción (Arena)	%	0.38	0.83	4.15	0.86
Peso Unitaria (Ripio)	g/cm^3	1.42	1.41	1.33	1.43
Peso Unitaria (Arena)	g/cm^3	1.69	1.72	1.53	1.71
Desgaste a la abrasión	%	51.60	50.18	25.25	28.90
Contenido de orgánicos	u	1	2	1	1

Las dosificaciones de las 4 minas con 4 diferentes tipos de cemento se muestran en la Tabla 2, en donde se puede observar que la relación agua/cemento, cambia respecto a la resistencia que se propone, varía entre 0.488 y 0.516.

Para el diseño definitivo, se inicia con ensayos a compresión a los 7 días de curado, para comprobar resistencia a temprana edad, es decir se ensaya 3 probetas con agregados de cada mina, con respecto a las minas Pifo y Pintag cumplieron con lo establecido a la resistencia a temprana edad (60%), sin embargo en los diseños de San Antonio y Guayllabamba estas no cumplen con los requerimientos necesarios, entonces se decide reajustar el diseño aumentando la resistencia para cumplir con lo establecido según normativa.

2.4. Configuración de ensayos

Se han elaborado 5 probetas de cilindros de dimensiones 300x150mm, 4 probetas de cilindros de dimensiones 200x100mm, 2 probetas de vigas de dimensiones 150x150x540mm para cada tipo de mezcla. En general se han realizado 16 tipos de mezclas.

Tabla 2. Dosificación mezcla.

	Áridos por m ³ de hormigón (kg)											
	Mezcla GU				Mezcla MS				Mezcla HS y HE			
	San Antonio	Guaylla bamba	Pintag	Pifo	San Antonio	Guaylla bamba	Pintag	Pifo	San Antonio	Guaylla bamba	Pintag	Pifo
Agua	183.84	222.61	208.49	217.53	182.33	221.98	208.08	217.24	182.12	221.90	208.03	217.19
Cemento	442.26	442.26	429.94	429.94	442.26	442.26	429.94	429.94	442.26	442.26	429.94	429.94
Arena	885.95	805.37	975.30	916.91	912.03	830.74	1000.55	942.81	915.66	834.27	1004.07	946.41
Árido grueso	756.21	781.67	705.18	764.42	756.21	781.67	705.8	764.42	756.21	781.67	705.18	764.42
a/c	0.488	0.488	0.502	0.502	0.488	0.488	0.502	0.502	0.488	0.488	0.502	0.502
Densidad cemento	2920	2920	2920	2920	3120	3120	3120	3120	3150	3150	3150	3150
f'c de diseño (kg/cm ²)	260	260	240	240	260	260	240	240	260	260	240	240

Para la elaboración de especímenes de cilindros y vigas de concreto se utiliza la norma NTE INEN 1576, para la preparación de la pasta de cemento se basa en la norma NTE INEN 155.



Figura 5. Elaboración de probetas de cilindros y vigas de hormigón

2.4.1. Resistencia a la compresión del hormigón

El valor de f'c (resistencia a la compresión) se utiliza generalmente como indicador de la calidad del concreto [16].

Se realiza 4 probetas de dimensiones estándar (200x100mm) con 4 tipos de mezcla. Posteriormente se realiza ensayo a compresión según la norma NTE INEN 1573. La resistencia a la compresión (f'c) se visualiza en la Tabla 3.



Figura 6. Ensayo a compresión simple de cilindros de hormigón.

Tabla 3: Resistencia a la compresión (f'c) a los 28 días de las minas: San Antonio, Guayllabamba, Pintag y Pifo

Mezcla	GU	HS	MS	HE
	MPa	MPa	MPa	MPa
San Antonio	30.30	31.49	40.94	39.27
Guayllabamba	28.15	31.38	36.63	39.70
Pintag	38.03	39.66	52.60	53.54
Pifo	40.82	42.23	57.36	54.44

2.4.2. Resistencia a compresión de la pasta de cemento

En el ensayo de la pasta de cemento se realiza probetas cúbicas de 50x50x50mm, el cual será ensayado a compresión simple a la edad de 28 días, tomando en cuenta el contenido de cemento y de la relación agua-cemento [17].

Se realiza ensayo previo de la pasta de cemento con el ensayo de determinación de la consistencia normal (Método de Vicat) mediante la norma NTE INEN 157 [18]. Esto se lo realiza con el fin de establecer una relación agua cemento (a/c) de partida y llegar a la relación a/c que se utiliza en las dosificaciones de las minas con los cuatro tipos de cementos.



Figura 7. Ensayo de consistencia, elaboración de cubos de pasta de cemento-ensayo a compresión simple.

Tabla 4. Resistencia a la compresión a los 28 días de la pasta de cemento

Cemento	Resistencia	a/c	Temperatura	Humedad
	MPa			
GU	63.35	0.28	17.4	66
HS	71.64	0.28	18.3	62
MS	76.02	0.26	18.5	62
HE	83.42	0.26	18.2	64

2.4.3. Módulo de elasticidad del hormigón

Se determina mediante ensayos a compresión utilizando anillos de sujeción (extensómetro). A la edad de 28 días se extrae 2 especímenes de dimensiones 300x 150mm de cada tipo de mezcla, comprobar las dimensiones de las probetas y colocar los anillos de sujeción en distancias

marcadas, para proceder a ensayar a compresión simple, antes aplicando una precarga inicial, corrigiendo cualquier comportamiento inusual de los anillos de sujeción. Para aplicar así el segundo ciclo de carga, siendo la velocidad constante (velocidad del ensayo 0.250 MPa/s), se registra los datos sin interrupción de carga, la carga y la deformación longitudinal [8]. Mediante la ecuación (1) se determina el módulo de elasticidad experimental del hormigón.

$$E_c = \frac{0.4\sigma - \sigma_{0.00005}}{\varepsilon_{0.4\sigma_{max}} - 0.00005} \quad (1)$$

A fin de verificar los resultados obtenidos del ensayo del módulo de elasticidad mediante anillos de sujeción, se optó por otro método de ensayo, el cual consiste en ensayar un cilindro de dimensiones 300x150mm a compresión simple de cada tipo de mezcla con dos tipos de cemento (GU y HS), con la ayuda de galgas extensiométricas, el cual posee los siguientes parámetros: resistencia 120 ohmios, factor de galga 2.1 y de dimensiones 6.6x3.4mm.

Con respecto a los ensayos mediante el uso de galgas extensiométricas se presenta en la figura 9, realizadas con 2 tipos de cemento de 4 minas.

Se obtiene el módulo de elasticidad teórico y módulo de elasticidad teórico mediante módulo de elasticidad de los agregados. Mediante las ecuaciones establecidas por la NEC-SE-HM [19].

$$E_c = 4.7 * \sqrt{f'c} \quad (2)$$

$$E_c = 1.15 * \sqrt[3]{E_a} * \sqrt{f'c} \quad (3)$$



a) Anillos de sujeción b) Galgas extensiométricas
Figura 8. Ensayo compresión simple-módulo de elasticidad

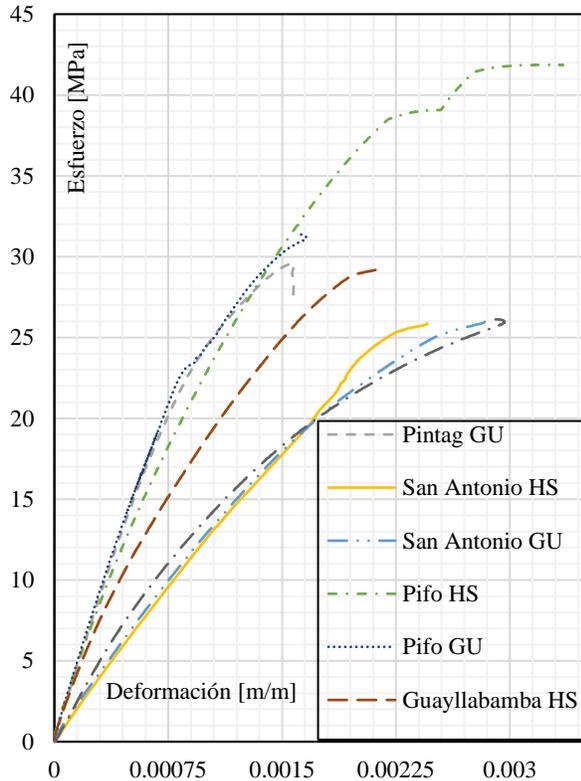


Figura 9. Curva esfuerzo vs deformación del hormigón a los 28 días mediante galgas extensiométricas

2.4.4. Módulo de elasticidad de la pasta de cemento

Se ensayan a los 28 días de curado, 2 probetas cilíndricas de dimensiones 100x50mm con relaciones agua/cemento de 0.30, 035, 040, 045 y 0,50 mediante galgas extensiométricas adheridas a dos caras de la superficie de la probeta cilíndrica. A velocidad constante (velocidad del ensayo 0.250 MPa/s), se registra los datos sin interrupción de carga, la carga y la deformación longitudinal.

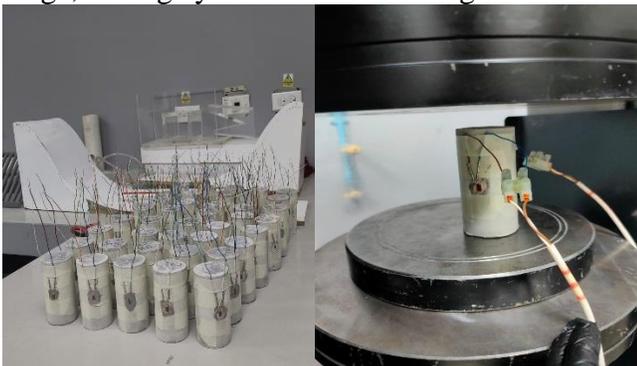


Figura 10. Ensayo compresión simple-modulo de elasticidad en pasta de cemento

2.4.5. Resistencia a la flexión (Módulo de rotura)

La resistencia a la flexión se expresa como el Módulo de Rotura y es determinada mediante los métodos de ensayo ASTM C78 (cargada en los puntos tercios) [20]. Se ensaya 2 vigas de hormigón de cada tipo de mezcla, de dimensiones 150x150x540mm a flexión, aplicando carga en cada tercio de la luz del espécimen.

Obteniendo los módulos de roturas para los 16 tipos de mezclas como se muestra en la Tabla 5.



Figura 11. Ensayo a flexión en viga de hormigón.

Tabla 5. Módulo de Rotura de las minas: San Antonio, Guayllabamba, Pintag y Pifo

Mezcla	GU	HS	MS	HE
	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²
San Antonio	54.25	55.64	66.18	63.77
Guayllabamba	49.54	53.05	63.54	64.93
Pintag	79.18	79.59	90.66	103.43
Pifo	73.27	72.71	86.25	100.51

3. Resultados y Discusión

Para el estudio del efecto de la matriz cementante en el módulo de elasticidad del hormigón se emplearon ensayos previos de los agregados, en la figura 3 y 4 se puede apreciar el análisis granulométrico de los agregados. Las minas de Pifo y Pintag se encuentran dentro de los límites establecidos por norma a excepción de un tamiz, las minas de San Antonio y Guayllabamba no se encuentran dentro de los límites de la curva.

3.1. Resistencia a la compresión en cilindros de hormigón.

Con respecto a la resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón en estado endurecido diseñado para una resistencia de 24MPa y 26MPa, en la tabla 3 se visualiza valores superiores a la resistencia esperada. Los hormigones aumentaron considerablemente la resistencia en todas las mezclas.

Con agregados obtenidos de la mina Guayllabamba se tiene una resistencia de 28,15 MPa empleando cemento tipo GU, siendo la resistencia más baja de todas las mezclas, para la mezcla con agregados de la mina de Pifo y con cemento tipo MS, la resistencia aumenta significativamente llegando a 57,36 MPa teniendo así la resistencia más alta. Las resistencias del hormigón, dependerá su gran porcentaje del tipo de material utilizado y el tipo de cemento empleado.

3.2. Resistencia a la compresión de pasta de cemento.

Mediante probetas cúbicas de pasta de cemento se ensayó a los 28 días de curado, empleando relación agua cemento a/c 0.26 y 0.28 esta varía dependiendo del tipo de cemento, de la temperatura y la humedad del laboratorio, se verificó la consistencia de la pasta de cemento con NTE INEN, utilizando el aparato de Vicat el cual cumplirá una penetración 10 ± 1 mm. Es así que finalmente se tiene las resistencias ensayadas a compresión simple como se muestra en la Tabla 4.

3.3. Módulo de elasticidad del hormigón

3.3.1. Módulo de elasticidad experimental

A la edad de los 28 días de curado se ensaya mediante anillos de sujeción 3 probetas cilíndricas, 1 probeta a compresión simple obteniendo su carga máxima y 2 probetas a compresión, obteniendo las deformaciones longitudinales de los hormigones, empleando agregados de las minas San Antonio, Guayllabamba, Pintag y Pifo. Como se muestran en las Figuras 12, 13, 14 y 15 respectivamente.

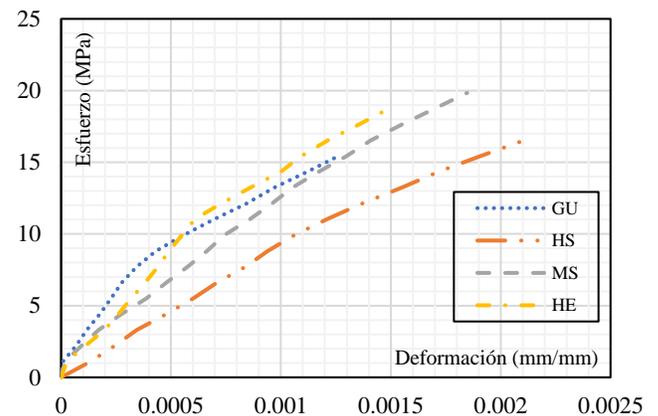


Figura 12. Curva esfuerzo vs deformación del hormigón a los 28 días mediante agregados de la mina San Antonio

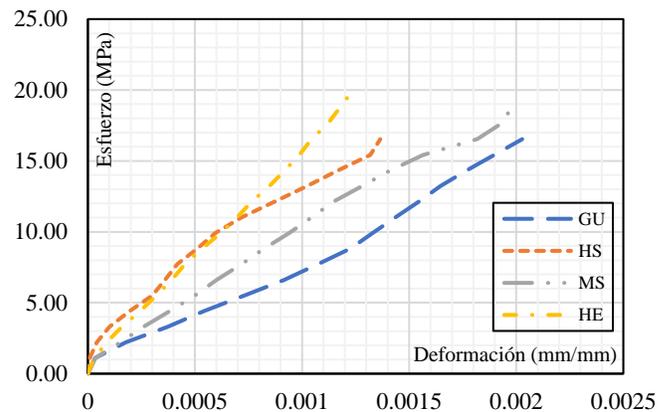


Figura 13. Curva esfuerzo vs deformación del hormigón a los 28 días empleando agregados de la mina Guayllabamba

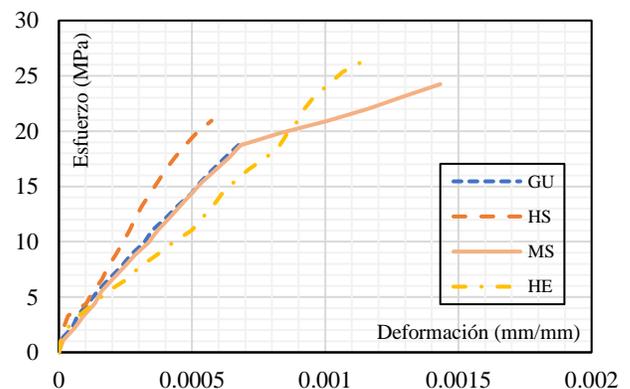


Figura 14. Curva esfuerzo vs deformación del hormigón a los 28 días empleando agregados de la mina Pintag

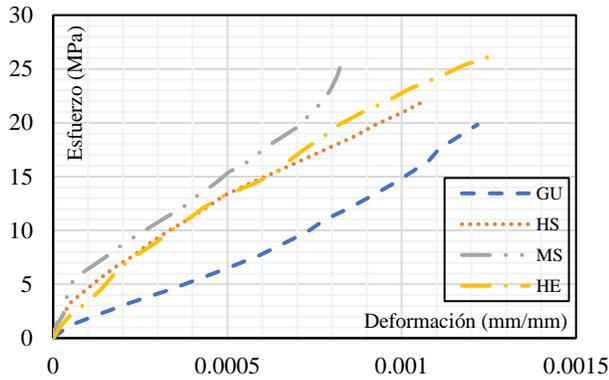


Figura 15. Curva esfuerzo vs deformación del hormigón a los 28 días empleando agregados de la mina Guayllabamba

Con la ayuda de las gráficas, curva esfuerzo vs deformación de cada mina y con diferentes tipos de cemento, se calculó el módulo de elasticidad experimental del hormigón mediante la ecuación (1) como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Módulo de elasticidad experimental mediante anillos de sujeción

Tipo de cemento	GU	HS	MS	HE
Mina	GPa	GPa	GPa	GPa
San Antonio	12.887	12.018	11.314	13.733
Guayllabamba	11.738	12.246	10.3888	14.932
Pintag	27.495	25.3375	22.953	22.129
Pifo	20.698	19.333	23.487	22.343

3.3.2. Módulo de elasticidad teórico

Mediante la ecuación (2), se calcula los módulos de elasticidad teórico de las minas Guayllabamba, San Antonio, Pintag y Pifo. Para posteriormente realizar una comparación con el módulo de elasticidad experimental.

Tabla 6. Módulo de elasticidad teórico

Tipo de cemento	GU	HS	MS	HE
Mina	GPa	GPa	GPa	GPa
San Antonio	26.1795	27.145	30.321	28.576
Guayllabamba	26.555	25.816	28.919	29.393
Pintag	28.855	29.819	32.596	34.038
Pifo	29.085	30.966	33.655	35.111

Para comprobar los módulos de elasticidad del hormigón, en la Tabla 8 presentan los valores de la relación entre el módulo de elasticidad teórico y experimental. Los valores cercanos a uno muestran un resultado confiable.

Si el valor es muy alto, el valor del resultado experimental no se encuentra cercano al valor teórico, como se puede observar en la Tabla 8, todos los valores del módulo de elasticidad son mayores a 1, incluso la mayoría son mayores a 2 y el promedio al uso de la expresión $E_c = 4.7 * \sqrt{f'_c}$ genera módulo de elasticidad 1.84 más grande que el experimental.

Tabla 8. Relación del módulo de elasticidad teórico y experimental

Mina	TIPO DE CEMENTO			
	GU	HS	MS	HE
San Antonio	2.031	2.399	2.680	2.081
Guayllabamba	2.262	2.108	2.784	1.968
Pintag	1.049	1.176	1.420	1.538
Pifo	1.405	1.602	1.433	1.571

También se verifica el resultado experimental del hormigón empleando agregado de la mina Pifo, con respecto al módulo de elasticidad teórico calculado con la ecuación (2); misma que emplea el módulo de elasticidad del agregado (E_a) de 27.2 (GPa) de Pifo obtenido de la NEC-SE-HM, esta comparación se puede observar en la Tabla 9 tenido una similitud entre ellos, es decir los resultados se consideran confiables.

Tabla 9. Módulo de elasticidad teórico y experimental con agregado de la mina de Pifo

Tipos de cementos	Módulo de elasticidad (Mina Pifo)	
	Módulo de elasticidad Teórico	Módulo de elasticidad Experimental
	(GPa)	(GPa)
GU	21.402	20.698
HS	22.787	19.332
MS	24.765	23.487
HE	25.836	22.342

3.4. Módulo de elasticidad de la pasta de cemento

Mediante galgas extensiométricas se ensayó 2 cilindros de pasta de cemento con cada relación agua/cemento, es decir se ensayó 40 cilindros. En las Figuras 16, 17, 18 y 19, se presenta la curva esfuerzo vs deformación, en donde se puede apreciar que cada línea representa una relación agua cemento a/c, teniendo un orden descendente que va desde 0.30 hasta 0.50, independientemente del tipo de cemento. Es decir a mayor relación a/c menor será el módulo de elasticidad de la pasta.

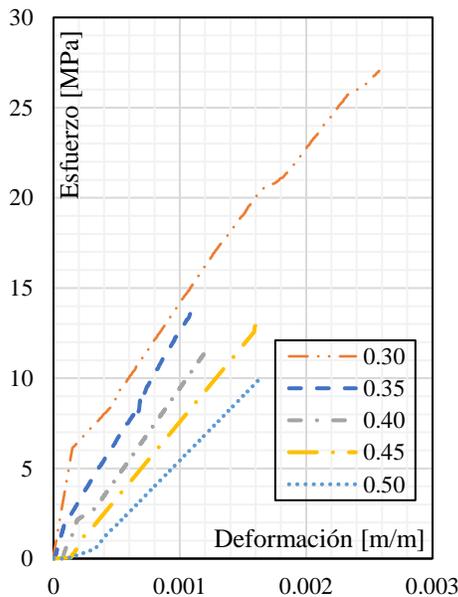


Figura 16. Curva esfuerzo vs deformación de la pasta de cemento tipo GU a los 28 días

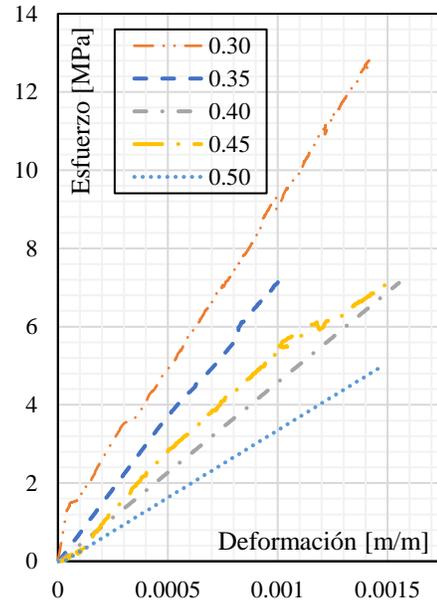


Figura 17. Curva esfuerzo vs deformación de la pasta de cemento tipo HE a los 28 días

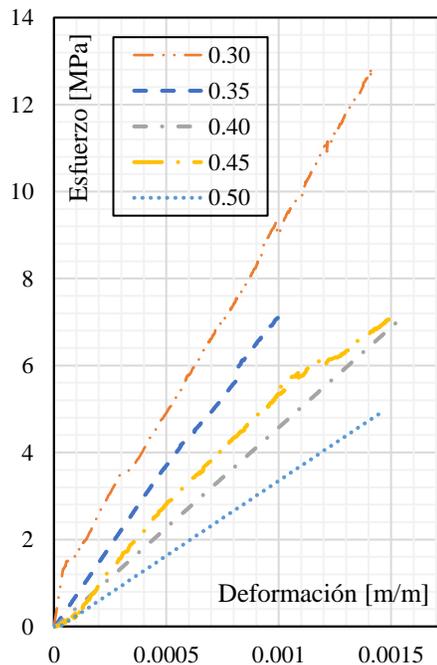


Figura 18. Curva esfuerzo vs deformación de la pasta de cemento tipo HS a los 28 días

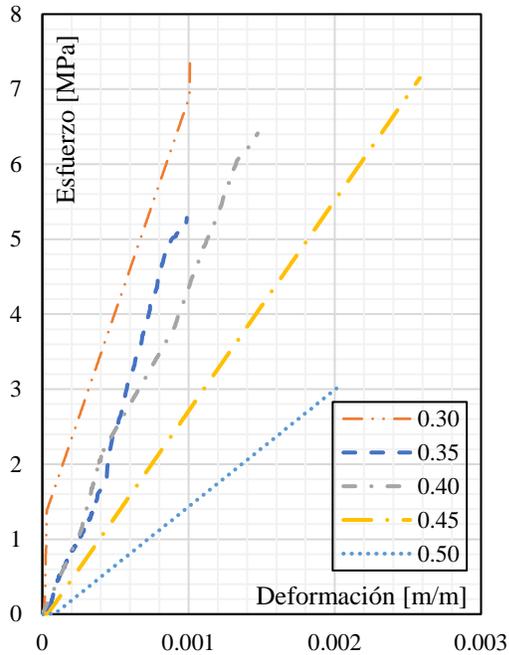


Figura 19. Curva esfuerzo vs deformación de la pasta de cemento tipo MS a los 28 días

Por otra parte en las Figuras 20, 21, 22, 23 y 24 se presenta esfuerzo vs deformación, con relación agua cemento a/c 0.30, 0.35, 0.40, 0.45 y 0.45 respectivamente. En este caso el cemento GU muestra un comportamiento superior con respecto al esfuerzo, es decir el tipo GU mostrará mayor módulo de elasticidad y el cemento MS tendrá módulo de elasticidad menor con respecto a los tipos de cemento, como se muestra en la Tabla 10.

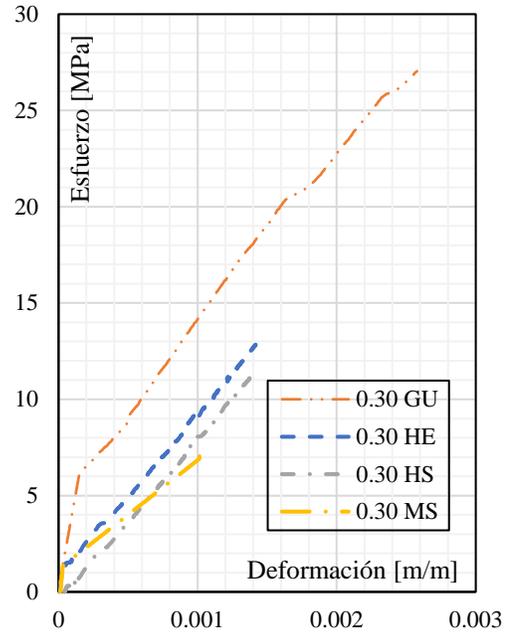


Figura 20. Esfuerzo vs Deformación relación a/c de 0.30

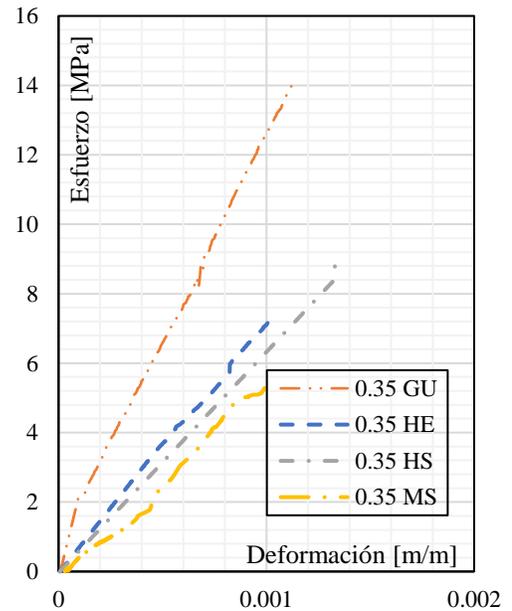


Figura 21. Esfuerzo vs Deformación relación a/c de 0.35

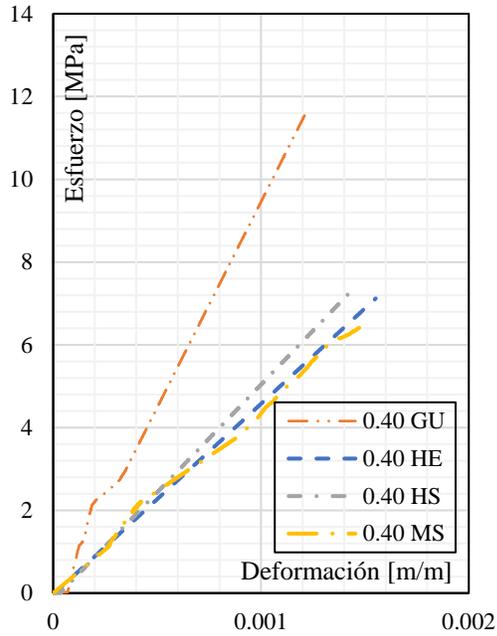


Figura 22. Esfuerzo vs Deformación relación a/c de 0.40

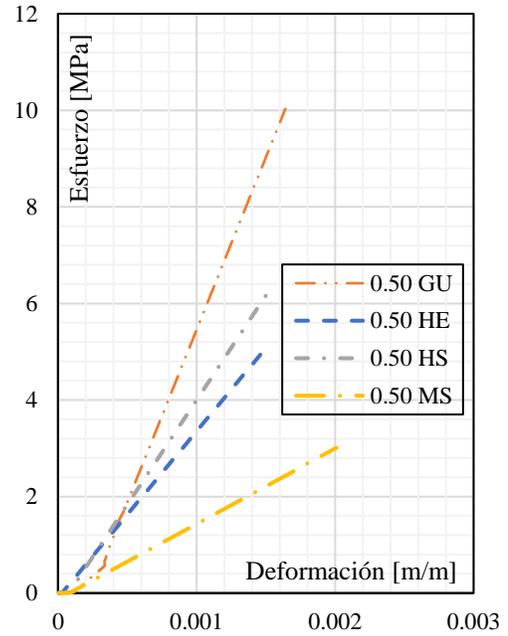


Figura 24. Esfuerzo vs Deformación relación a/c de 0.45

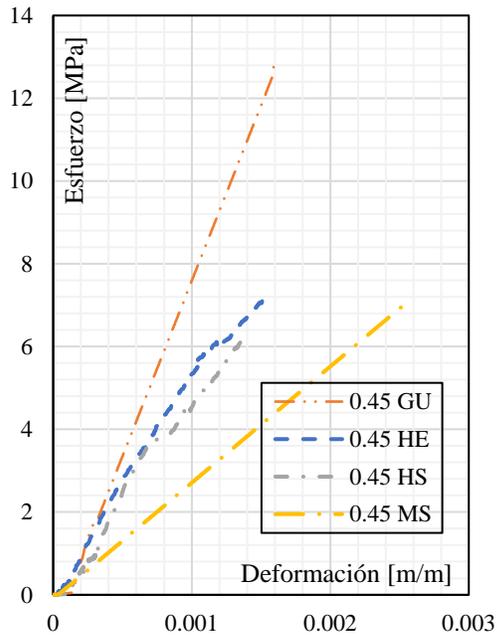


Figura 23. Esfuerzo vs Deformación relación a/c de 0.45

Se determinó el módulo de elasticidad de la pasta de cemento utilizando galgas extensiométricas y mediante la ecuación (1), los resultados se visualiza en la Tabla 10.

Tabla 10. Módulo de elasticidad experimental de la pasta de cemento mediante galgas extensiométricas

Tipo de cemento	GU	HS	MS	HE
Relación agua cemento a/c	MPa	MPa	MPa	MPa
0.30	9344.742	8014.812	7029.973	7786.800
0.35	8474.943	6337.076	4867.522	6409.459
0.40	7338.525	5202.595	3099.090	5573.371
0.45	6492.589	5114.821	2815.66	4955.752
0.50	5318.272	4128.34	1492.938	3457.356

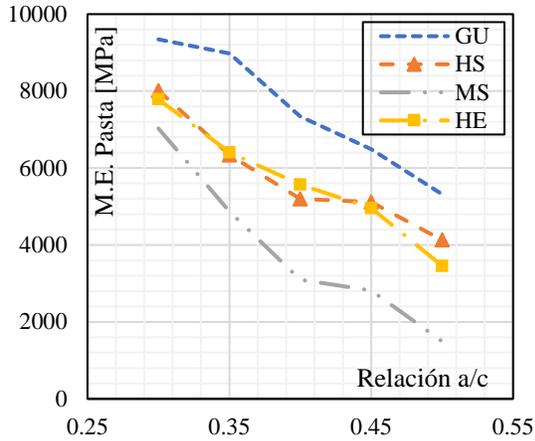


Figura 25. Esfuerzo vs relación agua cemento (a/c)

Mediante la figura 25 se puede comprobar el módulo de elasticidad de la pasta de cemento versus relación a/c, se verifica lo expuesto con anterioridad, que la tendencia se mantiene con cada tipo de cemento y relación a/c.

Se propone la siguiente expresión para la mina de Pifo utilizando el módulo de elasticidad de la pasta de cemento (E_p).

$$E_c = 0.967 * \sqrt{f'c} * \sqrt[3]{Ea + E_p} \text{ (GPa)} \quad (4)$$

Con los datos obtenidos se realiza la comparación de los módulos de elasticidad obtenidos entre el experimental y el teórico mediante la ecuación (1) y la ecuación (2) respectivamente para poder observar su comportamiento como lo indica la Figura 26.

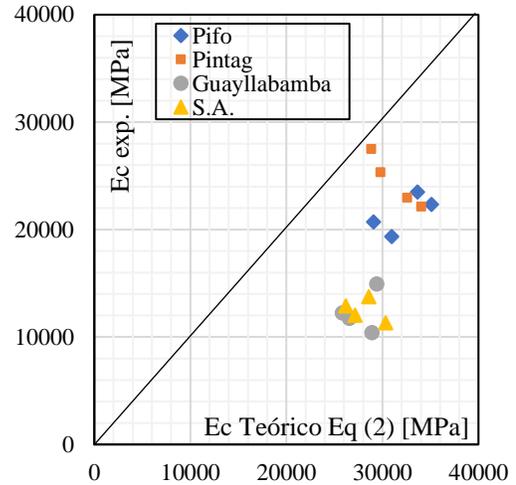


Figura 26. Módulo de Elasticidad experimental vs Módulo de elasticidad teórico.

Se realiza la comparación entre el módulo de elasticidad del hormigón teórico ecuación (3) y experimental de la mina de Pifo y el comportamiento observado nos dice que los valores obtenidos se encuentran muy cercanos al equilibrio entre lo teórico y lo experimental según la Figura 27.

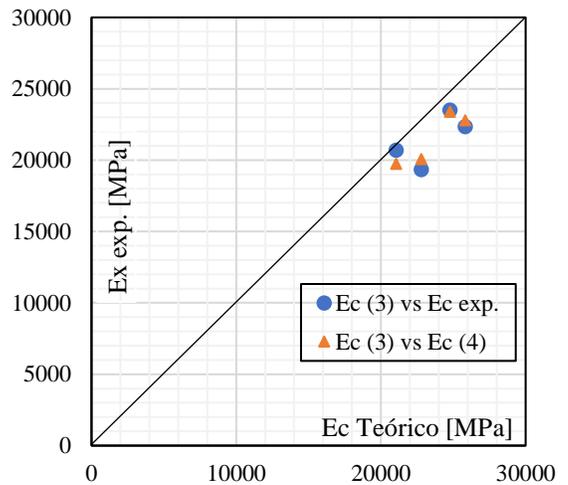


Figura 27. Módulo de Elasticidad del hormigón experimental vs Módulo de elasticidad teórico de la mina Pifo.

Para las minas existentes en la provincia de Pichincha se proponen expresiones para cada una de las minas de las zonas de estudio.

$$E_c = 2.118 * \sqrt{f'c} \text{ (Guayllabamba)}$$

$$E_c = 2.111 * \sqrt{f'c} \text{ (San Antonio)}$$

$$E_c = 3.086 * \sqrt{f'c} \text{ (Pifo)}$$

$$E_c = 3.668 * \sqrt{f'c} \text{ (Pintag)}$$

Así mismo se propone una expresión de uso general para la ciudad de Quito.

$$E_c = 2.746 * \sqrt{f'c} \text{ (GPa)}$$

4. Conclusiones

En la evaluación del módulo de elasticidad del hormigón, se observa que indistintamente del tipo de cemento que se utiliza, módulo de elasticidad es influenciado directamente por la resistencia.

Con el análisis del módulo de elasticidad de la pasta se pudo conocer que a menor relación a/c mayor será el valor del módulo de elasticidad, independientemente del tipo de cemento que se utiliza.

Al observar todas las gráficas relacionadas con la pasta de cemento se conoció que el tipo de cemento GU es el sobresale con un mayor módulo de elasticidad sin importar la relación a/c que contenga.

Al elaborar las probetas de hormigón, la pasta de cemento deja de funcionar de manera independiente con respecto al tipo de cemento, es decir el tipo de cemento GU funciona correctamente en la pasta de cemento, sin embargo en el hormigón el tipo HE presenta mayor resistencia. Debido a que en el hormigón gran porcentaje de la matriz son agregados.

Mediante la comparación obtenida entre el módulo de elasticidad y al resistencia a la compresión, se evidenció que al poseer la misma o similar resistencia a la compresión sin importar el tipo de cemento o mina que se utiliza, los módulos de elasticidad serán similar.

Con respecto a la comparación entre el módulo de elasticidad teórico y experimental de la mina de Pifo utilizando el módulo de elasticidad del agregado de dicha mina, los valores son cercanos entre si, mostrando una

relación de 1.034. Lo que significa que son valores confiables ya que la relación está cercana a 1.

Referencias

- [1] M. Ramirez, «Determinación del módulo de elasticidad de concreto autocompactantes de alta resistencia (70MPa),» *metodos&materiales*, vol. X, n° 12, pp. 12-13, 2020.
- [2] Pereyra, Monfort, Dellepian y Vila, «Módulo de elasticidad del hormigón. Estudio de la influencia del tipo de agregado y ajuste normativo,» *Conpat*, vol. I, n° 11, pp. 3-4, 2019.
- [3] R. Álvarez y S. Pinto, «Caracterización del módulo estático de elasticidad del hormigón elaborado a partir de agregados pétreos y reciclados procedentes de desperdicios de ensayos de compresión en laboratorios,» Proyecto de titulación, Universidad Central del Ecuador, Quito, 2017.
- [4] E. Arequina, W. Cuba, D. Garzón y L. Vargas, «Módulo estático de elasticidad del hormigón en base a su resistencia a la compresión simple $f'c = 21\text{MPa}$ y 30MPa ,» Trabajo de graduación, Universidad Central del Ecuador, Quito, 2012.
- [5] D. Londoño y W. Terán, «Determinación de la ecuación del módulo de elasticidad del hormigón en la provincia de Pichincha elaborado con materiales de la mina Holcim, ubicada en la parroquia Pifo y cemento Holcim,» Proyecto de titulación, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, 2019.
- [6] E. Chele, «Determinación del módulo de elasticidad en hormigones estructurales de 21 y 28 MPa utilizando agregados de la cantera Agresa,» Proyecto de titulación, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, 2019.

- [7] V. Lorenzo, «Revisión bibliográfica sobre la variabilidad del módulo de elasticidad del concreto convencional en el diseño de estructuras,» Trabajo de grado de especialización, Universidad de Antioquia, Medellín, 2018.
- [8] P. Quintana y S. Asintimbay, «Manual de laboratorio de ensayo de materiales para la construcción,» Proyecto de titulación, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2019.
- [9] N. I. 857, «Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del árido grueso,» Quito, 2010.
- [10] N. I. 858, «Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos,» Quito, 2010.
- [11] R. Byron, «Módulo estático de elasticidad del hormigón en base a su resistencia a la compresión ($f_c=24\text{MPa}$), fabricado con materiales de la mina San Ramón, ubicado en la parroquia de Mulaló en la Provincia de Cotopaxi,» Quito, 2013.
- [12] N. I. 696, «Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso,» Quito, 2011.
- [13] C. Ricardo, «Obtención de un hormigón con alta permeabilidad para la utilización en pavimentos, resistencia a flexión de 4MPa , usando materiales de la provincia de Pichincha,» Proyecto de titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2020.
- [14] N. INEN, «Cemento hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos,» Quito, 2011.
- [15] W. Borja y J. Rea, «Análisis comparativo del módulo de rotura en vigas de hormigón simple y vigas reforzadas con fibra de carbono con una resistencia a la compresión de 28MPa utilizando agregados del sector Guayllabamba y cemento holcim tipo HE,» Trabajo de Graduación, Universidad Central del Ecuador, Quito, 2015.
- [16] H. Jessica, «Determinación del módulo de rotura en vigas de hormigón, fabricado con materiales procedentes de la cantera Ramirez, para $f_c= 21\text{Mpa}$,» Trabajo de Graduación, Universidad Central del Ecuador, Quito, 2014.
- [17] M. Mejía, V. Chinchilla y C. Mendoza, «Determinación de la resistencia a la compresión de mortero empleando especímenes cilíndricos y cúbicos, utilizando arena del occidente del país,» Trabajo de graduación, Universidad de El Salvador, Santa Ana, 2012.
- [18] INEN, «Cemento hidráulico. Determinación de la consistencia normal. Método de vicat,» Quito, 2009.
- [19] NEC-SE-HM, «Estructuras de hormigón armado,» Miduvi, Quito, 2015.
- [20] R. M. C. National, «Resistencia a la flexión del concreto,» *National Ready Mixed Concrete*, vol. I, nº 1, p. 2, 2019.