

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Efectos del curado en las propiedades mecánicas
del hormigón con cementos Portland y por desempeño
Trabajo Experimental**

Huiqui Papsi De la Cruz Alta

Ingeniería Civil

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

Quito, 17 de diciembre de 2018

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Efectos del curado en las propiedades mecánicas
del hormigón con cementos portland y por desempeño**

Huiqui Papsi De la Cruz Alta

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Juan José Recalde, Ph.D.

Firma del profesor

Quito, 17 de diciembre de 2018

Derechos de Autor

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

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

Firma del estudiante:

Nombres y apellidos:

Huiqui Papsi De la Cruz Alta

Código:

00107103

Cédula de Identidad:

1003627419

Lugar y fecha:

Quito, diciembre de 2018

RESUMEN

El hormigón como material estructural es de amplio uso en el Ecuador, el cual requiere de un adecuado manejo en edades tempranas para que pueda desarrollar las propiedades mecánicas finales que permitan asegurar su calidad. Para alcanzar tales propiedades es necesario someter al hormigón inmediatamente después del fraguado al proceso de curado, que consiste en mantener al hormigón un adecuado contenido de humedad y temperatura. El periodo de curado que recomienda el ACI 318-14 es de 7 días, y la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15 especifica un curado de 5 a 7 días. Este periodo de curado es adecuado para hormigones fabricados con cemento Portland puro, sin embargo, no es claro si es suficiente para hormigones fabricados con cementos por desempeño o compuestos, que son los cementos de disponibilidad comercial en el Ecuador. En este trabajo experimental se investigó el desarrollo de las propiedades mecánicas de una mezcla convencional de hormigón fabricada con cemento tipo GU (mezcla G) y una mezcla de control fabricada con cemento Portland (mezcla P) con relaciones agua-cemento cercanas a 0.5. Se sometieron probetas a tiempos de curado de 0, 3, 7 y 28 días, y se ensayaron las propiedades mecánicas a edades de 3, 7, y 28 días. Las propiedades mecánicas ensayadas fueron resistencia a la compresión, velocidad de pulso, y número de rebote. A la edad de 180 días se ensayó módulo de elasticidad dinámico, módulo de elasticidad estático, y resistencia a la compresión. La resistencia a la compresión a los 28 días y el módulo de elasticidad estático a los 180 días de las probetas bajo curado estándar fue de 31.0 MPa y 24.0 GPa para la mezcla G, y de 68.5 MPa y 28.2 GPa para la mezcla P. Los resultados muestran que para la mezcla P, a la edad de 28 días, la resistencia a la compresión de los cilindros curados 0, 3 y 7 días fue de 76%, 89% y 97% con respecto a los cilindros bajo curado estándar. Para la mezcla G, a la edad de 28 días, la resistencia a la compresión de los cilindros curados 0, 3, y 7 días fue de 68%, 80% y 88%, con respecto a los cilindros bajo curado estándar. Los resultados de número de rebote y velocidad de pulso tienen un comportamiento similar a los de resistencia a la compresión para ambas mezclas. A la edad de 180 días, la mezcla P incrementó su resistencia a la compresión en hasta un 8%, y sorprendentemente la mezcla G incrementó su resistencia hasta en un 57%. Los resultados muestran que el curado de 7 días fue adecuado para la mezcla con cemento Portland, pero al límite de la aceptabilidad según el ACI318-14 para la mezcla con cemento GU. También se muestra una regresión lineal entre las correlaciones de número de rebote y velocidad de pulso con la resistencia a la compresión

Palabras clave: hormigón, proceso de curado, materiales cementantes suplementarios, propiedades mecánicas del hormigón, cemento Portland, cemento por desempeño.

ABSTRACT

Concrete as a structural material is widely used in Ecuador. It requires a proper management at early ages so that it can develop the desired final mechanical properties that ensure its performance. In order to achieve these properties, it is necessary to put through the concrete, immediately after setting, to the curing process, which consists in maintaining the concrete with an adequate moisture content and temperature. The curing period recommended by ACI 318-14 is 7 days, and the Ecuadorian Construction Standard NEC-15 specifies a cure of 5 to 7 days. This curing period is suitable for concretes made with pure Portland cement, however, it is not clear if it is sufficient for concrete made with performance cements or compounds, which are commercially available cements in Ecuador. In this experimental work the development of the mechanical properties of a conventional mixture of concrete made with GU type cement (G mixture) and a control mixture made with Portland cement (P mixture) with water-cement ratios close to 0.5 was investigated. Test specimens were subjected to curing times of 0, 3, 7 and 28 days, and the mechanical properties were tested at ages of 3, 7, and 28 days. The mechanical properties tested were compression resistance, pulse rate, and bounce number. At the age of 180 days, dynamic modulus of elasticity, static modulus of elasticity, and resistance to compression were tested. The compressive strength at 28 days and the static modulus at 180 days of the specimens under standard curing was 31.0 MPa and 24.0 GPa for the G mixture, and 68.5 MPa and 28.2 GPa for the P mixture. Results show that for the mixture P, at the age of 28 days, the compressive strength of cured cylinders 0, 3 and 7 days was 76%, 89% and 97% regarding the cylinders under standard curing. For mixture G, at the age of 28 days, the compressive strength of the cured cylinders 0, 3, and 7 days was 68%, 80% and 88%, with respect to the cylinders under standard curing. The results of rebound number and pulse velocity had a similar behaviour to those of compression resistance for both mixtures. At the age of 180 days, the P mixture increased its compressive strength by up to 8%, and surprisingly, the G mixture increased its resistance by up to 57%. A linear regression is also shown between the correlations of rebound number and pulse velocity with compressive strength. The results show that the 7-day curing was suitable for mix with Portland cement, but at the limit of acceptability according to ACI318-14 for the mix with GU cement. Also, there is a linear regression between correlations of rebound number and pulse velocity with compressive strength.

Key words: concrete, curing process, supplemental cementitious materials, mechanical properties of concrete, Portland cement, performance cement.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 Antecedentes	12
1.2 Justificación	14
1.3 Objetivos	16
1.4 Actividades	16
1.5 Resultados esperados	17
1.6 Definiciones	17
2. Desarrollo del Tema	19
2.1 Revisión de literatura	19
2.1.1 Química del cemento	19
2.1.1 Curado del hormigón	25
2.1.2 Propiedades mecánicas del hormigón	27
2.1.2.1 Resistencia a la compresión	27
2.1.2.2 Módulo de elasticidad estático y coeficiente de Poisson	28
2.1.2.3 Módulo de elasticidad dinámico	29
2.1.2.4 Ensayos no destructivos	31
2.1.2.4.1 Número de Rebote	31
2.1.2.4.2 Velocidad de pulso ultrasónico	32
2.2 Plan experimental	33
2.2.1 Matriz de experimentos	33
2.2.2 Metodología y Materiales	35
2.2.2.1 Agregados	35
2.2.2.2 Cemento	38

2.2.2.3	Diseño de mezclas.....	38
2.2.2.4	Elaboración de especímenes	38
2.2.2.5	Ensayos de hormigón fresco	39
2.3	Resultados.....	40
2.3.1	Número de rebote.....	40
2.3.2	Velocidad de pulso.....	43
2.3.3	Resistencia a la compresión	46
2.3.4	Resultados a la edad de 180 días.....	48
2.3.4.1	Módulo de elasticidad dinámico	48
2.3.4.2	Módulo de elasticidad estático.....	48
2.3.4.3	Resistencia a la compresión	49
2.4	Análisis.....	52
2.4.1	Efecto del curado en el número de rebote.....	52
2.4.2	Efecto del curado en la velocidad de pulso.....	54
2.4.3	Efecto del curado en la resistencia a la compresión	56
2.4.4	Efecto del curado en el módulo de elasticidad dinámico y estático	60
2.4.5	Correlaciones	60
3.	Conclusiones.....	63
3.1	Conclusiones de Resultados	63
3.2	Recomendaciones	64
4.	Referencias bibliográficas	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Composición química del cemento portland. (INEN 152, 2012)	15
Tabla 2: Composición química de cementos ecuatorianos. (Garófalo, 2015)	16
Tabla 3: Compuestos principales del cemento portland (Neville, 1999	19
Tabla 4: Óxidos y compuestos del cemento portland (Neville, 1999).....	20
Tabla 5: Tipos de cementos portland (INECYC, 2007)	21
Tabla 6: Composición química normalizada del cemento portland (INEN 152, 2012)	22
Tabla 7: Composición química de cementos compuestos (INEN 490, 2012)	22
Tabla 8: Composición del cemento (Holcim, 2015)	23
Tabla 9: Calor de hidratación de los compuestos puros (Neville,1999)	24
Tabla 12: Código de identificación de los grupos de especímenes	35
Tabla 13: Granulometría del agregado grueso	35
Tabla 14: Granulometría del agregado fino	36
Tabla 15: Densidad y absorción del agregado grueso	37
Tabla 17: Resultados de ensayos de hormigón fresco	39
Tabla 18: Número de Rebote de cilindros de hormigón con cemento por desempeño	40
Tabla 19: Número de Rebote de cilindros con hormigón con cemento Portland	41
Tabla 20: Velocidad de pulso de cilindros con hormigón con cemento por desempeño.....	43
Tabla 21: Velocidad de pulso de cilindros con hormigón con cemento Portland	44
Tabla 22: Resistencia a la compresión de cilindros con hormigón con cemento por desempeño.....	46
Tabla 23: Resistencia a la compresión de cilindros con hormigón con cemento Portland.....	46
Tabla 24: Módulo de elasticidad dinámico de cilindros con hormigón con cemento por desempeño.....	48

Tabla 25: Módulo de elasticidad dinámico de cilindros con hormigón con cemento Portland	48
El ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático se realiza según la norma ASTM C469. Se sometieron a esta prueba 16 cilindros, de 180 días de edad de 150 x 300 mm. Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 26 y 27.	48
Tabla 26: Módulo de elasticidad estático de cilindros con hormigón con cemento por desempeño.....	49
Tabla 27: Módulo de elasticidad estático de cilindros con hormigón con cemento Portland..	49
Tabla 28: Resistencia a la compresión de cilindros con hormigón con cemento por desempeño (180 días).....	49
Tabla 30: Datos normalizados al valor de la resistencia a la compresión de hormigón hecho con cemento por desempeño	57
Tabla 31: Datos normalizados al valor de la resistencia a la compresión de hormigón hecho con	58
cemento Portland	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Influencia del curado en la resistencia final del hormigón (Concrete Manual, 1981)	14
Figura 2: Aparato para determinar la resistencia a la compresión (Villagómez, 2016)	28
Figura 2: Aparato para determinar el módulo de elasticidad estático. Laboratorio de Hormigones USFQ: (2018)	29
Figura 3: Esquema del aparato para medir el módulo de elasticidad dinámico. ASTM 215: (2013)	30
Figura 4: Esquema del aparato para medir el módulo de elasticidad dinámico. ASTM 215: (2013)	30
Figura 5: Componentes dl martillo SCHMIDT. Proceq S.A: (2017)	31
Figura 6: Esquema del aparato para medir la velocidad de pulso. ASTM C597: (2013)	33
Figura 9: Granulometría del agregado fino.....	37
Figura 10: Especímenes y curado inicial	39
Figura 11: a) Número de Rebote de cilindros de hormigón con cemento por desempeño b) Número de Rebote de cilindros con hormigón con cemento Portland.....	42
Figura 12: a) Velocidad de pulso de cilindros con hormigón con cemento por desempeño b) Velocidad de pulso de cilindros con hormigón con cemento Portland	45
Figura 13: a) Resistencia a la compresión de cilindros con hormigón con cemento por desempeño b) Resistencia a la compresión de cilindros con hormigón con cemento Portland	47
Figura 14: a) Resistencia a la compresión de cilindros con hormigón con cemento por desempeño b) Resistencia a la compresión de cilindros con hormigón con cemento Portland	51

Figura 15: a) Número de Rebote en porcentaje de cilindros de hormigón con cemento por desempeño, b) Número de Rebote en porcentaje de cilindros de hormigón con cemento portland.....	53
Figura 16: a) Velocidad de pulso en porcentaje de cilindros de hormigón con cemento por desempeño, b) Velocidad de pulso en porcentaje de cilindros de hormigón con cemento Portland	55
Figura 17: a) Resistencia a la compresión en porcentaje de cilindros de hormigón con cemento por desempeño, b) Resistencia a la compresión en porcentaje de cilindros de hormigón con cemento Portland	59
Figura 17: a) Regresión lineal entre la correlación de número de rebote y resistencia a la compresión para cada mezcla, b) Regresión líneas entre la correlación de la velocidad de pulso y resistencia a la compresión, c) Correlación entre el módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a la compresión, d) Correlación entre el módulo de elasticidad estático y la resistencia a la compresión.....	62

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Hoy en día el hormigón se ha convertido en uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción en el Ecuador. Por tal razón se busca que alcance una resistencia adecuada dependiendo del tipo de obra civil en el que se lo está utilizando. Uno de los procedimientos más importantes para que obtener dicha resistencia es que inmediatamente después del fraguado se debe mantener el hormigón completamente saturado o tan cercanamente como sea posible por un periodo establecido, a este proceso se le denomina curado del hormigón.

Según Neville (1999) el curado del hormigón es el proceso de hidratación del cemento mediante el control de temperatura y movimiento de humedad desde la superficie hacia dentro del hormigón. Por otro lado, el ACI308R (2016), menciona al curado del hormigón como una acción en la que permite la hidratación del cemento manteniendo las condiciones de humedad y temperatura del hormigón recién colado. Realizar un buen curado en el hormigón permite que las propiedades del hormigón in-situ, en base a su composición y características, igualen o sobrepasen las propiedades de diseño del hormigón, disminuyendo la pérdida de agua libre, obteniendo un hormigón de buena calidad.

Respecto a requisitos de curado, la Norma Ecuatoriana de la construcción (NEC-SE-HM, 2015) establece: “las superficies expuestas de hormigón que contienen cemento hidráulico deben mantenerse húmedas por el tiempo especificado en cada proyecto. Si no se dispone de esta especificación deben mantenerse húmedas por al menos 5 a 7 días.

Por otro lado, el ACI 318S-14 (2014) establece en el capítulo 26 que “el concreto (excepto para concreto de alta resistencia inicial) debe mantenerse a una temperatura por encima de los 10°C y en condiciones de humedad por lo menos los primeros 7 días después de la colocación”. La razón por la cual se requiere de al menos 7 días de curado se puede apreciar en la Figura 1 donde se muestra conceptualmente la importancia del tiempo de curado en la resistencia a la compresión del material.

La sección 26.5.3.2 del ACI 318-14 (2014) establece que los procedimientos de protección y curado del concreto se deben considerar adecuados si cumplen lo siguiente:

- La resistencia promedio de los cilindros curados en la obra, a la edad de ensayo designada para determinar $f'c$ debe ser al menos igual al 85% de la resistencia de cilindros compañeros curados en forma estándar.
- La resistencia promedio de los cilindros curados en la obra, a la edad de ensayo establecida excede $f'c$ en más de 3.5 MPa.

El desarrollo de las propiedades del hormigón depende también de la composición de sus materiales, en este caso, cemento, agregados y agua que son los materiales principales para su elaboración. En el caso del cemento existen varios tipos como, Portland, compuestos, por desempeño, entre otros. Con respecto al cemento Portland, la mayoría de las investigaciones que se han hecho acerca del proceso de curado están basadas en este tipo de cemento. En el caso de cementos compuestos y por desempeño, que a diferencia del cemento Portland, estos poseen adiciones de materiales cementantes suplementarios en su composición como: escorias de altos hornos, calizas, pizarras, cenizas, arenas, restos de materias cerámicas, entre otros. Estos materiales cementantes suplementarios típicamente reaccionan de manera tardía una vez que se tenga el hidróxido de calcio proveniente como producto de la primera reacción entre el cemento portland y el agua. La pregunta que surge

entonces es ¿el hormigón hecho con este tipo de cementos necesitaría el mismo tiempo de curado?

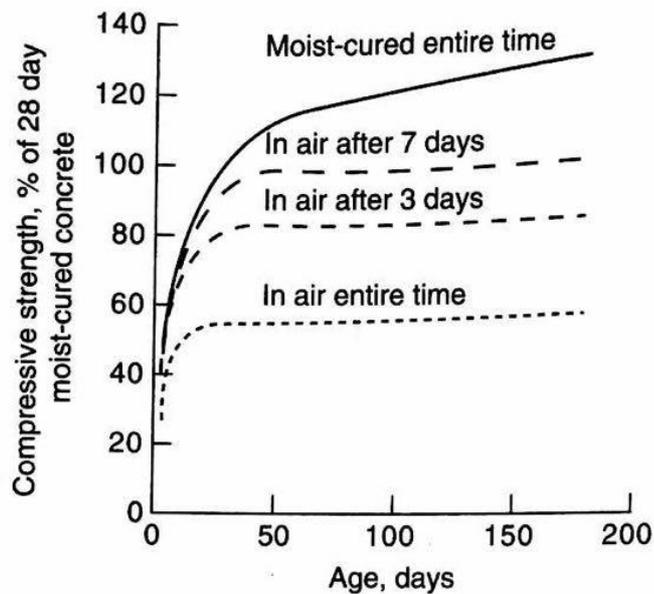


Figure 3-8 Influence of curing conditions on strength. (From *Concrete Manual*, 8th ed., U.S. Bureau of Reclamation, 1981.)

The curing age would not have any beneficial effect on the concrete strength unless curing is carried out in the presence of moisture.

Figura 1: Influencia del curado en la resistencia final del hormigón (*Concrete Manual*, 1981)

1.2 Justificación

En el Ecuador los cementos comerciales disponibles y vastamente utilizados son por desempeño (ASTM C1157) y compuestos (ASTM C595), mas no se dispone de cemento Portland puro (ASTM C150). Las normativas internacionales como el ACI 318S-14 son realizadas típicamente en base a estudios con cemento Portland puro, por lo que no es claro si los 7 días de curado son suficientes o no cuando se utiliza hormigón con otros tipos de cemento.

Con respecto a la composición y adiciones que tiene el cemento, Neville (1999) menciona que el cemento portland está compuesto de 90 a 95% de Clinker de cemento

portland y de 0 a 5% de adiciones, que son materiales cementantes mencionados anteriormente. Por otro lado, Garófalo (2015) en su estudio sobre la composición química de cementos ecuatorianos, el contenido de Clinker de dichos cementos va de 50 a 65%, y sus adiciones de 35 a 50%.

La hidratación del cemento también es parte fundamental del proceso de curado del hormigón y depende en gran parte de su composición química. Brevemente se puede observar en las siguientes tablas diferencias entre la composición química entre un cemento portland y cementos comercializados en Ecuador, lo que nos da un indicio de pensar que durante el proceso de curado no habrá un mismo comportamiento.

Tabla 1: Composición química del cemento portland. (INEN 152, 2012)

Ítem	Límite especificado (%)	Resultados de ensayos (%)
SiO ₂	No aplicable	20.6
Al ₂ O ₃	6 máximo	4.4
Fe ₂ O ₃	6 máximo	3.3
CaO	No aplicable	62.9
MgO	6 máximo	2.2
SO ₃	6 máximo	3.2
Pérdida por calcinación	3 máximo	2.7
Na ₂ O	No aplicable	0.19
K ₂ O	No aplicable	0.50
Residuo insoluble	0.75 máximo	0.27
CO ₂	No aplicable	1.5

Tabla 2: Composición química de cementos ecuatorianos. (Garófalo, 2015)

Óxido	Contenido, Porcentaje (%) para cementos ecuatorianos					
	A	B	C	D	E	F
CaO	37.7	41.9	52.4	51.2	51.9	48.4
SiO ₂	37.9	32.7	27.6	27.6	27.9	30.8
Al ₂ O ₃	8.95	9.45	5.93	5.93	7.1	7.98
Fe ₂ O ₃	2.7	4.22	3.37	3.09	3.92	4.14
Na ₂ O	2.69	1.65	1.44	1.71	1.7	1.85
SO ₃	2.48	2.52	2.48	2.38	2.34	1.98

Por lo expuesto anteriormente es necesario estudiar si el umbral de 5 a 7 días de curado especificado por la NEC-15 y de al menos 7 días especificado por el ACI 318S-14 son suficientes para el hormigón estructural que utilice cementos por desempeño (i.e: GU) o compuestos (i.e: tipo IP).

1.3 Objetivos

Para atender la problemática presentada en la sección 1.2, se plantearon los siguientes objetivos para el presente trabajo de titulación: estudiar los efectos de diferentes tiempos de curado en hormigones con cemento Portland y cemento por desempeño y comparar las propiedades mecánicas del hormigón con diferentes tipos de cemento y tiempos de curado.

1.4 Actividades

Las actividades planteadas para cumplir los objetivos son:

- Diseñar mezcla de hormigón y fabricar especímenes

- Realizar ensayos a edad temprana
- Realizar ensayos a edad madura
- Analizar datos y resultados
- Escribir manuscrito de trabajo de titulación

1.5 Resultados esperados

Los resultados esperados de este trabajo experimental son:

- Análisis de la evolución de propiedades mecánicas para dos tipos de cemento y diferentes tiempos de curado: resistencia a la compresión, velocidad de pulso, y número de rebote.
- Análisis de las propiedades mecánicas del hormigón endurecido (edad de al menos 28 días) para dos tipos de cemento y tiempos de curado: resistencia a la compresión, módulo de elasticidad estático, velocidad de pulso y número de rebote.
- Recomendaciones sobre el curado del hormigón con cementos por desempeño.

1.6 Definiciones

A continuación, se presentan definiciones de términos técnicos utilizados en el presente trabajo:

- **Resistencia a la compresión (f_c):** Esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento.
- **Velocidad de pulso (V_p):** Prueba no destructiva que determina el grado de homogeneidad, presencia de fisuras, como huecos, cambios en el hormigón debido a diferentes causas como ataques del fuego y bioquímicos, así como también la calidad del material.

- **Número de rebote (R):** ensayo no destructivo para hormigón más utilizado que evalúa la resiliencia del material, es decir su habilidad para absorber energía cuando es deformado elásticamente y liberar esa energía tras ser descargado.
- **Módulo de elasticidad (Ed y Ee):** El módulo de elasticidad de un material es la relación entre el esfuerzo al que está sometido el material y su deformación unitaria y representa la rigidez del material ante una carga impuesta sobre el mismo.

DESARROLLO DEL TEMA

2.1 Revisión de literatura

2.1.1 Química del cemento

El cemento, uno de los materiales fundamentales en la elaboración del hormigón, se puede definir como un componente que posee propiedades adhesivas y cohesivas, que le da la capacidad de aglutinar fragmentos minerales formando un compacto, (Neville, 1999).

El cemento portland está compuesto por cal, sílice, alúmina y óxido de hierro, compuestos que interactúan en el horno hasta alcanzar un equilibrio químico, (Neville, 1999) En la Tabla 3 se muestran los compuestos del cemento portland puro.

Tabla 3: Compuestos principales del cemento portland (Neville, 1999)

Nombre del compuesto	Composición del óxido	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Aluminoferrita tetracálcica	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Bogue desarrolló una serie de ecuaciones que se muestran a continuación para determinar el porcentaje de compuestos en el cemento Portland:

$$\text{C}_3\text{S} = 4.07(\text{CaO}) - 7.6(\text{SiO}_2) - 6.72(\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.43(\text{Fe}_2\text{O}_3) - 2.85(\text{SO}_3) \quad (2-1)$$

$$\text{C}_2\text{S} = 2.87(\text{SiO}_2) - 0.754(3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) \quad (2-2)$$

$$\text{C}_3\text{A} = 2.65(\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.69(\text{Fe}_2\text{O}_3) \quad (2-3)$$

$$\text{C}_3\text{A} = 3.04(\text{Fe}_2\text{O}_3) \quad (2-4)$$

Con esta composición y proporciones se obtienen los porcentajes de composición presentados en la Tabla 4.

Tabla 4: Óxidos y compuestos del cemento portland (Neville, 1999)

Típica composición de óxido	Porcentaje	Composición normal	Porcentaje
CaO	63	C ₃ S	10.8
SiO ₂	20	C ₂ S	54.1
Al ₂ O ₃	6	C ₃ A	16.6
Fe ₂ O ₃	3	C ₄ AF	9.1
MgO	1.5	Compuestos menores	-
SO ₃	2		
K ₂ O	1		
Na ₂ O	1		
Otros	1		
Pérdida de ignición	2		
Residuo insoluble	0.5		

A partir de estos compuestos se obtiene el clinker, material que compone en su totalidad el cemento portland ya que posee de 95 a 100%, y el otro 0 a 5% está compuesto de adiciones. El principal componente del clinker es la alita C₃S, cómo se puede observar en la Tabla 3, ya que puede ir de 50% a 70%. Este compuesto reacciona relativamente rápido con el agua debido a sus sustituciones iónicas, lo que se convierte en la fase más importante para el cemento Portland debido al desarrollo de la resistencia a los 28 días, (Garófalo, 2015)

Con respecto a la química del cemento por desempeño y cementos compuestos, poseen los mismos compuestos mencionados anteriormente para el cemento portland, pero con la condición de que tiene mucho más porcentaje en adiciones como escorias de altos hornos, calizas, pizarras, cenizas, arenas, restos de materias cerámicas, entre otros.

En la Tabla 5 se muestran los tipos de cemento Portland especificados bajo norma técnica ecuatoriana INEN y su correspondiente norma ASTM.

Tabla 5: Tipos de cementos portland (INECYC, 2007)

Tipo		Descripción	Norma	
			INEN	ASTM
P U R O S	I	Uso común	152	C150
	II	Moderada resistencia a sulfatos	152	C150
		Moderado calor de hidratación		
	III	Elevada resistencia inicial	152	C150
	IV	Bajo calor de hidratación	152	C150
	V	Alta resistencia a la acción de sulfatos	152	C150
Los tipos IA, IIA y IIIA incluyen incorporador de aire				
C O M P U E S T O S	IS	Portland con escoria de altos hornos	490	C595
	IP	Portland puzolánico	490	C595
	P	Portland puzolánico (cuando no se requieren resistencias iniciales altas)	490	C595
	I(PM)	Portland puzolánico modificado	490	C595
	I(SM)	Portland con escoria modificado	490	C595
	S	Cemento de escoria	490	C595
P O R D E S E M P E Ñ O	GU	Uso en construcción general	2380	C1157
	HE	Elevada resistencia inicial	2380	C1157
	MS	Moderada resistencia a los sulfatos	2380	C1157
	HS	Alta resistencia a los sulfatos	2380	C1157
	MH	Moderado calor de hidratación	2380	C1157
	LH	Bajo calor de hidratación	2380	C1157
	Si adicionalmente tiene R, indica baja reactividad con árido álcali-reactivos			

En la Tabla 6 se muestran los contenidos requeridos bajo la norma INEN 152 para cementos puros, en la Tabla 7 lo mismo bajo norma INEN 490 para cementos compuestos.

Tabla 6: Composición química normalizada del cemento portland (INEN 152, 2012)

Tipo de cemento ^A	Norma de ensayo aplicable	I y IA	II y IIA	II(MH) y II(MH)A	III y IIIA	IV	V
Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃), % máximo	INEN 160	--	6,0	6,0	--	--	--
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃), % máximo	INEN 160	--	6,0 ^B	6,0 ^{B,C}	--	6,5	--
Óxido de magnesio (MgO), % máximo	INEN 160	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Trióxido de azufre (SO ₃) ^D , % máximo Cuando (C ₃ A) ^E es 8% o menor Cuando (C ₃ A) ^E es mayor del 8%	INEN 160	3,0 3,5	3,0 _F	3,0 _F	3,5 4,5	2,3 _F	2,3 _F
Pérdida por calcinación, % máximo	INEN 160	3,0	3,0	3,0	3,0	2,5	3,0
Residuo insoluble, % máximo	INEN 160	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Silicato tricálcico (C ₃ S) ^E , % máximo	Ver Anexo A	--	--	--	--	35 ^C	--
Silicato dicálcico (C ₂ S) ^E , % mínimo	Ver Anexo A	--	--	--	--	40 ^C	--
Aluminato tricálcico (C ₃ A) ^E , % máximo	Ver Anexo A	--	8	8	15	7 ^C	5 ^B
Suma de C ₃ S + 4,75C ₃ A ^G , % máximo	Ver Anexo A	--	--	100 ^{C,H}	--	--	--
Ferroaluminato tetracálcico más dos veces aluminato tricálcico (C ₄ AF+2(C ₃ A)), o solución sólida (C ₄ AF + C ₂ F), cuando sea aplicable, % máximo	Ver Anexo A	--	--	--	--	--	25 ^B

^A Ver nota 2.
^B No se aplica cuando se especifica el límite de resistencia a sulfatos de la tabla 4.
^C No se aplica cuando se especifica el límite de calor de hidratación de la tabla 4.
^D Se permite exceder los valores del contenido de SO₃ de la tabla, con la condición de que se demuestre, mediante el método de ensayo de la NTE INEN 2529, que el cemento con el contenido de SO₃ incrementado no desarrollará una expansión superior al 0,020% a los 14 días. Cuando el fabricante provea cemento bajo esta condición, se debe proporcionar datos de respaldo al comprador (ver nota 6).
^E Ver el Anexo A para el cálculo.
^F No es aplicable.
^G Ver nota 5.
^H Además, se debe realizar un ensayo de calor de hidratación a los 7 días, utilizando la NTE INEN 199, por lo menos una vez cada seis meses. Tal ensayo no debe ser usado para aceptación o rechazo del cemento, pero los resultados deben ser reportados con propósitos de información.

Tabla 7: Composición química de cementos compuestos (INEN 490, 2012)

TIPO DE CEMENTO ^A	Método de ensayo aplicable	IS (< 70), IT(P<S<70)	IS (≥ 70), IT(S≥70)	IP, IT(P≥S)
Oxido de magnesio (MgO), % máximo	INEN 160	--	--	6,0
Sulfato, reportado como (SO ₃), % máximo ^B	INEN 160	3,0	4,0	4,0
Sulfuro, reportado como S ²⁻ , % máximo	INEN 160	2,0	2,0	--
Residuo insoluble, % máximo	INEN 160	1,0	1,0	--
Pérdida por calcinación, % máximo	INEN 160	3,0	4,0	5,0

^A Los requisitos químicos en esta tabla son aplicables a todos los cementos con incorporador de aire, equivalentes.
^B Cuando se haya demostrado con el ensayo de la NTE INEN 1 505 que el SO₃ óptimo excede a un valor 0,5% menor del límite de la especificación, es permisible una cantidad adicional de SO₃ a condición de que, cuando el cemento con el sulfato de calcio adicional sea ensayado por el método de ensayo de la NTE INEN 2 501, el sulfato de calcio en el mortero hidratado a las 24 horas ± 15 minutos, expresado como SO₃, no exceda de 0,50 g/l. Cuando el fabricante suministre cemento bajo esta disposición, él, bajo pedido; debe proporcionar datos de soporte al comprador.

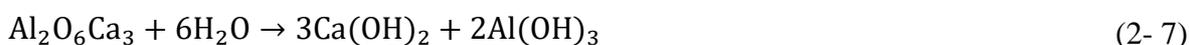
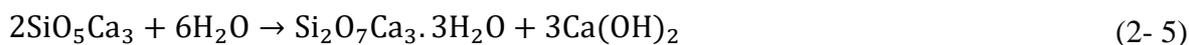
Para cementos por desempeño, bajo norma INEN 2380, no existe unos parámetros de composición, sino que dicha norma menciona que no se establecen restricciones en la composición del cemento o de sus componentes debido a que ya existen dos normas relacionadas con el cemento hidráulico y son INEN 152 y INEN 490 cuyos requisitos se muestran en las Tablas 6 y Tabla 7.

En la Tabla 8 se presenta una composición común del cemento tipo GU, según detalla un fabricante de cemento nacional.

Tabla 8: Composición del cemento (Holcim, 2015)

	Cemento HOLCIM fuerte	RTCR 479: 2015
Clinker	45-64	45-64
Adiciones minerales	36-55	36-55
Otros	0-5	0-5

Según la PCA (2004), el cemento al ser un conglomerante hidráulico al mezclarse con el agua forma una pasta, empezando una reacción química llamada hidratación. El concreto recién mezclado normalmente contiene mucha más agua de la que se necesita para el proceso de hidratación, se localiza como, químicamente combinada, en los poros del concreto y el agua sobrante es la que realiza dicha reacción, es decir como agua de gel o adsorbida. Los compuestos que se forman después de las reacciones químicas teniendo en cuenta las principales fases del Clinker como la alita, belita, aluminato y ferrito son:



El gel de tobermorita formado en las dos primeras reacciones es un tipo de silicato hidratado, responsable de las propiedades resistentes del cemento.

La reacción de la hidratación de los compuestos es exotérmica, debido a la liberación de calor, (Neville, 1999). El calor de hidratación se compone de los calores químicos de las reacciones de hidratación y del calor de adsorción del agua sobre la superficie del gel que se

ha formado por el proceso de hidratación. Los compuestos con el mayor calor de hidratación son C_3S y C_2S cómo se puede observar en la siguiente la Tabla 9.

Tabla 9: Calor de hidratación de los compuestos puros (Neville,1999)

Compuestos	Calor de hidratación	
	cal/g	J/g
C_3S	120	502
C_2S	62	260
C_3A	207	867
C_4AF	100	419

El calor de hidratación del cemento se expresa en cal/g, (Garófalo, 2015). El calor total es aproximado a la suma de los calores parciales de los componentes del Clinker.

La inclusión de materiales cementantes suplementarios MCS, muestra considerable influencia en la hidratación del hormigón al producir gel de cemento. Para que los materiales cementantes suplementarios puedan reaccionar con el agua y formen gel de cemento, necesitan esperar que el cemento reaccione con el agua formando gel de cemento más hidróxido de calcio o portlandita. Una vez ocurrida esta reacción los materiales cementantes suplementarios reaccionan con el agua restante y el hidróxido de calcio formado por la reacción del cemento. Reacciones que se muestran a continuación:



2.1.1 Curado del hormigón

Para que el proceso de hidratación descrito anteriormente continúe, tiene que mantenerse la humedad relativa dentro del concreto a un mínimo de 80%, esto sería posible en un ambiente con un clima muy húmedo y con temperatura constante, pero esto prácticamente es imposible, es por esta razón que el proceso de curado en el hormigón es muy importante. Este proceso consiste en la saturación del hormigón hasta que el espacio originalmente llenado con agua de la pasta de cemento fresco se haya llenado en el grado deseado por los productos de hidratación del cemento, (Neville, 1999).

Según el ACI 308R (2016), el curado en el hormigón es una acción que se realiza para mantener las condiciones de humedad y temperatura en una mezcla cementosa recién colocada para permitir la hidratación del cemento hidráulico y, si se usan puzolanas, se producen reacciones puzolánicas para que se desarrollen las propiedades potenciales de la mezcla. Para la PCA (2004), el curado debe empezar inmediatamente después del endurecimiento del hormigón reteniendo el agua durante los primeros días para evitar la erosión en la superficie y permitir el desarrollo de sus propiedades.

El hormigón va desarrollando sus propiedades con el tiempo, en los primeros días es mucho más rápido y después continúa lentamente por un periodo indefinido. Cuando el proceso de curado se interrumpe, el desarrollo de la resistencia continúa por un corto tiempo y se paraliza (PCA, 2004).

En la Figura 1 presentada en el capítulo 1 se puede ver el desarrollo de la resistencia con relación a la edad y tiempos de curado. Como el desarrollo de las propiedades se mejoran con el proceso de curado el tiempo de curado debe ser el más largo posible. El método de curado más eficiente depende del proceso de construcción empleado y el uso que se le dará al

hormigón endurecido, un proceso inadecuado afecta mucho más a hormigones con una relación agua cemento alta y con una rapidez baja de desarrollo de resistencia.

La PCA (2004), describe tres métodos y materiales para el curado del hormigón:

1. Métodos que mantienen el agua de la mezcla presente durante los periodos iniciales de endurecimiento. Este método incluye encharcamientos, rociado o aspersión y coberturas húmedas.
2. Métodos que reducen la pérdida de agua de la mezcla de la superficie del hormigón. Este método trata en cubrir el hormigón con papel impermeable, hojas de plástico, compuestos de curado formadores de película.
3. Métodos que aceleran el desarrollo de su resistencia a través del suministro de calor y humedad adicional al hormigón. En este método se puede incluir el curado por humedad interna y el curado a vapor.

En cuanto a normativa, el capítulo NEC-SE-HM (2015) de la Norma Ecuatoriana de la Construcción establece que las superficies expuestas de hormigón que contienen cemento hidráulico deben mantenerse húmedas por el tiempo especificado en cada proyecto. Si no se dispone de esta especificación deben mantenerse húmedas por al menos de 5 a 7 días. Por otro lado, el ACI 318S-14 (2014) establece en el capítulo 26 que “el concreto (excepto para concreto de alta resistencia inicial) debe mantenerse a una temperatura por encima de los 10°C y en condiciones de humedad por lo menos los primeros 7 días después de la colocación”.

La sección 26.5.3.2 del ACI 318-14 (2014) establece que los procedimientos de protección y curado del concreto se deben considerar adecuados si cumplen lo siguiente:

- La resistencia promedio de los cilindros curados en la obra, a la edad de ensayo designada para determinar $f'c$ debe ser al menos igual al 85% de la resistencia de cilindros compañeros curados en forma estándar.

- La resistencia promedio de los cilindros curados en la obra, a la edad de ensayo establecida excede $f'c$ en más de 3.5 MPa.

2.1.2 Propiedades mecánicas del hormigón

Las propiedades mecánicas del hormigón se miden en especímenes de hormigón una vez endurecidos y sometidos al mejor proceso de curado para dichos especímenes.

2.1.2.1 Resistencia a la compresión

El método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de hormigón es una prueba de esfuerzo máximo que puede soportar el hormigón bajo una carga de aplastamiento. La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima suministrada por el área transversal de un espécimen cilíndrico o cúbico en un ensayo de compresión.

Este ensayo está definido por la norma ASTM C39, la cual define al método como una prueba que consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros o núcleos moldeados a una velocidad que se encuentra dentro de un rango prescrito hasta que ocurre la falla. El aparato de medición (figura 12) consiste en una máquina de prueba que sus especificaciones están establecidas por la norma ASTM C39, neoprenos si es necesario, bloques de apoyo, espaciadores y un indicador de carga.



Figura 2: Aparato para determinar la resistencia a la compresión (Villagómez, 2016)

2.1.2.2 Módulo de elasticidad estático y coeficiente de Poisson

El Módulo de elasticidad estático del hormigón se determina a través de la prueba de compresión especificada en la norma ASTM C469, con cilindros de hormigón de 150 mm x 300 mm los que son sometidos a una carga axial que incrementa hasta que el cilindro fallé. Las deformaciones transversales y longitudinales son medidas continuamente durante la aplicación de la carga. (Balendran, 1995). La norma ASTM C469, menciona que este método proporciona un valor de tensión y una relación de deformación lateral y longitudinal para el hormigón endurecido a cualquier edad y en condiciones de curado.

El aparato de medición (figura 12), consiste en una máquina de prueba, un compresómetro para determinar el módulo de elasticidad y un extensómetro.



Figura 2: Aparato para determinar el módulo de elasticidad estático. Laboratorio de Hormigones USFQ: (2018)

2.1.2.3 Módulo de elasticidad dinámico

El ensayo para determinar el módulo de elasticidad dinámico de Young o dinámico de rigidez, según la norma ASTM C215 (2013), consiste en la medición de las frecuencias resonantes transversales, longitudinales y torsionales fundamentales de prismas y cilindros de hormigón. El valor calculado por este método generalmente es mayor que el calculado por el ensayo de módulo de elasticidad estático, y depende del nivel de resistencia del hormigón.

El aparato de medición contiene dos partes de Resonancia Forzada (figura 10) que consiste en un circuito de conducción que consta de un oscilador de audio de frecuencia variable, un amplificador y una unidad de conducción; un circuito de captación con una unidad de captación, un amplificador y un indicador; un soporte de muestras que debe permitir que la muestra vibre libremente.

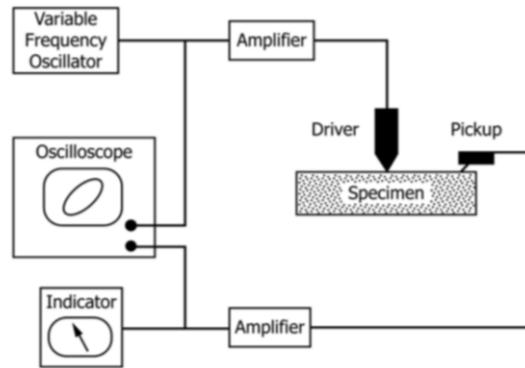


FIG. 1 Schematic of Apparatus for Forced Resonance Test

Figura 3: Esquema del aparato para medir el módulo de elasticidad dinámico. ASTM 215: (2013)

Y de impacto forzado (figura 11), que consiste en un impactador que debe estar hecho de metal o plástico rígido y producir una duración de impacto que sea suficientemente corta para excitar la frecuencia de resonancia más alta que se debe medir; un sensor que debe ser un acelerómetro piezoeléctrico con una masa inferior a 30 g y tener un rango de frecuencia de funcionamiento de 100 a 10 000 Hz. La frecuencia de resonancia del acelerómetro será al menos dos veces la frecuencia máxima de funcionamiento; un analizador de frecuencia que determine la frecuencia de la vibración de la muestra utilizando un analizador de forma de onda digital o un contador de frecuencia para analizar la señal medida por el sensor y un soporte de la muestra.

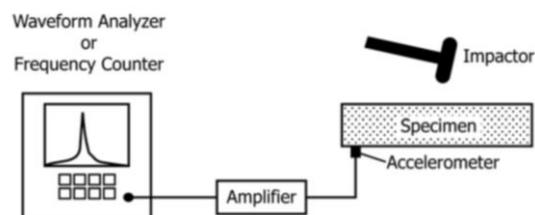


FIG. 2 Schematic of Apparatus for Impact Resonance Test

Figura 4: Esquema del aparato para medir el módulo de elasticidad dinámico. ASTM 215: (2013)

2.1.2.4 Ensayos no destructivos

2.1.2.4.1 Número de Rebote

El número de rebote es el ensayo no destructivo más utilizado en la industria de la construcción debido a su bajo costo y la simplicidad con la que se puede realizar. El ensayo incluye un esclerómetro mostrado en la figura 8. Para la norma ASTM C805-13 el esclerómetro SCHMIDT consiste en un martillo de acero accionado por resorte que, cuando se libera, golpea un émbolo metálico en contacto con la superficie de hormigón. El martillo accionado por resorte debe viajar con una velocidad constante y reproducible. El número de rebote se basa en la distancia de rebote del martillo después de que impacta el émbolo, o se basa en la relación entre la velocidad del martillo después del impacto y la velocidad antes del impacto. Los números de rebote basados en estos dos principios de medición no son comparables.

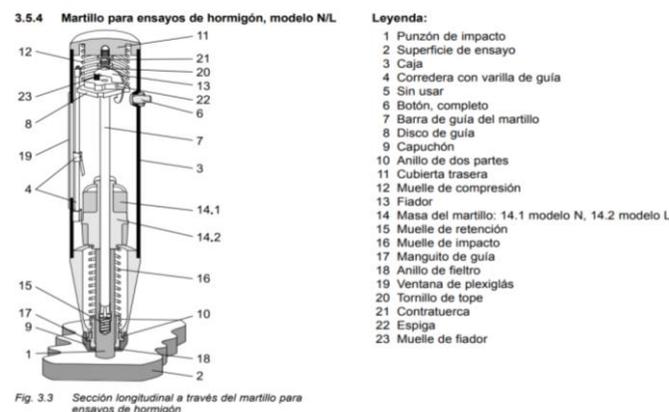


Figura 5: Componentes del martillo SCHMIDT. Proceq S.A: (2017)

El martillo SCHMIDT mide la dureza superficial del hormigón lo que se puede traducir en la habilidad que tiene el hormigón para absorber energía cuando es deformado elásticamente y liberar esa energía tras ser descargado. La energía adsorbida depende de la rigidez del elemento ensayado es decir de su relación esfuerzo deformación en el rango

elástico. Es decir que si el esclerómetro marca un número de rebote mínimo entonces representa un hormigón de baja resistencia y rigidez debido a que absorberá una mayor cantidad de energía. Pero se debe recalcar también que ensayo refleja las propiedades superficiales del hormigón.

Existen varios factores que influyen en los resultados de este ensayo que deben ser considerados al momento del análisis, como: el tipo y contenido de cemento, tipo de agregado grueso, masa de elemento ensayado, la compactación, tipo de superficie, edad, carbonatación superficial, humedad y temperatura.

2.1.2.4.2 Velocidad de pulso ultrasónico

La norma ASTM C597-13 le define como un método de prueba que cubre la determinación de la velocidad de propagación de los pulsos de onda de esfuerzo longitudinal a través del hormigón. Este ensayo puede evaluar los cambios en las propiedades del hormigón, la uniformidad y la calidad del hormigón, indicando la presencia de huecos y grietas, que se puede correlacionar con la resistencia del hormigón. (ASTM C597, 2013)

El aparato mostrado en la figura 9 consiste en un ultrasonido que posee transductores capaces de marcar el tiempo de propagación de una onda a través del hormigón.

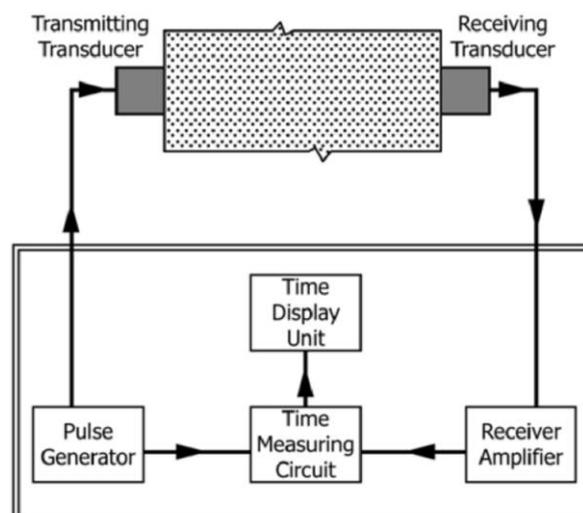


Figura 6: Esquema del aparato para medir la velocidad de pulso. ASTM C597: (2013)

Villagómez, (2016), explica que para poder transmitir y recibir el pulso de una manera adecuada, los transductores deben tener contacto con el hormigón, para esto es necesario utilizar un gel de acoplamiento. El acoplamiento además afecta la amplitud y la atenuación de onda. Las cámaras de aire entre los transductores y el espécimen introducen un error considerable debido a que solo una pequeña parte de la energía de las ondas se transmite en el aire.

Estos dos tipos de ensayos no pueden medir la resistencia del hormigón directamente, pero las propiedades que miden pueden ser correlacionadas con la resistencia a la compresión del hormigón.

2.2 Plan experimental

2.2.1 Matriz de experimentos

Para el presente trabajo de titulación se seleccionaron dos mezclas de hormigón: una de control con cemento Portland puro, y uno con cemento tipo GU con disponibilidad comercial local. En la Tabla 10 se presentan los criterios de diseño a utilizar para la dosificación, con el fin de que representen hormigones convencionales.

Tabla 10: Criterios de diseño de las mezclas

Característica	Mezcla	
	P	G
Denominación		
Tipo de cemento	Portland Tipo I	Desempeño Tipo GU
Denominación comercial	Cemento blanco CEMEX	Holcim Fuerte
Relación a/mc*	0,55	0,55
Cementante	100% Cemento Portland	100 % Tipo GU (Holcim)

*: a/mc: relación agua - material cementante

En la Tabla 11 se presenta la matriz de experimentos con el tipo y número de especímenes fabricados, y los ensayos a realizar para cada mezcla. El objetivo fue tener datos de las propiedades mecánicas a edades de 3, 7, y 28 días para resistencia a la

compresión, y módulo de elasticidad a edad mayor a 60 días, para obtener datos similares a los presentados en la Figura 1. Los especímenes fueron probetas cilíndricas de 100 x 200 mm para resistencia a la compresión, y de 150 mm x 300 mm para módulo de elasticidad estático.

Tabla 11: Matriz de experimentos

Descripción		Edad de ensayo			
		3 días	7 días	28 días	180 días
Tiempo de curado ¹	0 días (en aire)	2 probetas	2 probetas	2 probetas	2 probetas
	3 días	2 probetas	2 probetas	2 probetas	2 probetas
	7 días	---	2 probetas	2 probetas	2 probetas
	28 días	----	---	2 probetas	2 probetas
Dimensiones		cilindros 100 x 200 mm	cilindros 100 x 200 mm	cilindros 100 x 200 mm	cilindros 150 x 300 mm
Ensayo ²		fc Vp R	fc Vp R	fc Vp R	Ed Ec fc

¹: curado sumergido en agua saturada en hidróxido de calcio a 23 ± 2 °C

²: fc: resistencia a la compresión ASTM C39; Vp: velocidad de pulso ultrasónico (ASTM C597); R: número de rebote (ASTM C805); Ed: módulo de elasticidad dinámico (ASTM 215); Ec: módulo de elasticidad estático (ASTM C469)

Tabla 12: Código de identificación de los grupos de especímenes.

Descripción		Edad de ensayo			
		3 días	7 días	28 días	180 días
Tiempo de curado¹	0 días	G0003 P0003	G0007 P0007	G0028 P0028	G00180 P00180
	3 días	G0303 P0303	G0307 P0307	G0328 P0328	G03180 P00180
	7 días	---	G0707 P0707	G0728 P0728	G07180 P00180
	28 días	----	---	G2828 P0728	G28180 P28180

G: mezcla “G” con cemento tipo GU

P: mezcla “P” con cemento Portland

2.2.2 Metodología y Materiales

2.2.2.1 Agregados

El agregado escogido fue el existente en el laboratorio de hormigones de la Universidad San Francisco de Quito. El cual es de origen ígneo y proviene de la mina Pifo, a 20 km de la ciudad de Quito aproximadamente. Se realizó el análisis granulométrico de los agregados número 57 y 9 según la norma ASTM C136 “Especificación Estándar para Agregados para Concreto”. El agregado grueso y fino tienen una gradación dentro de los límites establecidos por el ASTM C33, resultados que se observan en la tabla 13, 14 y figura 8 y 9.

Tabla 13: Granulometría del agregado grueso

Tamiz	Abertura de tamiz (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acumulada (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
11/2"	37.5	0	0	0.00%	0.00%	100.00%
1"	25	58.9	58.9	1.98%	1.98%	98.02%
1/2"	12.5	2034.3	2093.2	68.45%	70.43%	29.57%
4	4.75	759.8	2853	25.57%	96.00%	4.00%
8	1.18	118.9	2971.9	4.00%	100.00%	0.00%
Sumatoria		2971.9				

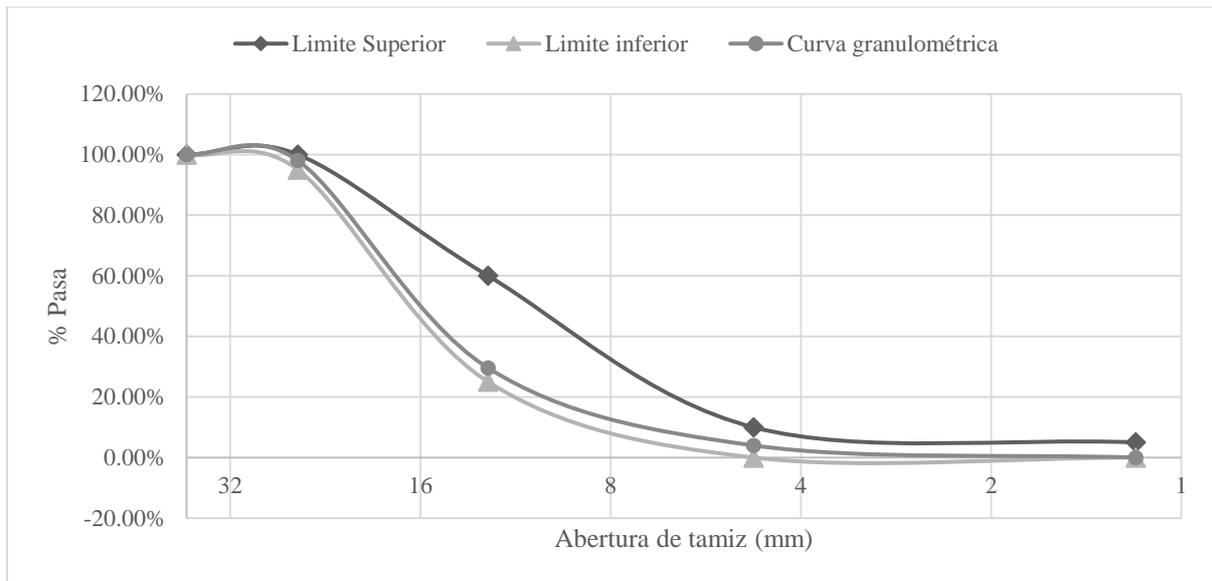


Figura 8: Granulometría del agregado grueso

Tabla 14: Granulometría del agregado fino

Tamiz	Abertura de Tamiz (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acumulada (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
4	4.75	13	13	0.44%	0.44%	99.56%
8	2.36	534.5	547.5	17.89%	18.32%	81.68%
16	1.18	872.5	1420	29.20%	47.52%	52.48%
30	0.6	815.5	2235.5	27.29%	74.80%	25.20%
50	0.3	364	2599.5	12.18%	86.98%	13.02%
100	0.15	101.5	2701	3.40%	90.38%	9.62%
200	0.075	201.5	2902.5	6.74%	97.12%	2.88%
Bandeja	0	86	2988.5	2.88%	100.00%	
Sumatoria		2988.5				

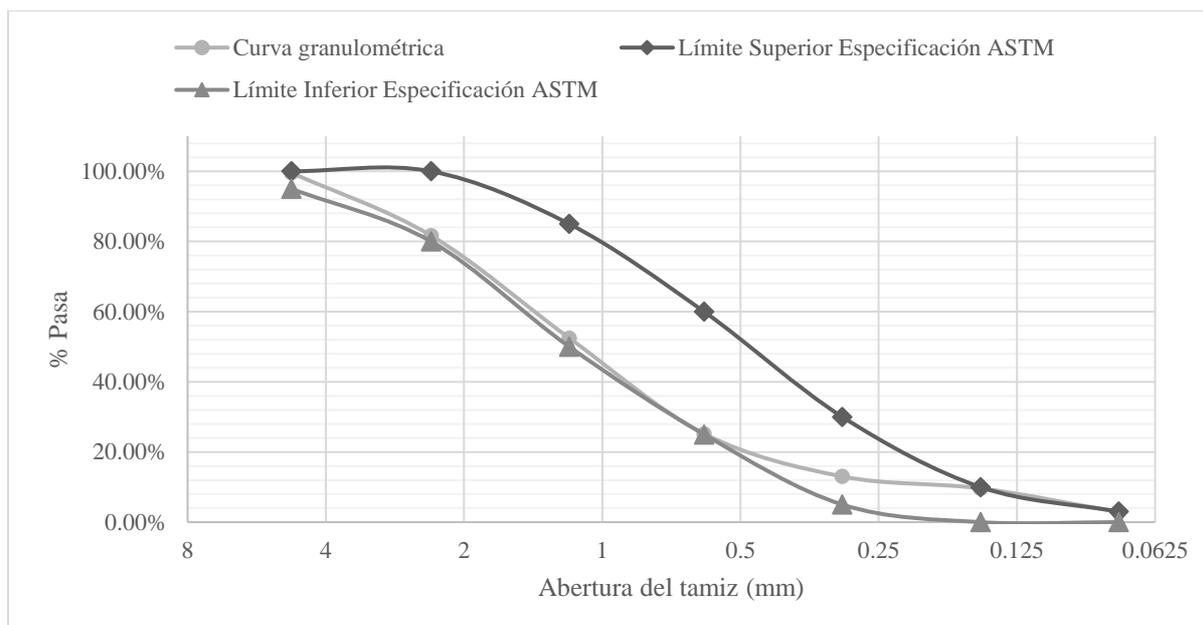


Figura 9: Granulometría del agregado fino

La densidad y absorción del agregado grueso se obtuvo siguiendo la norma ASTM C127, resultados que se muestran en la tabla 15. Para el agregado fino no se tuvo el equipo necesario por lo que se asumió la densidad y absorción del agregado grueso.

Tabla 15: Densidad y absorción del agregado grueso

Densidad y Absorción				
DATOS				
A (masa seca al horno)	3008	g	3.008	kg
B (masa saturada seca)	3073.5	g	3.0735	kg
C (masa sumergida en agua)	1948.3	g	1.9483	kg
RESULTADOS				
Densidad (OD)	2666.619	kg/m ³	2.667	g/cm ³
Densidad (SSD)	2724.686	kg/m ³	2.725	g/cm ³
Densidad (AD)	2831.443	kg/m ³	2.831	g/cm ³
Absorción %	2.2	%		

2.2.2.2 Cemento

Para la mezcla G se utilizó cemento Holcim Fuerte. Este es un cemento de tipo GU, para construcciones en general que cumple los estándares de la norma ecuatoriana NTE INEN 2380. Este tipo de cementos entra en la categoría de cementos hidráulicos, regida por la norma ASTM C1157 “Especificación Normalizada de Desempeño para Cementos Hidráulicos”. Para la mezcla de control P se utilizó cemento blanco CEMEX de Tolteca, que corresponde a un cemento Portland puro Tipo I.

2.2.2.3 Diseño de mezclas

El diseño de mezclas se realizó en base a la metodología volumétrica. El diseño de las mezclas buscó representar un hormigón de tipo común estructural utilizado en el Ecuador por lo que para la mezcla de prueba se utilizó una relación agua/cemento de 0.5 y se corrigió la cantidad de agua según el revenimiento obtenido. En la Tabla 16 se presenta la dosificación final utilizada.

Tabla 16: Dosificación de mezclas

Material	Mezcla	
	G	P
Agregado fino (kg/m ³)	546.37	549.63
Agregado grueso (kg/m ³)	819.55	824.45
Cemento (kg/m ³)	581.22	584.70
Agua (kg/m ³)	273.22	269.01
Total	2220.37	2227.79
relación a/mc final	0.47	0.46

2.2.2.4 Elaboración de especímenes

Cada mezcla se realizó siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C192. De cada mezcla se fabricaron las 26 probetas especificadas en la Tabla 11 (ver Figura 10). A las 24 ±

2 horas de fabricación, se retiraron los moldes, y se procedió a someter a los cilindros al curado establecido en la Tabla 11. El curado en agua se realizó en un tanque de curado con agua saturada con hidróxido de calcio a una temperatura de 23 ± 2 °C, tal como establecen las normas ASTM C39 (2018), y el ACI 318-14 (2014). Cada cilindro fue pulido en ambas caras con la tolerancia especificada en la norma ASTM C39 (2018) previo a realizar los ensayos especificados en la Tabla 11.



Figura 10: Especímenes y curado inicial

2.2.2.5 Ensayos de hormigón fresco

Se realizaron ensayos de revenimiento (ASTM C143), densidad y aire por el método gravimétrico (ASTM C138), resultados que se muestran en la tabla 17.

Tabla 17: Resultados de ensayos de hormigón fresco

Mezcla	Ensayos		
	Revenimiento ASTM C143	Contenido de Aire (Método de Presión) ASTM C231	Densidad (Peso Unitario) ASTM C138
G	8.5 cm	2.2 %	2234 kg/m ³
P	8.0 cm	2.2 %	2311 kg/m ³

2.3 Resultados

En las siguientes secciones se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados para diferentes edades y diferentes tiempos de curado, según se establece en la Tabla 11.

2.3.1 Número de rebote

El ensayo para determinar el número de rebote se realiza con el martillo para hormigón MATEST C380-1 (Schmidt) siguiendo la norma ASTM C805. Se realizaron un total de 10 pruebas en una cara en cada uno de los 36 cilindros de 100 x 200 mm. Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 18 y 19 y Figura 11.

Tabla 18: Número de Rebote de cilindros de hormigón con cemento por desempeño

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio	
G0003-1	24	20	18	22	22	18	20	18	18	16	19.6	19.5
G0003-2	20	20	22	20	16	18	20	22	18	18	19.4	
G0303-1	20	14	26	18	18	24	16	18	16	20	19.0	20.5
G0303-2	18	18	24	24	20	24	22	24	24	22	22.0	
G0007-1	20	22	22	22	20	22	22	22	22	26	22.0	22.1
G0007-2	18	30	22	20	22	20	18	18	32	22	22.2	
G0307-1	24	26	24	24	24	24	24	24	26	24	24.4	24.4
G0307-2	24	24	26	24	24	24	26	24	24	24	24.4	
G0707-1	26	26	28	24	26	26	24	26	24	24	25.4	25.6
G0707-2	26	24	26	26	26	24	26	26	28	26	25.8	
G0028-1	26	24	26	28	24	30	26	26	28	26	26.4	24.4
G0028-2	24	24	20	20	24	24	20	22	24	22	22.4	
G0328-1	28	28	28	30	30	26	30	26	28	28	28.2	27.1
G0328-2	26	24	26	26	28	24	26	26	24	30	26.0	
G0728-1	28	28	28	26	26	28	28	26	28	28	27.4	27.1
G0728-2	26	28	26	28	28	28	28	26	26	24	26.8	
G2828-1	34	26	28	26	36	34	28	26	26	30	29.4	28.7
G2828-2	26	26	30	26	30	28	30	30	28	26	28.0	

Tabla 19: Número de Rebote de cilindros con hormigón con cemento Portland

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio	
P0003-1	28	30	22	26	26	24	22	26	26	26	25.6	25.4
P0003-2	24	22	24	28	30	24	28	22	26	24	25.2	
P0303-1	26	26	30	26	26	26	28	28	26	28	27.0	27.6
P0303-2	28	32	28	34	28	26	24	26	28	28	28.2	
P0007-1	36	34	38	32	32	30	30	30	28	28	31.8	32.8
P0007-2	34	34	34	32	36	32	32	34	36	34	33.8	
P0307-1	32	34	32	32	34	34	32	34	36	34	33.4	34.2
P0307-2	34	32	34	34	34	36	38	36	36	36	35.0	
P0707-1	42	36	34	34	36	34	34	36	38	34	35.8	35.8
P0707-2	34	42	34	38	34	34	36	34	36	36	35.8	
P0028-1	30	30	30	32	34	34	34	36	30	30	32.0	32.0
P0028-2	36	32	28	34	32	32	30	28	32	36	32.0	
P0328-1	38	36	30	30	34	32	38	32	32	32	33.4	32.3
P0328-2	34	4	34	34	36	34	32	32	34	38	31.2	
P0728-1	38	36	40	36	40	36	40	38	40	40	38.4	37.7
P0728-2	38	36	36	40	36	34	30	42	42	36	37.0	
P2828-1	46	46	38	34	38	34	38	40	38	44	39.6	39.4
P2828-2	38	40	40	38	42	42	36	38	38	40	39.2	

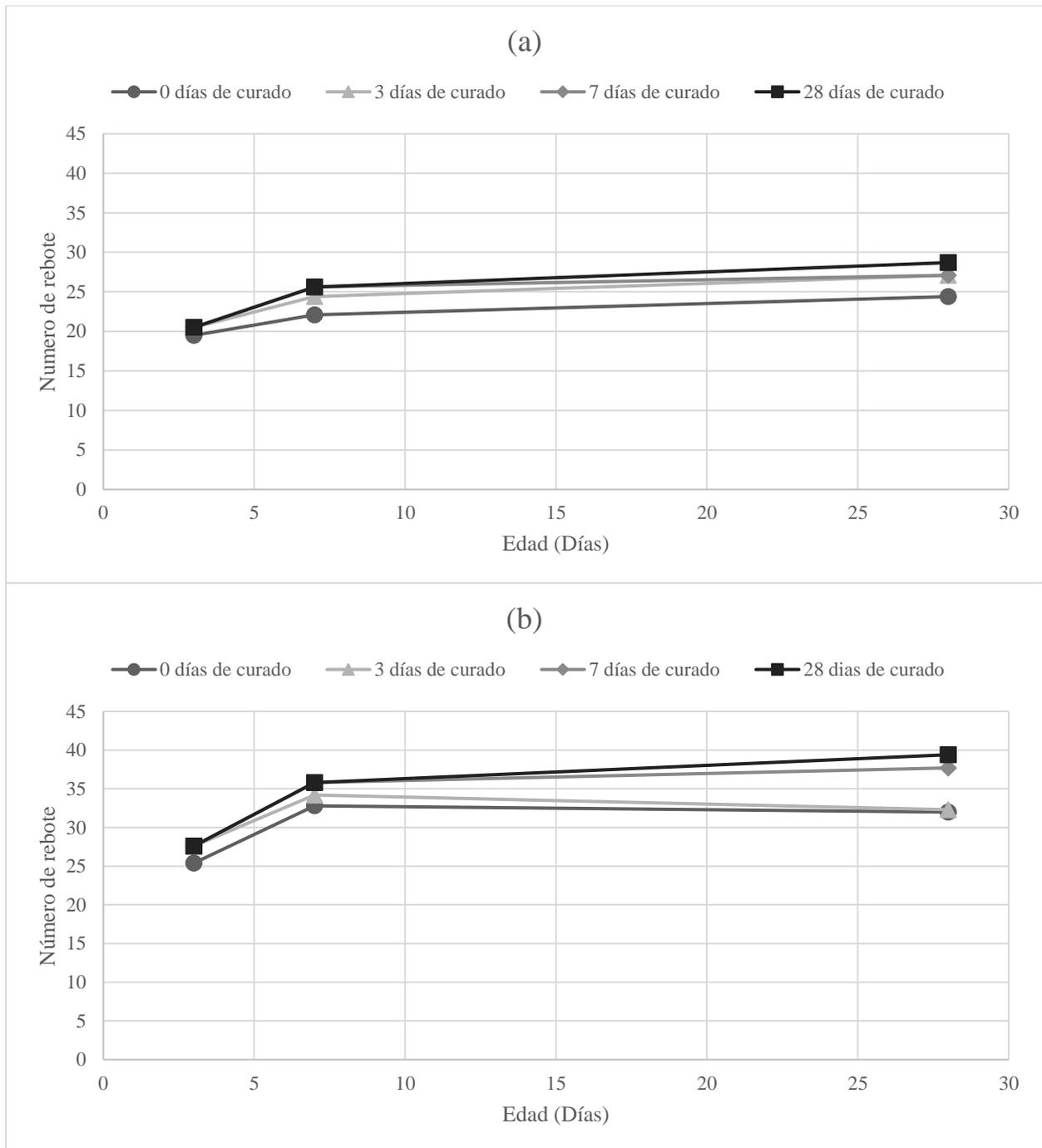


Figura 11: a) Número de Rebote de cilindros de hormigón con cemento por desempeño b) Número de Rebote de cilindros con hormigón con cemento Portland

2.3.2 Velocidad de pulso

El ensayo para determinar la velocidad de pulso se realiza según la norma ASTM C597. Se utilizó el instrumento ultrasónico Proceq Pundit Lab. para cada uno de los 36 cilindros de 10x20 cm, se realizan 5 pruebas con los dos transductores ubicados en el centro de las caras de 100 mm de diámetro, y las ondas recorren 200 mm. Se obtuvieron los resultados mostrados en las Tablas 20 y 21 y Figura 12.

Tabla 20: Velocidad de pulso de cilindros con hormigón con cemento por desempeño

Velocidad de pulso (m/s)							
ID	1	2	3	4	5	Promedio	
G0003-1	3520	3550	3550	2670	3550	3370	3420
G0003-2	3570	3590	3570	3080	3540	3470	
G0303-1	3590	3550	3610	3020	3480	3450	3530
G0303-2	3520	3620	3590	3620	3670	3600	
G0007-1	3620	3590	3620	3590	3650	3610	3630
G0007-2	3650	3680	3650	3590	3650	3640	
G0307-1	3720	3700	3720	3730	3750	3720	3720
G0307-2	3680	3730	3710	3750	3700	3720	
G0707-1	3860	3820	3820	3820	3820	3830	3790
G0707-2	3750	3730	3780	3780	3730	3750	
G0028-1	4010	4010	3930	3970	3970	3980	3970
G0028-2	3970	3900	3930	3930	4010	3950	
G0328-1	4050	4050	4070	4070	4050	4050	4110
G0328-2	4140	4180	4140	4140	4180	4160	
G0728-1	4260	4260	4260	4220	4220	4250	4260
G0728-2	4310	4260	4220	4220	4320	4270	
G2828-1	4480	4440	4480	4480	4480	4470	4470
G2828-2	4390	4440	4530	4480	4480	4460	

Tabla 21: Velocidad de pulso de cilindros con hormigón con cemento Portland

Velocidad de pulso (m/s)							
ID	1	2	3	4	5	Promedio	
P0003-1	3800	3850	3820	3820	3770	3810	3790
P0003-2	3820	3820	3820	3780	3640	3770	
P0303-1	3970	3930	3930	4010	3930	3950	3960
P0303-2	3970	3970	3970	3970	3930	3960	
P0007-1	3930	3890	3880	3970	3880	3910	3880
P0007-2	3850	3800	3880	3820	3880	3850	
P0307-1	4010	4050	4090	4050	4060	4050	4050
P0307-2	4090	3970	4090	4050	4050	4050	
P0707-1	4290	4380	4370	4380	4380	4360	4350
P0707-2	4250	4370	4300	4340	4380	4330	
P0028-1	4250	4210	4250	4250	4250	4240	4260
P0028-2	4290	4290	4290	4290	4220	4280	
P0328-1	4320	4290	4380	4340	4340	4340	4340
P0328-2	4340	4370	4340	4370	4340	4350	
P0728-1	4390	4430	4380	4380	4380	4390	4420
P0728-2	4500	4510	4510	4420	4260	4440	
P2828-1	4690	4720	4640	4690	4690	4690	4670
P2828-2	4640	4690	4690	4620	4650	4660	

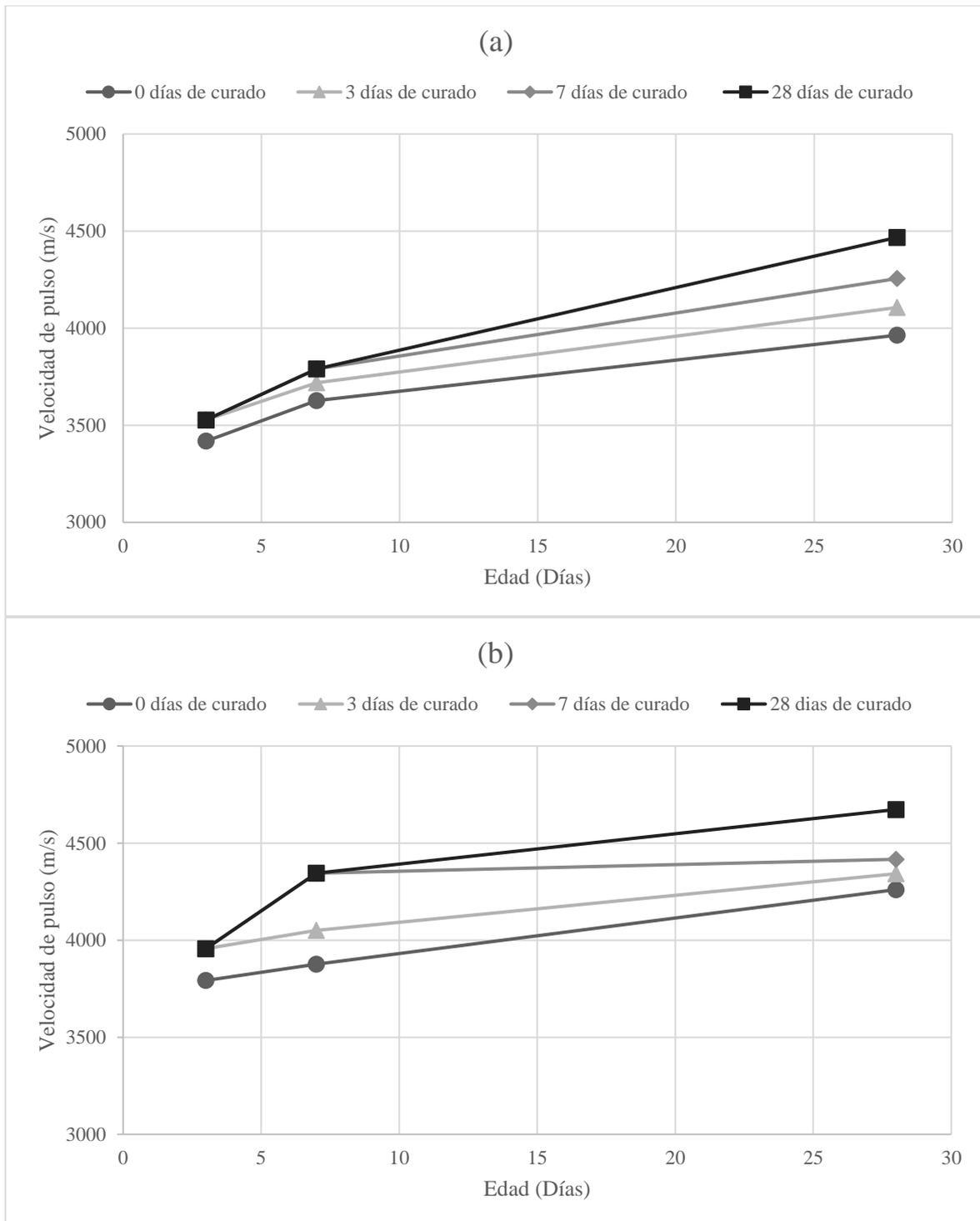


Figura 12: a) Velocidad de pulso de cilindros con hormigón con cemento por desempeño b) Velocidad de pulso de cilindros con hormigón con cemento Portland

2.3.3 Resistencia a la compresión

Se ensayaron 36 cilindros de 10x20 cm a compresión de acuerdo a la norma ASTM

C39. Los resultados se muestran en la Tabla 22, 23 y en la Figura 13.

Tabla 22: Resistencia a la compresión de cilindros con hormigón con cemento por desempeño

ID	Resistencia a la compresión (MPa)	Promedio (MPa)
G0003-1	19.7	19.4
G0003-2	19.0	
G0303-1	20.7	20.9
G0303-2	21.1	
G0007-1	21.4	23.4
G0007-2	25.4	
G0307-1	25.1	24.1
G0307-2	23.1	
G0707-1	26.0	27.0
G0707-2	27.9	
G0028-1	22.2	23.8
G0028-2	25.4	
G0328-1	29.4	28.3
G0328-2	27.1	
G0728-1	31.9	31.0
G0728-2	30.1	
G2828-1	36.0	35.3
G2828-2	34.5	

Tabla 23: Resistencia a la compresión de cilindros con hormigón con cemento Portland

ID	Resistencia a la compresión (MPa)	Promedio (MPa)
P0003-1	22.8	22.8
P0003-2	22.7	
P0303-1	33.3	31.7
P0303-2	30.0	
P0007-1	44.9	44.0
P0007-2	43.1	
P0307-1	50.1	48.1
P0307-2	46.1	
P0707-1	51.8	52.1
P0707-2	52.3	
P0028-1	53.3	53.9
P0028-2	54.4	
P0328-1	58.8	63.4

P0328-2	68.0	
P0728-1	68.6	68.5
P0728-2	68.4	
P2828-1	70.9	71.0
P2828-2	71.0	

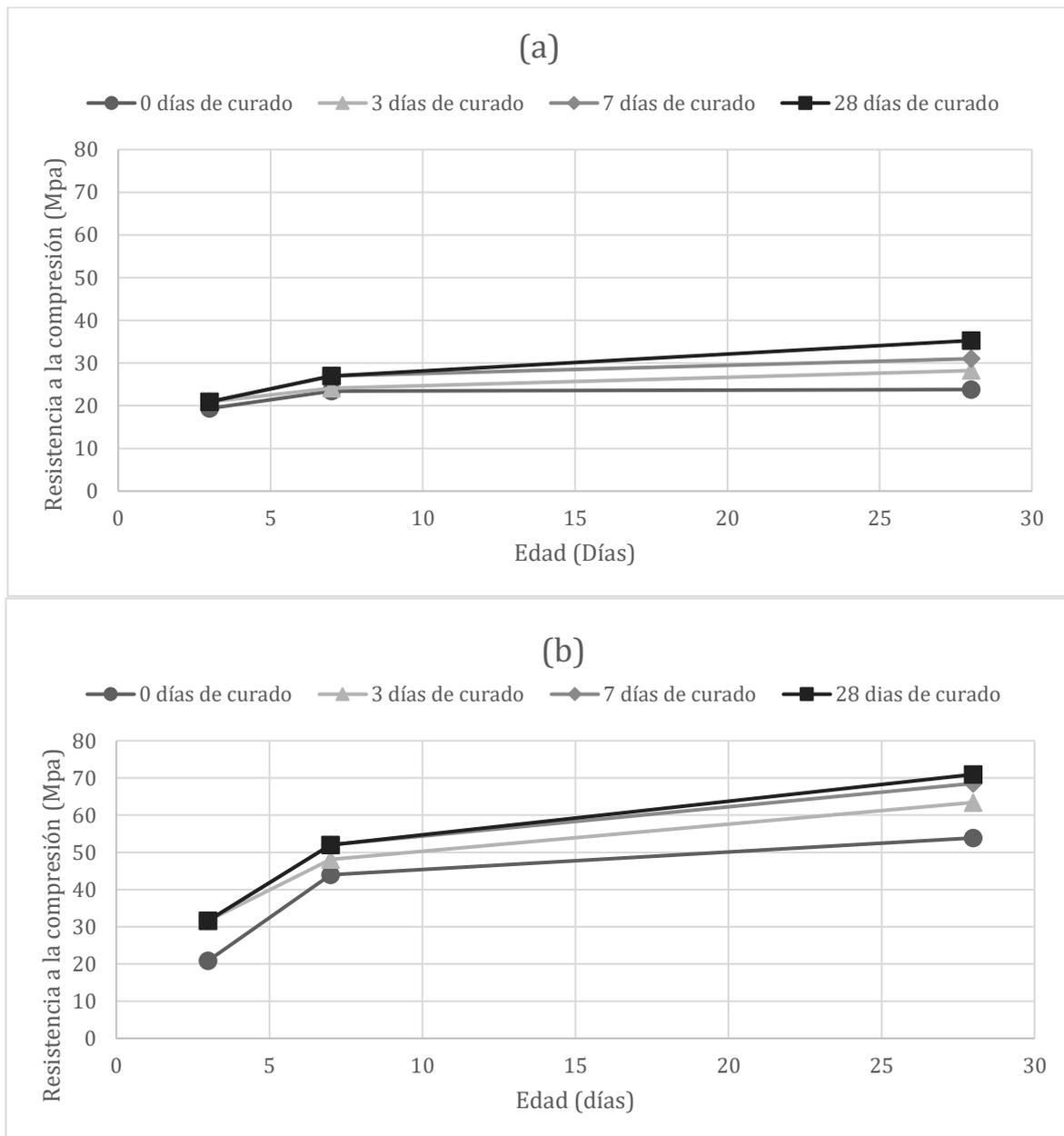


Figura 13: a) Resistencia a la compresión de cilindros con hormigón con cemento por desempeño b) Resistencia a la compresión de cilindros con hormigón con cemento Portland

2.3.4 Resultados a la edad de 180 días

2.3.4.1 Módulo de elasticidad dinámico

El ensayo para determinar el módulo de elasticidad dinámico se realiza según la norma ASTM C215. Se sometieron a esta prueba 16 cilindros, de 180 días de edad de 150 x 300 mm. Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 24 y 25.

Tabla 24: Módulo de elasticidad dinámico de cilindros con hormigón con cemento por desempeño

ID	Ed (Gpa)	Ed (Promedio)
G00G-1	23.0	23.0
G00G-2	23.0	
G03G-1	25.5	24.5
G03G-2	23.5	
G07G-1	27.5	27.0
G07G-2	26.5	
G28G-1	24.0	24.5
G28G-2	24.5	

Tabla 25: Módulo de elasticidad dinámico de cilindros con hormigón con cemento Portland

ID	Ed (Gpa)	Ed (Promedio)
P00G-1	30.5	30.5
P00G-2	31.0	
P03G-1	32.0	32.5
P03G-2	32.5	
P07G-1	34.5	34.5
P07G-2	34.0	
P28G-1	34.5	35.0
G28G-2	35.5	

2.3.4.2 Módulo de elasticidad estático

El ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático se realiza según la norma ASTM C469. Se sometieron a esta prueba 16 cilindros, de 180 días de edad de 150 x 300 mm. Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 26 y 27.

Tabla 26: Módulo de elasticidad estático de cilindros con hormigón con cemento por desempeño

ID	Ec (GPa)	Promedio (GPa)
G00180-1	23.6	23.2
G00180-2	22.8	
G03180-1	24.0	23.2
G03180-2	22.2	
G07180-1	25.2	26.6
G07180-2	27.8	
G28180-1	25.8	24.0
G28180-2	22.0	

Tabla 27: Módulo de elasticidad estático de cilindros con hormigón con cemento Portland

ID	Ec (GPa)	Promedio (GPa)
P00180-1	27.8	26.8
P00180-2	25.8	
P03180-1	26.8	26.6
P03180-2	26.2	
P07180-1	28.6	27.8
P07180-2	27.0	
P28180-1	28.0	28.2
P28180-2	28.2	

2.3.4.3 Resistencia a la compresión

Tras realizar los ensayos de Ed y Ec, se procedió a ensayar los cilindros a compresión para obtener su resistencia. En la Tabla 28 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 28: Resistencia a la compresión de cilindros con hormigón con cemento por desempeño (180 días)

ID	Resistencia a la compresión (Mpa)	
G00180-1	38.9	39.2
G00180-2	39.5	
G03180-1	46.1	46.0
G03180-2	45.9	
G07180-1	52.3	51.1
G07180-2	49.9	
G28180-1	54.1	54.0
G28180-2	53.9	

Tabla 29: Resistencia a la compresión de cilindros con hormigón con cemento Portland (180 días)

ID	Resistencia a la compresión (Mpa)	
P00180-1	57.2	55.4
P00180-2	53.7	
P03180-1	67.7	68.0
P03180-2	68.3	
P07180-1	72.6	73.5
P07180-2	74.5	
P28180-1	72.5	76.3
P28180-2	80.1	

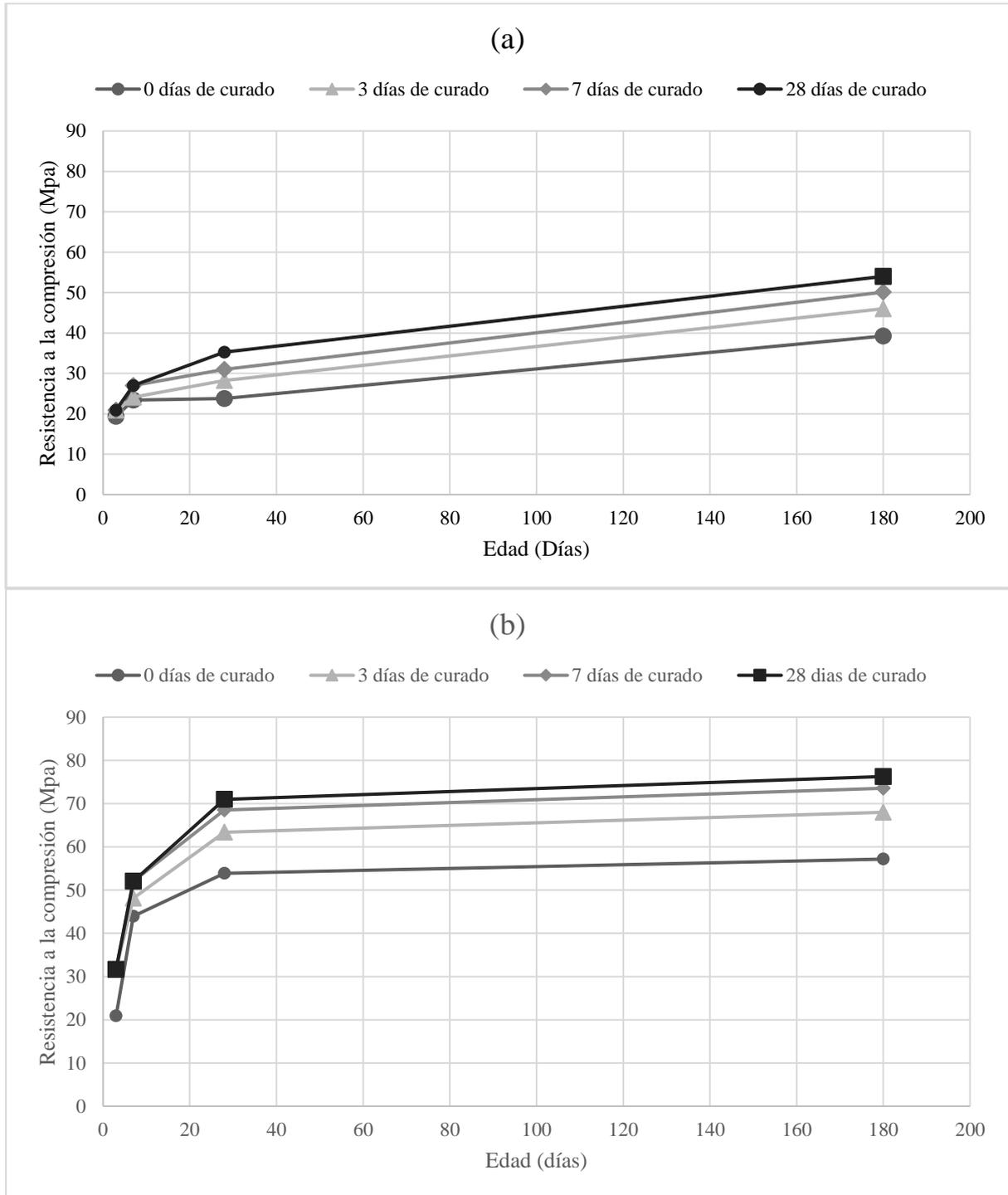


Figura 14: a) Resistencia a la compresión de cilindros con hormigón con cemento por desempeño b) Resistencia a la compresión de cilindros con hormigón con cemento Portland

2.4 Análisis

2.4.1 Efecto del curado en el número de rebote

El ensayo de número de rebote con esclerómetro es un método no-destrutivo ampliamente utilizado en el Ecuador. La norma ASTM C805, recomienda realizar dicho ensayo en superficies rígidas, lisas y que estén fijadas dentro de una estructura, por lo que no se pudo obtener resultados precisos y confiables debido a que este ensayo fue realizado a cilindros de 100 x 200 mm que no estaban empotrados y sentían un ligero movimiento al realizar el ensayo. En la Figura 11 se aprecia un incremento en el número de rebote con el tiempo, y mayor número de rebote a las mismas edades con más tiempo de curado. Además, el número de rebote para la mezcla P fue mayor que para la mezcla G, relacionada con una mayor resistencia a la compresión, como se esperaba. En la Figura 14 se normalizan los datos, donde se aprecia que a la edad de 28 días, el curado de 7 días provee números de rebote mayores al 90% de los valores en curado estándar 28 días para ambas mezclas.

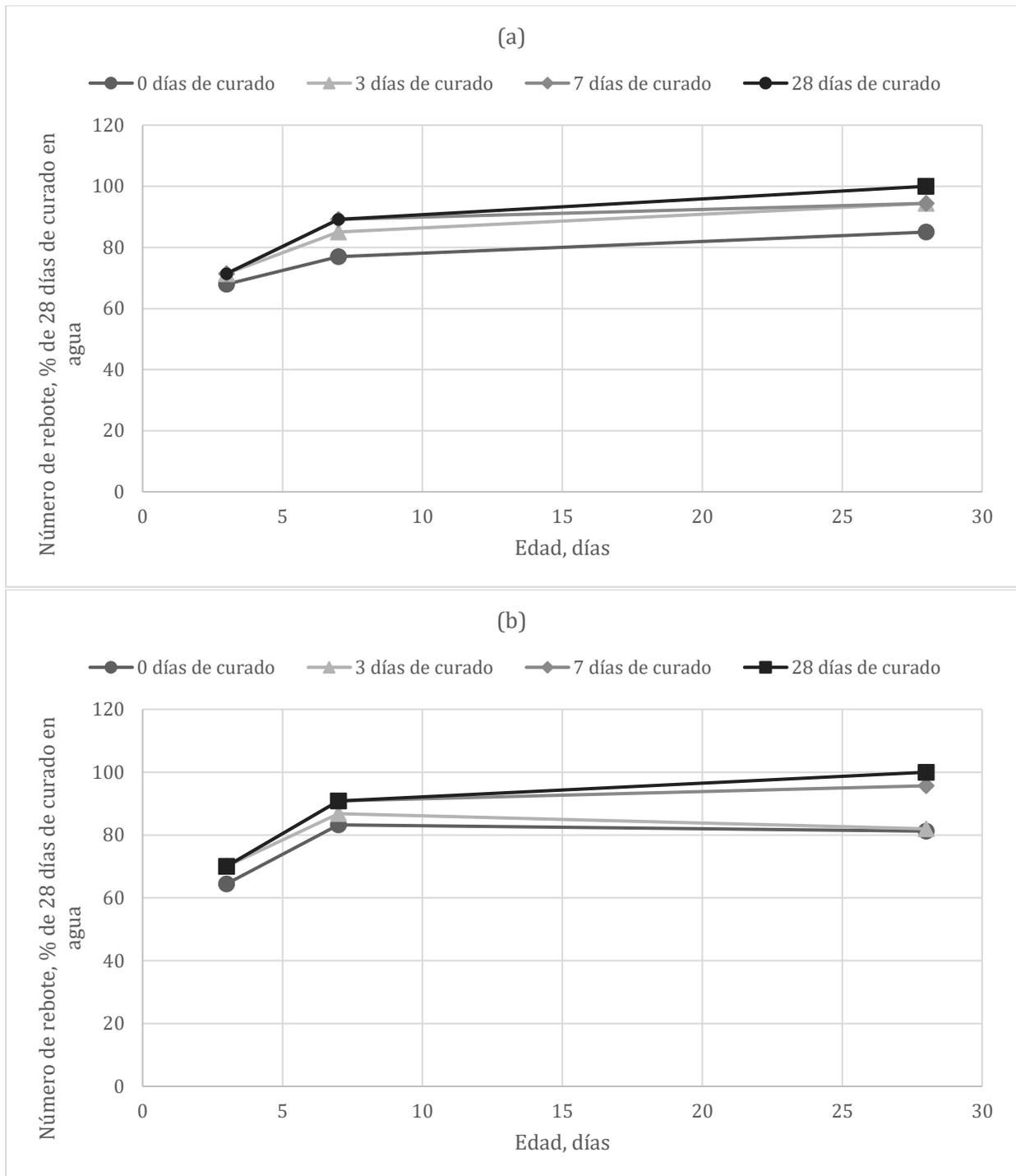


Figura 15: a) Número de Rebote en porcentaje de cilindros de hormigón con cemento por desempeño, b) Número de Rebote en porcentaje de cilindros de hormigón con cemento portland

Se puede observar también en el gráfico de la mezcla G, que el Número de Rebote va en crecimiento conforme aumenta la edad y los días de curado, mientras que el hormigón con

cemento portland se mantiene una vez que el hormigón llega al 7mo día de edad y 7mo día de curado en agua, aumentando al final solo un 5% de su valor.

2.4.2 Efecto del curado en la velocidad de pulso

En la Figura 16 se normalizan los datos respecto a la V_p a los 28 días con curado estándar. En esta Figura se aprecia que, a la edad de 28 días, todos los valores de V_p superan el 85% sin importar el tiempo de curado, sin embargo, sí se aprecian valores menores mientras menos tiempo sea el curado. En la figura 15(a) se puede apreciar que a los 7 días de edad y con 0, 3 y 7 días de curado los cilindros tienen un mismo comportamiento ya que alcanzan un 80% de la velocidad de pulso final, mientras que en la Figura 15(b) el hormigón tiene un mejor comportamiento con 7 días de curado y alcanza alrededor de un 95% de la velocidad de pulso final.

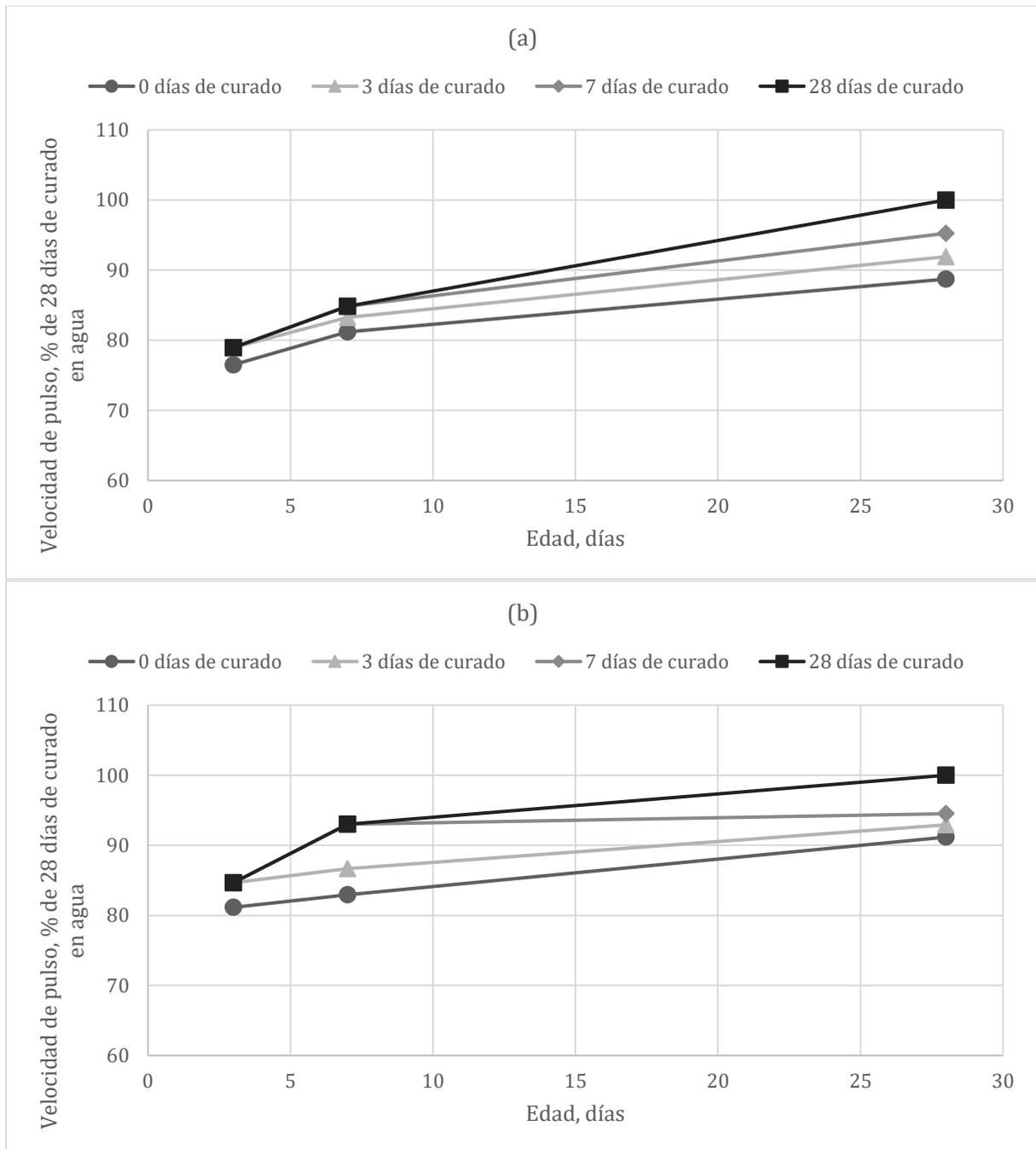


Figura 16: a) Velocidad de pulso en porcentaje de cilindros de hormigón con cemento por desempeño, b) Velocidad de pulso en porcentaje de cilindros de hormigón con cemento Portland

Se puede apreciar también que para la mezcla G, la velocidad de pulso incrementa conforme aumenta la edad y días de curado. Con respecto a la mezcla P, los 7 días en proceso de curado son los más importantes para el hormigón. Se puede observar también el mismo comportamiento que se dio en el número de rebote, que para la mezcla G, la V_p va en

crecimiento conforme la edad y días de curado, mientras que para la mezcla P el incremento es mínimo.

2.4.3 Efecto del curado en la resistencia a la compresión

En la Figura 14 (ver sección 2.3.4.3) se aprecia que la mezcla P tuvo resistencia a la compresión bastante alta, más de lo esperado para una mezcla con relación a/c de 0.5. En la Figura 16 y Tabla 30 y 31 se presentan los datos normalizados al valor de la resistencia a los 28 días de las probetas curadas en agua todos los 28 días, incluidos los valores a los 180 días. En la Figura 16 a) se puede apreciar que el comportamiento de la mezcla P es la esperada para una mezcla con cemento Portland, tal como se presentó en la Figura 1, y que es la que se encuentra en los textos universitarios. Se logra apreciar que los 0 días, 3 días y 7 días de curado proporcionaron resistencias relativas a la edad de 28 días de 76%, 89%, y 97% respectivamente; cumpliendo con los requerimientos de curado del ACI318-14 (2014) los 3 y a los 7 días de curado. Se aprecia también que después de los 28 días, la reacción de hidratación fue mínima, con incrementos a la edad de 180 días entre el 2% para probetas sin curado (0 d), y hasta el 8% para las probetas curadas 28 días.

Por otro lado, en la Figura 16 b) se puede apreciar que para la mezcla G, los 0 días, 3 días y 7 días de curado proporcionaron resistencias relativas a la edad de 28 días de 68%, 80%, y 88% respectivamente. Los 7 días de curado sí cumplen con los requerimientos de aceptación de curado del ACI318-14 (2014), muy cercano al límite del 85%. También se logra apreciar que la reacción de hidratación continuó luego de los 28 días, y sorprendentemente hubo incrementos entre el 44% y 53%. Se revisó de que los datos a los 180 días no tengan algún error sistemático o de cálculo, y la información es veraz. En todo caso se recomienda que para futuras investigaciones se tomen más datos intermedios a edades de 60, 90, 120 y 180 días, por ejemplo.

Tabla 30: Datos normalizados al valor de la resistencia a la compresión de hormigón hecho con cemento por desempeño

ID	Datos normalizados (%)
G0003-1	54.9
G0003-2	
G0303-1	59.3
G0303-2	
G0007-1	66.3
G0007-2	
G0307-1	68.3
G0307-2	
G0707-1	76.5
G0707-2	
G0028-1	67.5
G0028-2	
G0328-1	80.0
G0328-2	
G0728-1	87.9
G0728-2	
G2828-1	100.0
G2828-2	
G00180-1	111.3
G00180-2	
G03180-1	130.5
G03180-2	
G07180-1	142.1
G07180-2	
G28180-1	153.1
G28180-2	

Tabla 31: Datos normalizados al valor de la resistencia a la compresión de hormigón hecho con cemento Portland

ID	Datos Normalizados (%)
P0003-1	32.0
P0003-2	
P0303-1	44.6
P0303-2	
P0007-1	62.0
P0007-2	
P0307-1	67.8
P0307-2	
P0707-1	73.3
P0707-2	
P0028-1	75.9
P0028-2	
P0328-1	89.4
P0328-2	
P0728-1	96.6
P0728-2	
P2828-1	100.0
P2828-2	
P00180-1	78.1
P00180-2	
P03180-1	95.8
P03180-2	
P07180-1	103.7
P07180-2	
P28180-1	107.5
P28180-2	

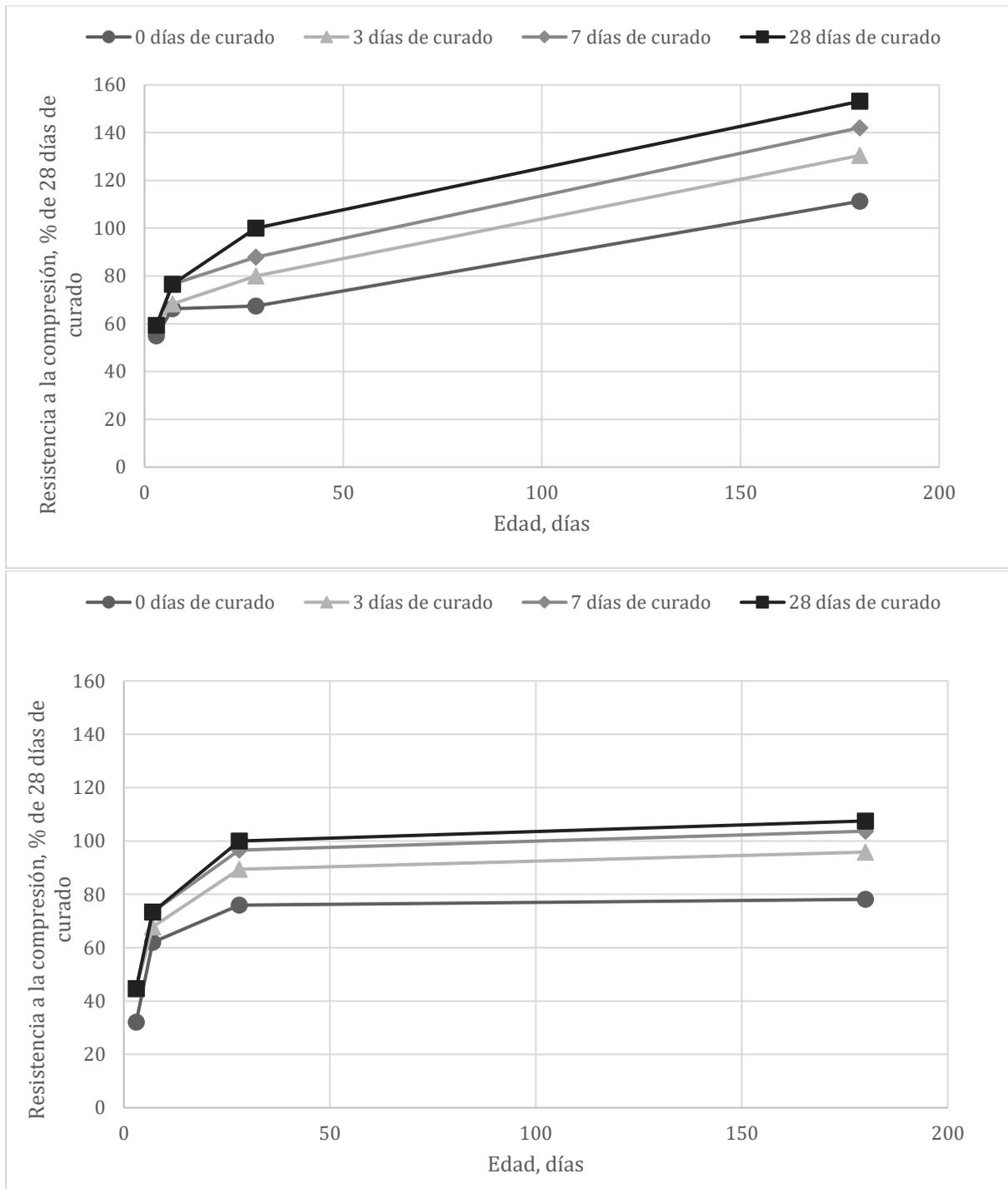


Figura 17: a) Resistencia a la compresión en porcentaje de cilindros de hormigón con cemento por desempeño, b) Resistencia a la compresión en porcentaje de cilindros de hormigón con cemento Portland

Se puede concluir que el hormigón con cemento por desempeño necesita más tiempo en edad y curado para ganar la resistencia esperada, mientras que el hormigón con cemento

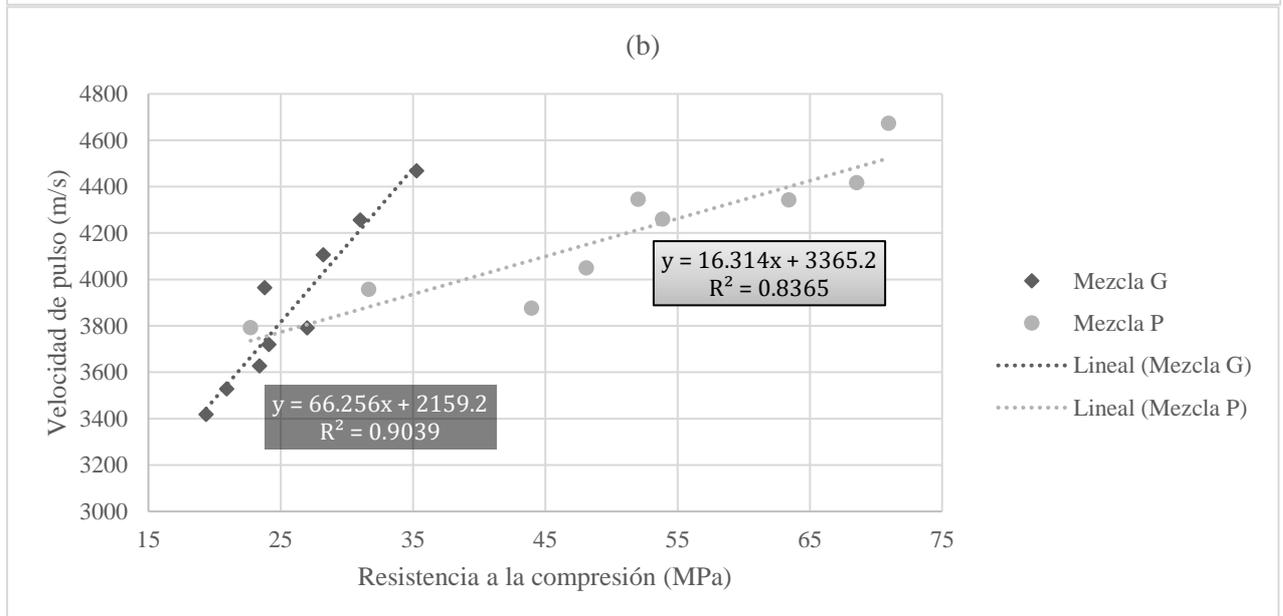
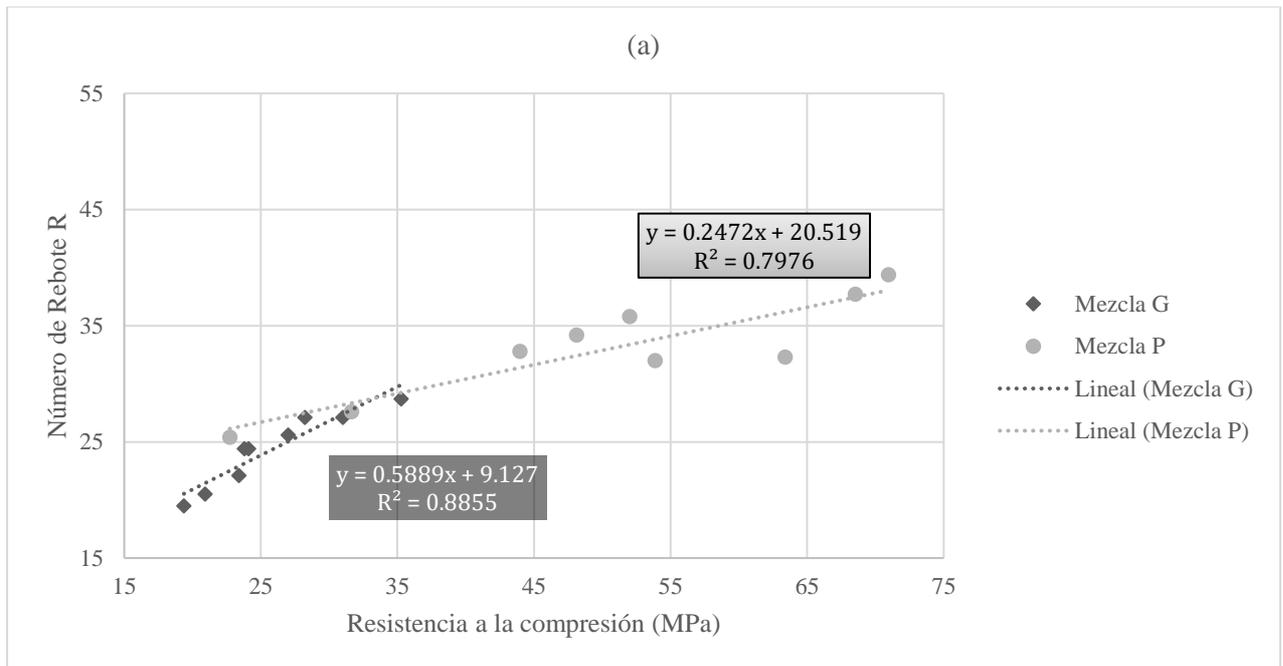
portland con 7 días de curado alcanza casi el 100% de su resistencia final, y su aumento con el tiempo es mínimo.

2.4.4 Efecto del curado en el módulo de elasticidad dinámico y estático

En la Tablas 24, 25, 26 y 27 se observa mayores magnitudes de módulo de elasticidad dinámico y estático en el hormigón con cemento Portland. Para que el módulo de elasticidad del hormigón con cemento Portland y cemento por desempeño lleguen al mismo esfuerzo se le aplica mayor fuerza al hormigón con cemento Portland esto produce un mayor módulo de elasticidad. Refiriéndose a la curva de módulo de elasticidad, se observa que el hormigón con cemento Portland tiene una pendiente mucho más pronunciada.

2.4.5 Correlaciones

En la Figura 17 se presenta la correlación encontrada entre los valores de resistencia a la compresión con número de rebote, velocidad de pulso, módulo de elasticidad dinámico, y módulo de elasticidad estático para ambas mezclas. Se provee además los valores de la regresión lineal correspondiente para número de rebote y velocidad y pulso.



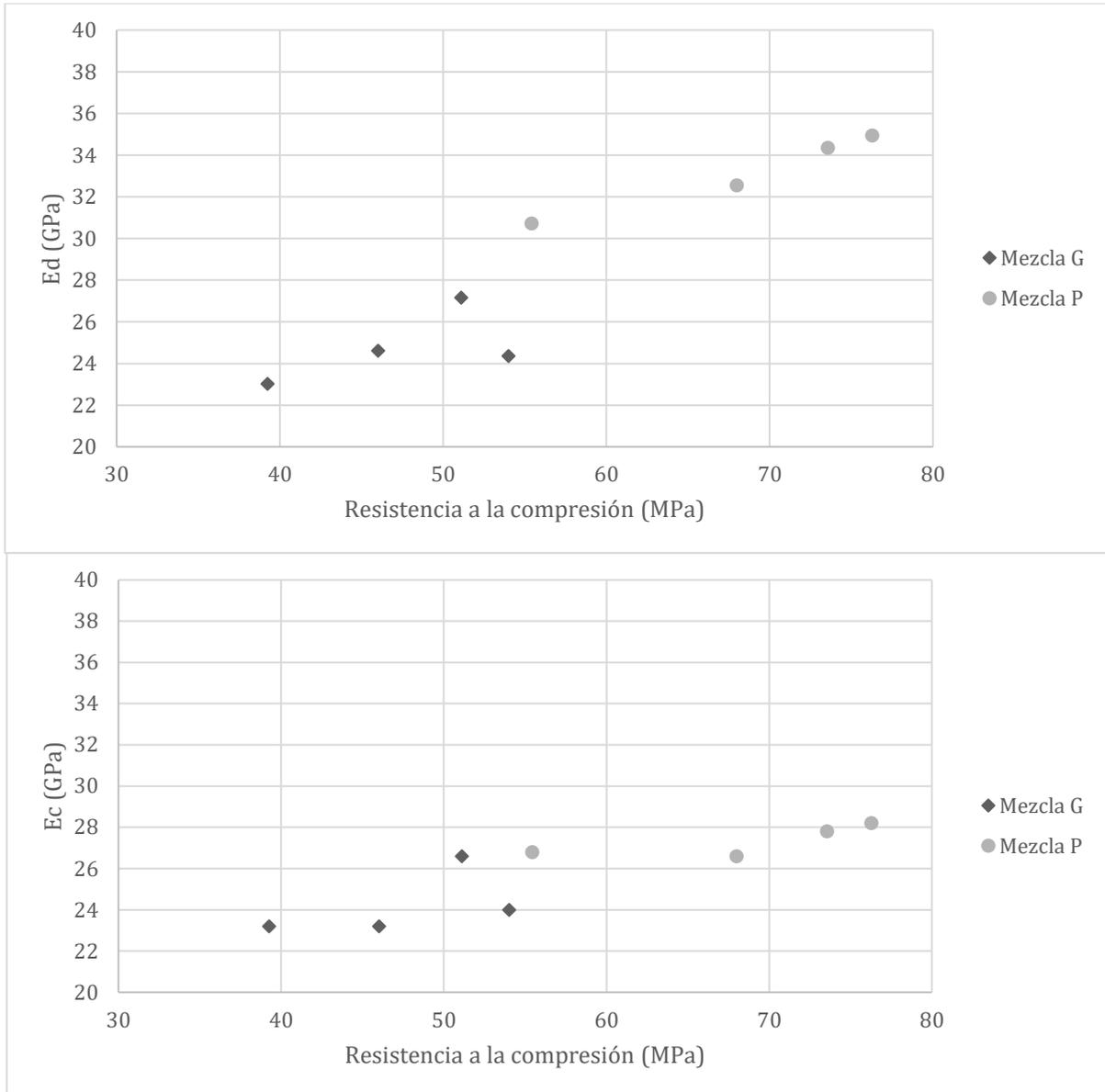


Figura 17: a) Regresión lineal entre la correlación de número de rebote y resistencia a la compresión para cada mezcla, b) Regresión líneas entre la correlación de la velocidad de pulso y resistencia a la compresión, c) Correlación entre el módulo de elasticidad dinámico y la resistencia a la compresión, d) Correlación entre el módulo de elasticidad estático y la resistencia a la compresión

CONCLUSIONES

3.1 Conclusiones de Resultados

Las conclusiones encontradas en la presente investigación son:

- De las dos mezclas realizadas, se concluyó que la mezcla de hormigón con cemento Portland mostró mejores resultados en las diferentes propiedades mecánicas realizadas.
- Se pudo realizar el ensayo de número de rebote para cada espécimen hasta la edad de 28 días, pero no se obtuvieron resultados concluyentes debido a que la superficie era muy pequeña y el cilindro no estaba empotrado por lo que se registraba ligeros movimiento al realizar dicho ensayo. A pesar de esto se observó mayores magnitudes mientras mayor el tiempo de curado en los especímenes.
- Se realizó el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico a cada espécimen hasta la edad de 28 días, donde se observó que el hormigón con mayor número de días de curado obtuvo mejores resultados en cuanto a magnitudes. La velocidad de pulso a los 28 días del hormigón con cemento Portland fue de 4670 m/s, mientras que el de la mezcla con hormigón con cemento por desempeño fue de 4470 m/s, y a menor tiempo de curado, se observaron menores velocidades de pulso.
- Se obtuvo resultados de módulo de elasticidad dinámico (E_d) y estático (E_c) para especímenes de 180 días de edad para ambas mezclas. Para la mezcla P, el E_d fue de 34.94 GPa, y el E_c de 28.1 GPa a la edad de 28 días en curado estándar, y para la mezcla G, el E_d fue de 24.35 GPa y el E_c de 23.9 GPa correspondientemente. Se observó un mayor E_d para la mezcla P respecto a la mezcla G, y un menor E_d para los especímenes con 0 días de curado, sin embargo, la variabilidad de los datos no permite concluir la disminución con tiempos de curado de 3 y 7 días.

- La resistencia a la compresión de la mezcla P a la edad de 28 días en curado estándar fue de 71 MPa, y de la mezcla G fue de 35.3 MPa. Se observó una disminución en ambas mezclas con menor tiempo de curado.
- Los 7 días de curado fueron adecuados para ambas mezclas, cumpliendo con los requisitos del ACI318-14 (2014), sin embargo, la mezcla G con cemento por desempeño estuvo cercano al límite del 85%.
- Se observó que, a edades mayores de 28 días, el hormigón con cemento Portland no tuvo mayor reacción de hidratación adicional, mientras que para el hormigón con cemento por desempeño continuó su proceso de hidratación, adquiriendo mayores resistencias hasta la edad de 180 días.
- La correlación que mejor resultado exhibe entre los ensayos de resistencia a la compresión con número de rebote y velocidad de pulso es la lineal tal y como se representa en la Figura 17.

3.2 Recomendaciones

Tras la realización de la presente investigación, se proponen las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda realizar más investigación en el tema, obteniendo datos a edades de 3, 7, 14, 21, 28, 60, 90, 120 y 180 días, con cilindros del mismo tamaño.
- Se recomienda estudiar el efecto del curado en los cementos por desempeño y compuestos disponibles en el Ecuador de diferentes fabricantes. Los resultados preliminares de este estudio indican que los 5 a 7 días de curado que establece la NEC-15 puedan ser insuficientes para el hormigón estructural ecuatoriano fabricado con cemento por desempeño.
- Al realizar ensayos de número de rebote (R), es necesario una superficie lisa y plana, mayor a los 10 cm de diámetro y preferentemente que esté empotrada para evitar movimiento al momento de disparar el martillo Schmidt.

- Para investigaciones similares se recomienda realizar un número mayor de especímenes para comprobar el comportamiento del hormigón por desempeño ocurrido en el presente trabajo.
- Se recomienda un trato diferente en el proceso de curado para hormigones con cemento por desempeño ya que como se observó en este trabajo, el hormigón con cemento Portland y el hormigón con cemento por desempeño tienen un comportamiento completamente diferente y el proceso que se realiza es en base a hormigones con cemento Portland.
- Se recomienda continuar con esta investigación realizando especímenes de un solo tamaño, utilizando un mayor número de intermedios y ocupar otras marcas de cemento para comprobar el comportamiento de la resistencia del hormigón con cemento por desempeño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM Standard C128. (2015). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. ASTM INTERNATIONAL.

ASTM Standard C215. (2008). *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*. ASTM INTERNATIONAL.

ASTM Standard C33. (2016). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM INTERNATIONAL.

ASTM Standard C39. (2018). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM INTERNATIONAL.

ASTM Standard C127. (2015). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. ASTM INTERNATIONAL.

ASTM Standard C469. (2014). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. ASTM INTERNATIONAL.

ASTM Standard C138. (2017). *Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete*. ASTM INTERNATIONAL.

ASTM Standard C192. (2016). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. ASTM INTERNATIONAL.

ASTM Standard C231. (2017). *Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method*. ASTM INTERNATIONAL.

ASTM Standard C597. (2016). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*.

ASTM INTERNATIONAL.

ASTM Standard C805. (2013). *Standard Test Method for Rebound Number of Hardened*

Concrete. ASTM INTERNATIONAL.

ASTM Standard C1157. (2017). *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*.

ASTM INTERNATIONAL.

ASTM Standard C595. (2018). *Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*.

ASTM INTERNATIONAL.

ASTM Standard C150. (2018). *Standard Specification for Portland Cement*. ASTM

INTERNATIONAL.

ACI 308R. (2016). *Guide to External Curing of Concrete*: American Concrete Institute.

ACI 318S. (2014). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*: American Concrete

Institute.

Garófalo, A. (2015). *Evaluación fisicoquímica de los cementos a partir de la correlación de*

sus propiedades asociadas con la producción de hormigón. Universidad Politécnica

de Litoral.

HOLCIM. (2015). *Cemento Fuerte*. Cemento hidráulico para construcción en general.

INECYC. (2007). *Consejos Prácticos sobre el hormigón (1 ed.)*. El manual de Pepe el

Hormigón: Instituto Ecuatoriano de Cemento y el Concreto.

NTE-INEN-152. (2012). *Cemento Portland. Requisitos*. Norma Técnica Ecuatoriana: Quinta

Revisión.

NTE-INEN-490. (2011). *Cementos Hidráulicos. Requisitos*. Norma Técnica Ecuatoriana: Quinta Revisión.

NTE-INEN-2380. (2011). *Cemento Hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos*. Norma Técnica Ecuatoriana: Segunda Revisión.

NEC-SE-HM. (2015). *Estructuras de Hormigón Armado*. Norma Ecuatoriana de la Construcción.

Neville, A. M. (1999). *Concrete Technology (1 ed.)*. Pearson Education.

Kosmatka, S. (2015). *Design and Control of Concrete Mixtures (13 ed.)*. PCA: Portland Cement Association.

Villagómez, L. (2016). *Predicción de la resistencia a la compresión del hormigón mediante métodos de ensayo no destructivos para hormigones convencionales en Pichincha, Ecuador*. Universidad San Francisco de Quito.