

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Efectos del tiempo de curado en la resistencia del hormigón con
cementos por desempeño y compuesto**

Darwin Alexis Quishpe Coyago

George Sebastian Londoño Yanouch

Ingeniería Civil

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

Quito, 10 de mayo de 2020

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Efectos del tiempo de curado en la resistencia del hormigón con
cementos por desempeño y compuesto**

Darwin Alexis Quishpe Coyago

George Sebastian Londoño Yanouch

Nombre del profesor, Título académico

Juan José Recalde Rosero, Ph.D.

Quito, 10 de mayo de 2020

DERECHOS DE AUTOR

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

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

Nombres y apellidos: Darwin Alexis Quishpe Coyago

Código: 00134474

Cédula de identidad: 1726114612

Nombres y apellidos: George Sebastian Londoño Yanouch

Código: 00121142

Cédula de identidad: 1717129298

Lugar y fecha: Quito, mayo de 2020

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

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

UNPUBLISHED DOCUMENT

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

RESUMEN

Uno de los principales rastros más visibles de la humanidad en el planeta tierra, vienen a ser sin ninguna duda las construcciones civiles, en las cuales en la gran mayoría usa al hormigón como material principal, es por ello que es muy necesario e importante conocer su comportamiento para poder generar estructuras que cuenten con las garantías necesarias para salvaguardar la vida de millones de personas. El hormigón es un material tan heterogéneo que existen varios factores que pueden llegar a afectar sus propiedades, algunos de ellos son la relación agua-cemento y, tiempo y la forma en las que el hormigón es curado ya que, puede hacer variar su resistencia a la compresión en una gran proporción. La Norma Ecuatoriana de las Construcción (NEC-2015) establece en su sección 9.6.1, que el curado mínimo de superficies fabricadas de hormigón sea de 5 a 7 días, lo cual se ratifica de manera general, independientemente del tipo de cemento usado en obra. En el siguiente trabajo se detalla la dosificación realizada con dos tipos de cemento para una relación agua-cemento de 0,45, tanto para cementos compuesto tipo IP como para cementos por desempeño GU, dos marcas comerciales ecuatorianas muy demandadas como son el cemento Selva Alegre y el cemento Holcim. Se realizó 4 curvas de curado 0, 7, 10 y 90 días, generadas para realizar ensayos a la compresión a edades de 3, 7 y 28 días. Las pruebas realizadas a la mezcla fueron las de densidad, contenido de aire, temperatura y asentamiento, mismas que estaban basadas en las respectivas normas planteadas por la ASTM, con lo cual se verifico las condiciones adecuadas para producir un hormigón aceptable en obra. Con los datos obtenidos se generó la curva resistencia a la compresión versus edad, en donde se esperaba que el tiempo mínimo de curado cumpla con el comportamiento que se menciona en la norma. Tal como se observó, para la mezcla de hormigón realizada con el cemento por desempeño GU, a los 7 días de curado cumplió con una resistencia adecuada y óptima, sin embargo, el cemento compuesto IP no lo hizo, adicional a ello el comportamiento de curado a 10 días para ambas muestras generó un rendimiento muy cercano al de las muestras curadas durante 28 días. Es por este motivo que se sugiere que en el Ecuador, la NEC establezca un mínimo de 7 a 10 días de curado para hormigones fabricados con cementos por desempeño y compuestos, ya que así se genera un mayor grado de seguridad en las obras civiles en el país.

Palabras clave: resistencia compresión, curado, NEC, portland, cemento compuesto, cemento por desempeño.

ABSTRACT

One of the most visible traces of humanity on the earth, certainly, are civil constructions. The majority of them use concrete as core material. This determines the importance and the need to understand its behavior in order to build safe and guaranteed civil constructions to safeguard the lives of millions of people. Concrete is such a heterogeneous material and there are several factors affecting its properties. Some of them are the water-cement ratio another is the time and the way concrete mixture is cured since, this can vary the resistance to compression in a considerable relative amount. The Ecuadorian Construction Standard (NEC-2015) establishes in its section 9.6.1, that the minimum cure period for surfaces made of concrete, is 5 to 7 days, this is generally corroborated, regardless the type of cement used for the purpose. The following study details the dosage carried out with two types of cement for a water-cement ratio of 0,45. Both for IP type composite cements and for GU performance cements, two highly demanded Ecuadorian trademarks, such as Selva cement Merry and Holcim cement. Four curing curves were carried out checks at 0, 7, 10 and 90 days. Then carried out the compression tests at ages 3, 7 and 28 days. Those tests were done on the density of the mixture, air content, temperature and the settlement, this based on the respective standards proposed by the ASTM. With this could be possible to verify the appropriate conditions in order to produce an acceptable concrete on site. With the obtained data, the compression resistance versus age, an statistical curve was generated. Then the minimum cure time was expected to comply with the behavior mentioned in the standard. As it was observed, for the concrete mix made with the GU performance cement, after 7 days of curing it complied with an adequate and optimal resistance, however, the IP composite cement didn't get it. In addition to the curing behavior, 10 days for both samples showed a performance very close to the ones of the samples cured for 28 days. For this reason it's been suggested that in Ecuador, the NEC establish a minimum of 7 to 10 days of curing for concretes made with performance cements and compounds, since this develops a greater grade of safety in civil works for the country.

Key words: compression resistance, curing, NEC, portland, composite cement, performance cement.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. Antecedentes.....	10
1.2. Justificación.....	12
1.3. Objetivos	13
1.4. Actividades	13
1.5. Resultados esperados	14
1.6. Definiciones.....	14
2. DESARROLLO DEL TEMA.....	16
2.1. Revisión de literatura	16
2.1.1. Tipos de cementos.....	16
2.1.2. Materiales cementantes suplementarios.....	19
2.1.3. Hidratación del cemento.....	21
2.1.4. Efectos del curado.....	23
2.1.5. Ensayos al hormigón en estado fresco.....	26
2.1.6. Durabilidad de las estructuras de hormigón.....	28
2.2. Plan experimental.....	29
2.3. Metodología.....	32
2.3.1. Diseño de la mezcla.....	32
2.3.2. Fabricación de especímenes cilíndricos.....	32
2.3.3. Curado.....	33
2.3.4. Ensayo de resistencia a la compresión.....	34
2.4. Resultados.....	34
2.4.1. Ensayos en estado fresco.....	34
2.4.2. Resistencia a la compresión.....	35
2.4.3. Porcentaje de resistencia a la compresión alcanzado.....	38
2.5. Análisis de resultados.....	39
3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	45
3.1. Conclusiones.....	45
3.2. Recomendaciones	47
4. REFERENCIAS.....	49
Anexo A: Registro fotográfico	52
Anexo B: Registro de datos de laboratorio.....	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de Cementos Portland Puros	18
Tabla 2. Tipos de Cementos Portland Compuestos	18
Tabla 3. Tipos de Cementos Portland Por Desempeño	19
Tabla 4. Características de hidratación del cemento.....	21
Tabla 5. Características de hidratación de los componentes del cemento.	22
Tabla 6. Criterios básicos de diseño de mezcla.	29
Tabla 7. Ejemplo de descripción de cilindros.....	31
Tabla 8. Dosificación de la mezcla para 1 m ³	32
Tabla 9. Resultados de ensayos del hormigón en estado fresco.	35
Tabla 10. Resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos con hormigón fabricado con cemento por desempeño.	35
Tabla 11. Resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos con hormigón fabricado con cemento compuesto.....	37
Tabla 12. Porcentaje alcanzado para cada curva y edad.	44
Tabla B 1. Dimensiones de especímenes cilíndricos fabricados con cemento GU.	56
Tabla B 2. Fuerza axial aplicada a especímenes cilíndricos fabricados con cemento GU.	57
Tabla B 3. Dimensiones de especímenes cilíndricos fabricados con cemento IP.	58
Tabla B 4. Fuerza axial aplicada a especímenes cilíndricos fabricados con cemento IP.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efecto del tiempo de curado sobre la resistencia	11
Figura 2. Compuestos principales de cemento Portland (ACI E3-13).....	17
Figura 3. Categorías y clases de exposición.....	20
Figura 4. Proceso químico del cemento	23
Figura 5. Plan experimental mezcla con cemento por desempeño.	30
Figura 6. Plan experimental mezcla con cemento compuesto.....	31
Figura 7. Almacenamiento de especímenes en el laboratorio USFQ.	33
Figura 8. Curado de los especímenes, área de curado laboratorio USFQ.....	33
Figura 9. Ensayos a compresión de los especímenes en el laboratorio USFQ.....	34
Figura 10. Resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos con hormigón fabricado con cemento por desempeño.	36
Figura 11. Resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos con hormigón fabricado con cemento compuesto.....	37
Figura 12. Porcentaje alcanzado en cada ensayo para mezcla con cemento GU.	38
Figura 13. Porcentaje alcanzado en cada ensayo para mezcla con cemento IP.....	39
Figura 14. Tipo de fracturas en especímenes cilíndrico (ASTM C39).	40
Figura 15. a) Fractura tipo 2, b) Fractura tipo 3 y c) Fractura tipo 6. Cilindros fabricados con cemento GU.....	40
Figura 16. a), b) Fracturas tipo 3 en cilindros fabricados con cemento IP.....	41
Figura 17. Comparación de resultados de las dos mezclas de hormigón.	42
Figura A 1. Humedecimiento de materiales.	52
Figura A 2. Ensayos de temperatura.	52
Figura A 3. Ensayo de asentamiento.....	52
Figura A 4. Especímenes cilíndricos fabricados.....	53
Figura A 5. Especímenes cilindros expuestos al aire libre (Cero días de curado).....	53
Figura A 6. Especímenes cilíndricos en proceso de curado a 23°C.....	53
Figura A 7. Toma de medidas de cilindros con 0 días de curado.	54
Figura A 8. Calibración de máquina para realizar ensayos de compresión.	54
Figura A 9. Ensayo a compresión utilizando neoprenos.	54
Figura A 10. Tipo de fractura en cilindros ensayados.	55

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Dentro del campo de la industria de la construcción, uno de los materiales más utilizados para realizar cualquier tipo de obra civil es el hormigón, un material muy útil que ha tenido una gran acogida alrededor del mundo pese a que existen nuevas tecnologías que promueven el buen proceso constructivo. Este material compuesto, a lo largo del tiempo ha venido siendo investigado ya que, para que logre tener un buen comportamiento a lo largo de su vida útil debe cumplir con sus estándares básicos.

Por otro lado, a lo largo de los años, se ha podido evidenciar que uno de los errores más usuales que se comete en la práctica a la hora de construir, es el de alcanzar la resistencia a la compresión requerido en el diseño, esto se debe a que el hormigón es un material tan heterogéneo que su resistencia puede variar en gran escala por efecto de la constitución de los materiales que lo componen, desde el tipo de cemento, la composición de los agregados hasta los factores menos visibles, pero no por ello, menos importantes, como son los efectos externos.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-HM (2015), nos dice que para asegurar una larga vida útil del hormigón debemos tener presente que es necesario realizar una mezcla que asegure las resistencias mecánicas, resistencia a agentes agresivos e intemperie. Para obtener esto, se debe asegurar la calidad de los materiales que componen el hormigón, así mismo, la relación agua-cemento es un aspecto esencial que determina la resistencia a la compresión del mismo.

Para llegar a cumplir dichos parámetros la NEC-SE-HM (2015), nos menciona que las superficies expuestas de hormigón, mismos que deben contener necesariamente cemento, deben mantenerse húmedas por tiempos específicos, a este proceso se le denominan proceso

de curado, según Kosmatka (2004) es “*la mantención de la temperatura y del contenido de humedad satisfactorios, por un período de tiempo que empieza inmediatamente después de la colocación (colado) y del acabado, para que se puedan desarrollar las propiedades deseadas en el concreto.*”

Como se puede observar en la figura 1, el tiempo de curado tiene una connotación importante a la hora en la que el hormigón genere resistencia a la compresión, dicha resistencia la va a generar a lo largo de toda su vida, ya que existe humedad en el ambiente, es por ello que existen tiempos de curado establecidos en los códigos alrededor del mundo para estimar el tiempo mínimo en el cual el hormigón alcanzaría una resistencia adecuada (Kosmatka, 2004).

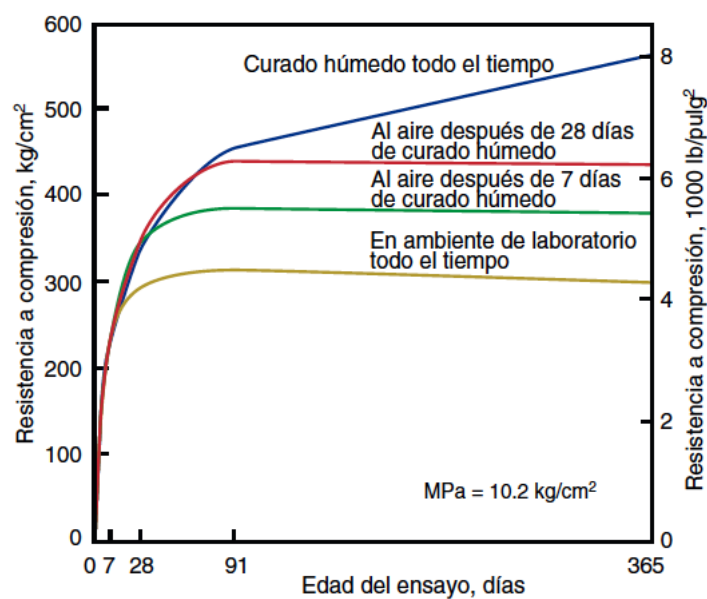


Fig. 12-2. Efecto del tiempo de curado húmedo sobre el desarrollo la resistencia del concreto (Gonnerman y Shuman 1928).

Figura 1. Efecto del tiempo de curado sobre la resistencia (Kosmatka, 2004).

La NEC-SE-HM (2015) en su sección 9.6.1, establece que el curado mínimo de superficies hechas de hormigón debe ser de 5 a 7 días, cuando no se dispone ninguna especificación del diseñador, es decir, que en el Ecuador no hay diferencia en los tiempos de curado por el tipo de cemento usado.

Por otro lado, la norma definida por el *American Concrete Institute* ACI 318S-14 Capítulo 26, sección 26.5.3.2, establece que el hormigón debe mantenerse por al menos un tiempo de 7 días en proceso de curado a una temperatura mayor a los 10°C. Esta condición se debe a que a esa edad, el concreto adquiere una resistencia considerable, misma que se necesita para que las construcciones sean útiles y de gran eficiencia.

Si bien se establecen tiempos de curado mínimos, tanto en el código nacional como internacional, cabe recalcar que estos estudios fueron generados en base a los cementos portland puros, los cuales tienen un significativo uso de energía para desarrollarlo, produciendo así inherentemente gases de efecto invernadero. Ante este hecho, se han desarrollado enfoques diferentes con el fin de mejorar la sostenibilidad del hormigón, haciendo que dependa menos del cemento Portland y se compongan más de compuestos como: cenizas volantes de carbón, humo de sílice, cemento de escoria y puzolana (ACI E3-13). Es por ello que resulta de gran importancia estudiar el comportamiento que tiene el curado en cementos con diferentes composiciones, como lo son los cementos por desempeño de uso general GU y compuesto puzolánico IP. En consecuencia es pertinente cuestionarse ¿El tiempo de curado establecido en los códigos de construcción, tanto nacional como internacional, serán suficientes para que el hormigón fabricado con estos tipos de cementos alcancen una resistencia óptima?

1.2. Justificación

Como se había mencionado previamente, existen normativas que establecen el tiempo suficiente de curado del hormigón, dichas normativas corresponden al ACI 318S-14 y el capítulo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-HM, la misma que se basa en los estudios realizados a la normativa internacional.

En la actualidad, los cementos comúnmente utilizados en el Ecuador son los cementos portland por desempeño y compuestos, por lo cual no es muy seguro que el tiempo de curado

corresponda a lo que se establece en las normas mencionadas, principalmente porque existe una gran diferencia en cuanto a la composición química del material.

Según la fábrica Holcim Ecuador S.A., proveedores de cemento hidráulico tipo GU para la construcción en general, nos mencionan que este cementante es destacado por su durabilidad y desempeño, y es desarrollado según las normativas establecidas en la NTE INEN 2380. Por otra parte, lo característico del cemento portland puzolánico es su durabilidad, tiene gran resistencia a agentes agresivos y desprende menos calor de hidratación (Selvagre, 2018). Estos, son dos cementos con diferente composición química por lo que, para asegurarnos de lo antes mencionado, vamos a realizar una investigación para determinar su comportamiento con diferentes curvas de resistencia versus edad del hormigón.

1.3. Objetivos

Los objetivos para este trabajo de investigación son los siguientes:

- Estudiar el efecto del tiempo de curado en la resistencia del hormigón fabricado con cemento por desempeño de uso general y cemento compuesto puzolánico.
- Estudiar el incremento de la resistencia a diferentes edades y diferentes tiempos de curado para hormigón fabricado con cemento por desempeño y cemento compuesto puzolánico.

1.4. Actividades

Las actividades programadas para que este trabajo de investigación cumpla con todas las expectativas son:

- a. Diseñar la mezcla de hormigón mediante la aplicación del programa de dosificación de mezclas por el método volumétrico.

- b. Fabricar especímenes cilíndricos de 100x200 mm.
- c. Realizar ensayos a edades tempranas con especímenes sin curado y en proceso de curado.
- d. Realizar ensayos de edad madura con especímenes sin curado y en proceso de curado.
- e. Analizar resultados obtenidos de los procesos realizados previamente.

1.5. Resultados esperados

Los resultados esperados para este trabajo de investigación se detallan posteriormente:

- a. Curvas de f_c vs. edad para 4 tiempos de curado.
- b. Proponer o confirmar con investigaciones previas si los tiempos de curados mínimos para hormigones fabricados con cemento portland por desempeño de uso general y cemento portland compuesto puzolánico alcanzan una resistencia óptima.

1.6. Definiciones

- f'_c = resistencia especificada a la compresión del concreto, medida en MPa.
- f_c = Resistencia real del concreto, la misma que debe ser excedida por los especímenes, medida en MPa.
- P = Carga axial.
- H = Altura de cilindros.

- D = Diámetro de cilindros.
- $\frac{w}{c}$ = Relación agua cemento.
- $\frac{a}{c}$ = relación agregados materiales cementantes.
- f_{cm} = Resistencia promedio a la compresión requerida, MPa.
- w_c = Densidad del concreto, Kg/m^3

2. DESARROLLO DEL TEMA

2.1. Revisión de literatura

2.1.1. Tipos de cementos.

El cemento se puede definir como uno de los componentes más importantes del hormigón, esto debido a que los demás agregados como lo son: el agregado fino y grueso forman un solo componente cuando son mezclados con el cemento. La principal razón como lo menciona Neville (1995), es que el cemento es un componente con propiedades adhesivas y cohesivas, mismas que ayudan a formar un elemento resistente y rígido. Al mismo tiempo, a este componente se le conoce como cemento hidráulico sea cual sea el tipo, debido a que el proceso de endurecimiento se da cuando este entra en contacto con agua y adquiere mayores resistencias cuando después del fraguado inicial entra en un proceso de curado, lo cual implica estar expuesto al agua el mayor tiempo posible.

Una característica que engloba a todos los cementos, es que están compuesto por 4 principales materias primas, siendo estas: la sílice, la alúmina, el óxido de calcio (Ca) y el óxido de hierro, mismas que conjuntamente con el calor generan el proceso de la mano factura del cemento, en donde se procede a otorgarle calor a la mezcla, para lo cual se usa el cilindro rotatorio conocido como klin, permitiendo así la obtención del Clinker debido a sus altas temperaturas (Videla, s/f).

El cumplimiento de los requisitos óptimos del cemento está basado en la norma ASTM C150, para lo cual se realizan muestreos mediante el análisis químico y pruebas físicas como la fuerza, finura y comportamiento de ajuste. Dichos análisis y pruebas son necesarias para verificar que el cementante cumpla con los controles de calidad y los requisitos estándares adecuados (ACI E3, 2013).

Por otro lado, los 4 componentes que se encuentran en el cemento portland se detallan en la figura 2, los cuales son fundamentales a la hora de realizarse la hidratación del cemento.

Table 3.1—Chemical compounds formed in cement kiln

Name	Chemical formula	Shorthand notation*
Tricalcium silicate (alite)	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S
Dicalcium silicate (belite)	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S
Tricalcium aluminate	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Tetracalcium aluminoferrite (ferrite phase)	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

*Shorthand notation routinely used by cement chemists using abbreviations for oxides: CaO is C; SiO₂ is S; Al₂O₃ is A; Fe₂O₃ is F. Also, SO₃ is S and H₂O is H.

Figura 2. Compuestos principales de cemento Portland (ACI E3-13).

Es de mucha importancia mencionar que en el transcurso del tiempo, se ha podido desarrollar distintos tipos de cementos portland, siendo estos: cemento portland puros, compuestos y por desempeño (Holcim, 2016). A continuación, describiremos cada tipo de los cementantes.

2.1.1.1. Cementos Portland Puros.

El nombre “portland”, proviene del nombre comercial utilizado por Joseph Aspdin en 1824, para nombrar al hormigón, debido a que su forma se asemejaba en gran medida a un piedra portland (ACI E3, 2013). Una característica de los cementos portland es que reaccionan con el agua y se produce el endurecimiento aun cuando este se encuentra bajo el agua.

Estos tipos de cementos generan grandes cantidades de CO₂ al momento de producirlos debido a que en su fabricación intervienen procesos físico-químicos diversos (Holcim, 2016).

Tabla 1. Tipos de Cementos Portland Puros (ASTM C150, 2012).

Cemento Portland Puros	Especificación
Tipo I	Uso para cuando se requieran propiedades especiales especificadas
Tipo II	Uso cuando se desean alcanzar resistencias moderadas a sulfatos o calor de hidratación moderada
Tipo III	Uso cuando se requiere alcanzar altas resistencias a temprana edad
Tipo IA, IIA, IIIA	Cementos incorporadores de aire
Tipo IV	Uso cuando se desea un bajo calor de hidratación
Tipo V	Uso cuando se desea alcanzar resistencias altas a los sulfatos

2.1.1.2. Cemento Portland Compuestos.

Con el transcurso del tiempo el uso del cemento en la industria de la construcción hizo que los profesionales fueran tomando buenas iniciativas y a partir de ello se lo fue mejorando hasta que se logró obtener el cemento compuesto, en donde parte del Clinker fue sustituido por componentes minerales que formen un componente con la misma capacidad de desempeño que los cementos Portland puros (Holcim, 2016). En esta parte, cabe recalcar que la filosofía está basada en cantidad y calidad, es decir, realizar cementos compuestos que abastezca a todas las ciudades, sin producir afectaciones al medio ambiente y con resistencias duraderas.

Tabla 2. Tipos de Cementos Portland Compuestos (INECYC, 2007).

Cemento Portland Compuestos	Especificación
IS	Portland con escoria de altos hornos
IP	Portland Puzolánico
P	Portland Puzolánico (Cuando no se requieren altas resistencias iniciales)
I(PM)	Portland Puzolánico modificado
I(SM)	Portland con escoria modificado
S	Cemento de escoria

Según la Asociación de Cemento Portland dice que “*Los cementos portland puzolánicos se designan como tipo IP o tipo P. El tipo IP se lo puede usar para la construcción en general y el tipo P se usa en construcciones que no requieran altas resistencias iniciales*”. Esto es importante, debido a que el tiempo en el que estos tipos de cementos adquieren

resistencia es tardío, con lo cual si se corta el tiempo de curado a tempranas edades, alrededor de los 5 a 7 días que estaría permitido según la norma Ecuatoriana (NEC, 2015), la posibilidad de que el cemento de tipo P no obtenga una resistencia óptima es alta.

2.1.1.3. Cementos Portland Por Desempeño.

En esta nueva normativa, la cual es considerada como la normativa moderna, se eliminan las restricciones en la composición química del cemento, misma que era un parámetro clave en los cementos Portland mencionados anteriormente. Ahora, el requisito prioritario para producir cementos portland por desempeño, es que tienen que cumplir con niveles según sea el requerimiento del cliente (Holcim, 2016).

Tabla 3. Tipos de Cementos Portland Por Desempeño (INECYC, 2007).

Cemento Portland Por Desempeño	Especificación
GU	Uso en construcciones en general
HE	Elevada resistencia inicial
MS	Moderada resistencia a los sulfatos
HS	Alta resistencia a los sulfatos
MH	Moderado calor de hidratación
LH	Bajo calor de hidratación
Si adicionalmente tiene R, indica baja reactividad con árido álcali-reactivos	

2.1.2. Materiales cementantes suplementarios.

Además del cemento Portland, existen materiales cementantes suplementarios, los cuales son esenciales en construcciones donde requieran concretos de altas resistencias o resistencias aceleradas (Moreno, 2016). Las preocupaciones para fabricar estos hormigones especiales es que normalmente se utilizan en zonas en donde existe una alta variación de temperatura y humedad, por lo cual un cementante de uso común no llegaría a satisfacer las propiedades básicas necesarias en una construcción civil.

Según la *American Society for Testing and Materials* (ASTM), los materiales cementantes suplementarios (MCS), corresponden a compuestos inorgánicos que son esenciales en el uso de la fabricación del concreto, ya que ayudan a mejorar las propiedades a través de la actividad hidráulica y puzolánica.

Dentro de los MCS, encontramos: al cemento, las cenizas volantes o más conocido como “*Fly Ash*”, las puzolanas naturales y puzolanas artificiales, el humo de sílice o también denominado “*Silica Fume*” y la escoria granulada de alto horno (Moreno, 2016).

Según el capítulo 19 del ACI 318S 14, estos MCS son esenciales para controlar las fallas que se dan por los efectos que se muestra a continuación en la figura 3:

Tabla 19.3.1.1 — Categorías y clases de exposición

Categoría	Clase	Condición	
Congelamiento y deshielo (F)	F0	Concreto no expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo	
	F1	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y exposición ocasional a la humedad	
	F2	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y en contacto frecuente con la humedad	
	F3	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo que estará en contacto frecuente con la humedad y expuesto a productos químicos descongelantes	
Sulfato (S)		Sulfatos solubles en agua (SO_4^{2-}) en el suelo, % en masa ^[1]	Sulfato (SO_4^{2-}) disuelto en agua, ppm ^[2]
	S0	$\text{SO}_4^{2-} < 0.10$	$\text{SO}_4^{2-} < 150$
	S1	$0.10 \leq \text{SO}_4^{2-} < 0.20$	$150 \leq \text{SO}_4^{2-} < 1500$ o agua marina
	S2	$0.20 \leq \text{SO}_4^{2-} \leq 2.00$	$1500 \leq \text{SO}_4^{2-} \leq 10000$
	S3	$\text{SO}_4^{2-} > 2.00$	$\text{SO}_4^{2-} > 10000$
En contacto con el agua (W)	W0	Concreto seco en servicio Concreto en contacto con el agua donde no se requiere baja permeabilidad	
	W1	En contacto con el agua donde se requiera baja permeabilidad	
Protección del refuerzo para la corrosión (C)	C0	Concreto seco o protegido contra la humedad	
	C1	Concreto expuesto a la humedad, pero no a una fuente externa de cloruros	
	C2	Concreto expuesto a la humedad y a una fuente externa de cloruros provenientes de productos químicos descongelantes, sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen	

Figura 3. Categorías y clases de exposición.

2.1.3. Hidratación del cemento.

Según el *American Concrete Institute* (2013), el proceso de hidratación hace que el hormigón realizado con cemento portland se endurezca y desarrolle resistencia con el tiempo. Para que se tenga un buen proceso de hidratación es importante que la humedad relativa dentro del hormigón se mantenga en un mínimo del 80%, lo que implica que es necesario considerar que el material fabricado debe encontrarse en un ambiente húmedo y temperatura constante (Neville, 1995).

Tal como lo menciona Neville (1995), “*Le Chatelier fue el primero en observar hace 130 años, que los productos de hidratación del cemento es químicamente igual que los productos de hidratación de los compuestos individuales.*” En este proceso de hidratación, los compuestos principales del cemento, mismos que se mencionan en la tabla 4, reaccionan con el agua generando reacciones químicas donde se produce lo que se conoce como pasta de cemento, y a medida que el tiempo pase todos los compuestos van a reaccionar.

Tabla 4. Características de hidratación del cemento.

Table 3.1—Chemical compounds formed in cement kiln

Name	Chemical formula	Shorthand notation*
Tricalcium silicate (alite)	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S
Dicalcium silicate (belite)	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S
Tricalcium aluminate	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Tetracalcium aluminoferrite (ferrite phase)	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

*Shorthand notation routinely used by cement chemists using abbreviations for oxides: CaO is C; SiO_2 is S; Al_2O_3 is A; Fe_2O_3 is F. Also, SO_3 is S and H_2O is H.

En base a la tabla 5, el *American Concrete Institute* (2013), dice que el silicato tricalcico (C_3S) gana la mayor parte de la fuerza en las primeras 2 a 3 semanas; el silicato bicálcico

(C_2S) contribuye a la resistencia a largo plazo; mientras que el aluminato tricálcico (C_3A) y ferro aluminato tetracálcico (C_4AF) contribuyen principalmente al endurecimiento temprano.

Tabla 5. Características de hidratación de los componentes del cemento.

Table 3.3—Characteristics of hydration of cement compounds

Compound	Reaction rate	Strength attained
C_3S	Moderate	High
C_2S	Slow	Low at first; high later
C_3A	Fast	Low
C_4AF	Moderate	Low

Los factores principales a tener en cuenta en el proceso de hidratación son el calor desprendido en este proceso y la velocidad con la que se forma la pasta de cemento, es decir, qué cantidad del hidróxido de calcio se genera, ya que es el mismo el que se acumula ocupando los poros, con lo cual el paso del agua cada vez se interrumpe más. Si bien el cemento puede generar resistencia a lo largo de toda su vida, el tiempo en lo que esto sucede es lento, es por ello que en los análisis de los códigos, se pueden apreciar que las curvas de resistencia en función del tiempo de curado realizadas a los 28 días se produce un cambio en la velocidad con la que el cemento genera resistencia por medio del proceso de la hidratación.

A continuación, mostramos una figura en la cual se puede observar cómo se da la etapa de fabricación e hidratación del cemento:

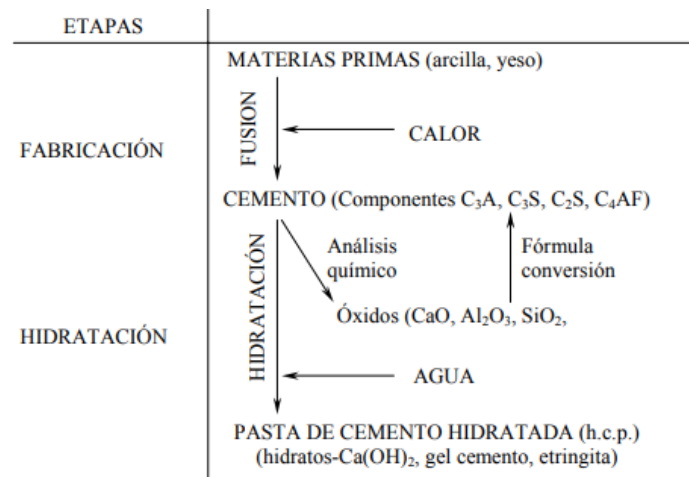


Figura 4. Proceso químico del cemento (Videla, s/f).

Por otro lado, uno de los aspectos importantes en el proceso de hidratación es la finura del cemento, mismo que ha aumentado en el transcurso del tiempo debido a se desarrolla rápidamente la resistencia en el hormigón. En esta parte, hay que tener en cuenta que mientras más fino sea el cementante, necesitara mayor cantidad de agua para obtener una consistencia adecuada, así mismo según sea el caso se irán requiriendo mayores dosis de aditivos incorporadores de aire (ACI E3, 2013).

2.1.4. Efectos del curado.

El curado del hormigón es la práctica que se utiliza para fortalecer las propiedades del mismo. Es aquí donde se asegura el buen comportamiento de las estructuras tanto en resistencia y durabilidad. Según el ACI 308R (2016), el curado en el hormigón es el proceso que se realiza con el fin de mantener las condiciones de humedad y temperatura, y así poder hidratar el cemento para que alcance las condiciones de resistencia satisfactorias.

En el trabajo de investigación de Figueroa (2007), se mencionan las siguientes recomendaciones que se deben tomar en cuenta para que los efectos del curado se vean reflejados a la larga:

- Dosificación de la mezcla de hormigón y relación w/c.
- Características de los agregados a utilizarse.
- Propiedades deseadas en el hormigón.
- Evolución del desarrollo de estas propiedades durante y después del curado.
- Eficiencia en el método empleado para curar el hormigón.

En cuanto a la última recomendación dada, se hace mención que existen tres tipos de curado: el curado normal, el cual consiste en mantener la humedad con la exposición de la superficie del hormigón al agua; el curado mediante la aplicación de vapor, el cual consiste en acelerar el desarrollo de resistencia mediante el proporcionamiento de calor y humedad; y por último, el curado mediante el uso de membranas y retardantes de evaporación, mismos que tienen como fin prevenir la pérdida de humedad (Figuroa, 2007).

Tomando como referencia la NEC (2015), nos menciona que se permite los siguientes tipos de curado:

- Curado con agua
- Materiales selladores
 - Lámina plástica
 - Papel impermeable
 - Compuestos líquidos formadores de membrana

El proceso de hidratación del cemento se va a desarrollar siempre y cuando los componentes del cemento tengan el factor agua con el cual reaccionar, es por ello que mantener

hidratado el cemento es fundamental para que estas reacciones se sigan produciendo, al menos en su etapa de vida inicial, porque como menciona Neville (2011), “*Después de 28 días en contacto con agua, se descubrió que se había hidratado a una profundidad de solo 4 μm , 1.9 y 8 μm después de un año*”, es decir, que después de los 28 días de edad la hidratación que se le puede dar al hormigón a través de curado es mínima, pero el efecto que este proceso tiene sobre el hormigón a edades inferiores de los 28 días es muy apreciable y fundamental de conocer ya que, es en este punto donde las normas han generado sugerencias y recomendaciones sobre los tiempos que se tiene que curar el hormigón en obra para edades tempranas, pero este efecto es tan variante y dependiente totalmente de los componentes que lo integran, tal como decía Le Chatelier, por lo cual el análisis de las características que tiene el curado sobre cada uno de los diferentes tipos de cementos es fundamental.

2.1.4.1. Influencia del curado en la resistencia a la compresión.

A través de lo mencionado, el hormigón una vez que ha pasado por su proceso de fabricación y fraguado, viene el curado y depende de la buena aplicación de esta, ya sea buena o mala, para obtener resistencias esperadas.

En el caso de que el proceso de curado no se realice adecuadamente, vendrán las diferentes fallas al hormigón, principalmente porque va a existir una evaporación excesiva de agua, teniendo como efecto las visibles fallas de fisuramiento en el hormigón endurecido (Figueroa, 2007).

Por otro lado, el ACI 308R (2016) dice que el curado tiene una gran influencia en las propiedades del hormigón endurecido, por lo que recomienda que para tener un hormigón de buena calidad se debe realizar un buen curado.

En un estudio de investigación realizada por Garín, Santilli & Pejo (2012), nos menciona que la variación porcentual de la resistencia a la compresión con un curado al 100% y 50% de humedad es considerable, siendo el curado con humedad al 100% la que más resistencia a la compresión logro obtener.

La resistencia a la compresión, es la capacidad de un elemento a resistir carga axial en dirección donde el elemento se aplaste, según el *Portland Cement Association* (2004) “*se puede definir como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto. Normalmente, se expresa en kilogramos por centímetros cuadrados (kg/cm²), mega pascales (MPa) o en libras por pulgadas cuadradas (lb/pulg² o psi) a una edad de 28 días*”. En esta capacidad a la compresión es de vital importancia conocer la magnitud de la fuerzas que un elemento estructural es capaz de resistir, ya que en el hormigón armado el encargado de trabajar esencialmente bajo la acción de fuerzas a compresión es el concreto, es por ello que los diseños de obras civiles especifican la resistencia a la compresión con la cual fue diseñado el miembro.

Es importante tener control de la resistencia a la compresión que tiene el hormigón ya que, como se mencionó anteriormente es un material tan heterogéneo que su resistencia puede modificarse por cada variación de los componentes que lo integran, en este sentido la normas que se deben cumplir para ensayar probetas realizadas de hormigón es la ASTM C39, con lo cual los ensayos regidos por esta norma asegura conocer con exactitud las fuerzas soportadas por el espécimen.

2.1.5. Ensayos al hormigón en estado fresco.

Para poder obtener una buena mezcla de hormigón, hay que verificar los parámetros de diseño a utilizarse, así como, densidad de los materiales, porcentajes de absorción y sobre todo la relación de w/c que se va a utilizar para fabricar la mezcla. A partir de aquello y siguiendo

las especificaciones de la norma ASTM C192, que se basa en describir la preparación del concreto se puede obtener el material requerido y ya con ello se puede partir a realizar las pruebas del hormigón fresco, para posteriormente realizar un análisis profundo de los resultados. A continuación, daremos una pequeña descripción de las pruebas esenciales a realizarse.

2.1.5.1. Prueba de temperatura del hormigón.

Para controlar la temperatura del hormigón, nos basamos en la norma ASTM C1064, la cual indica que es uno de los primeros datos a registrar una vez que el concreto esté listo y sea sacado de la mezcladora.

La medición de la temperatura, es de gran importancia para controlar la calidad de la mezcla, esto se debe a que el calor que se produce en los procesos de hidratación es considerable, con lo cual es un factor que se debe tomar en cuenta para tener una referencia de las propiedades en las que va a resultar la mezcla.

2.1.5.2. Prueba de asentamiento/revestimiento del hormigón.

Esta prueba esta descrita en la norma ASTM C143, la cual nos menciona que el objetivo del ensayo es controlar la consistencia del hormigón fresco, es decir, mediante esto se puede determinar la depreciación del concreto. Los materiales que tengan un asentamiento menor a 15mm pueden no ser plásticos, al contrario, si el asentamiento es mayor a 230mm puede que el material sea cohesivo, sin embargo, no se garantiza la debida trabajabilidad.

2.1.5.3. Prueba de densidad del hormigón fresco.

El fin de este ensayo según la norma ASTM C138, es determinar la cantidad de masa en un determinado volumen. Este ensayo también se lo conoce como rendimiento, debido a

que determina la cantidad de concreto real que se produce, es por ello que se mide la densidad en unidades de Kg/m^3 .

2.1.6. Durabilidad de las estructuras de hormigón.

La principal filosofía de diseño que nos menciona el ACI 318S-14 capítulo 19, es proveer resistencia y durabilidad a las estructuras de hormigón. En esta parte se hace mención que dependiendo de las estructuras a realizarse tienen un límite mínimo de resistencia a la compresión.

Por otro lado, en el capítulo 14 del ACI 318S-14, nos especifica que el uso de hormigón simple, aplica para los siguientes diseños de miembros:

- a) Apoyados de manera continua sobre el suelo o sobre otros miembros estructurales que garanticen un soporte vertical continuo.
- b) Tengan el efecto de compresión bajo todas las condiciones de carga.
- c) Muros.
- d) Pedestales.

Por lo tanto, la durabilidad de las estructuras va a depender del tipo de miembro diseñado y el tipo de hormigón a utilizarse. Para los casos descritos anteriormente, el reglamento nos dice que basta fabricarlos con hormigón simple, lo cual implica un hormigón común, mismo que contiene: agua, cemento Portland, agregado fino y agregado grueso.

Añadiendo a lo que ya se mencionó en la sección 2.4, a los miembros que sean para uso de estructuras especiales, para que tengan durabilidad y resistencia se debe diseñar acorde a las condiciones actuantes en el campo de trabajo.

En el capítulo 19 del ACI 318S-14, se hace mención a los requisitos de durabilidad del concreto, en donde dice que una de las principales causas por las que estos llegan a fallar es por la penetración de fluidos, y esta a su vez depende del diseño de mezcla utilizado.

2.2. Plan experimental

Para esta investigación, se propuso trabajar con mezclas de diferentes cementos portland: por desempeño y compuesto, con el fin de comparar la resistencia a la compresión de ambas muestras a diferentes edades y con condiciones de curado variadas. En la tabla 7 que se muestra a continuación, se describe los criterios básicos que se utilizaron para el diseño de las mezclas de hormigón.

Tabla 6. Criterios básicos de diseño de mezcla.

Descripción	Tipo de mezcla	
	GU	IP
Tipo de cemento portland	Uso general	Puzolánico
Denominación comercial	Holcim fuerte	Selvalegre Plus
Relación w/c	0,45	
Relación a/c	3,55	

Se desarrollaron 32 cilindros con cemento por desempeño y 32 cilindros con cemento compuesto, cada uno de estos de dimensiones 100x200 mm. La mezcla se la realizó en base al método volumétrico, para lo cual se estimó que el volumen para los 32 cilindros con sus ensayos respectivos y considerando un 20% de pérdidas sea de 83 litros.

El enfoque fue generar cuatro curvas: 0, 3, 7 y 90 días, para por medio de aquello determinar el comportamiento del hormigón en diferentes periodos de curado. Por otro lado, estas curvas van a estar generadas por ensayos realizados a las edades de 3, 7, 28, 60 y posteriormente serán completadas con los ensayos a la edad de 90 días.

En las figuras 5 y 6 que se muestran a continuación se expone el plan experimental que se realizó tanto para el cemento GU como para el cemento IP.

Especímenes cilíndricos realizados con cemento por desempeño de uso general GU		Edad [días]						
		0	1	3	7	28	60	90
		Viernes 31.01.2020	Sábado 01.01.2020	Lunes 03.02.2020	Viernes 07.02.2020	Viernes 28.02.2020	Martes 31.03.2020	Jueves 30.04.2020
Curvas días de curado		Cilindros a ensayar						
	0	Fabricación de 32 especímenes cilíndricos	Desencofrado de especímenes cilíndricos	2	2	2	2	2
	7			GU003	GU007	GU0028	GU0060	GU0090
	10			2	2	2	2	2
	90			GU703	GU707	GU7028	GU7060	GU7090
	0			0	2	2	2	
				GU10028	GU10060	GU10090		
				2	2	2	2	
				GU90028	GU90060	GU90090		
Total de cilindros a ensayar en días especificados				4	4	8	8	8
Total de cilindros a ensayar				32				

Figura 5. Plan experimental mezcla con cemento por desempeño.

Especímenes cilíndricos realizados con cemento compuesto puzolánico IP		Edad [días]						
		0	1	3	7	28	60	90
		Viernes 31.01.2020	Sábado 01.01.2020	Lunes 03.02.2020	Viernes 07.02.2020	Viernes 28.02.2020	Martes 31.03.2020	Jueves 30.04.2020
Curvas días de curado	0	Fabricación de 32 especímenes cilíndricos	Desencofrado de especímenes cilíndricos	Cilindros a ensayar				
	7			2 IP003	2 IP007	2 IP0028	2 IP0060	2 IP0090
	10			2 IP703	2 IP707	2 IP7028	2 IP7060	2 IP7090
	90			0	0	2 IP10028	2 IP10060	2 IP10090
				0	0	2 IP90028	2 IP90060	2 IP90090
Total de cilindros a ensayar en días especificados				4	4	8	8	8
Total de cilindros a ensayar				32				

Figura 6. Plan experimental mezcla con cemento compuesto.

En esta parte, cabe recalcar que para cada cilindro se utilizó diferentes descripciones mismas que fueron escogidas aleatoriamente. El fin de etiquetar los especímenes es para diferenciar los cilindros a ensayar para los días de curado y edad.

Tabla 7. Ejemplo de descripción de cilindros.

GU 6 IP	0	0	3
Tipo de cemento	Días de curado	Separador	Edad

2.3. Metodología

2.3.1. Diseño de la mezcla.

La mezcla del presente proyecto integrador se realizó por el método volumétrico para los dos tipos de cementos, en donde se partió de analizar la cantidad de mezcla para cubrir con el volumen necesario para los 32 cilindros de 100 mm x 200 mm, conjuntamente con el volumen necesario para cubrir los ensayos en estado fresco del hormigón y adicionalmente un 20 % de perdidas, para lo cual se estimó 83 litros de volumen de mezcla a cubrir con una relación de w/c de 0,45.

Tabla 8. Dosificación de la mezcla para 1 m³.

Material	Cantidad [kg/m ³]	
	GU	IP
Agregado fino	652	649
Agregado grueso	976	971
Cemento	459	457
Agua	207	206
Total	2294	2283

2.3.2. Fabricación de especímenes cilíndricos.

Cumpliendo con lo establecido en la norma ASTM C192, se procedió a realizar las dos mezclas de cemento, para lo cual se tamizó el agregado y se pesó todos los componentes para posteriormente proceder a realizar la mezcla con la ayuda de la concreteira.

Una vez realizada la mezcla se empezó a realizar los especímenes en los moldes de 100x200 mm, cumpliendo con todos los procedimientos establecidos en la norma ASTM C31. Una vez culminado la fabricación, para evitar la pérdida de humedad de las muestras se procedió a almacenarlas, cubriéndolas con un plástico resistente, duradero e impermeable en

una zona libre de vibraciones que no afecten a las muestras, tal como se expone en la norma ASTM C192.



Figura 7. Almacenamiento de especímenes en el laboratorio USFQ.

2.3.3. Curado.

Después de las 24 ± 8 h horas de fabricación, es decir, cuando el cemento ya estaba en estado endurecido, se sumergió algunos de los especímenes en la piscina de curado, con agua saturada con hidróxido de calcio a una temperatura de 23 ± 2 °C, para los especímenes de cero días de curado y para los especímenes que su curado no era el total de los días antes de realizar los ensayos, se los expuso a la temperatura y humedad del ambiente pero sin estar expuestas a condiciones externas como la lluvia.



Figura 8. Curado de los especímenes, área de curado laboratorio USFQ.

2.3.4. Ensayo de resistencia a la compresión.

Los ensayos a la compresión son análisis que se realizan a las probetas de hormigón, al aplicar una carga axial sobre toda la superficie del espécimen, es por ello que su resistencia se mide en MPa, es decir, fuerza aplicada sobre área. La norma ASTM C39 nos dice que el ensayo “[...] consiste en aplicar un compresivo carga axial a cilindros o núcleos moldeados a una velocidad dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla. El compresivo la fuerza de la muestra se calcula dividiendo el máximo carga alcanzada durante la prueba por el área de la sección transversal del espécimen.” La velocidad a la que se calibró la máquina fue de 0.25 ± 0.05 MPa/s. Por otro lado cabe destacar que para realizar los ensayos se utilizó neoprenos para que la aplicación de la carga sea uniforme sobre toda la superficie.



Figura 9. Ensayos a compresión de los especímenes en el laboratorio USFQ.

2.4. Resultados

2.4.1. Ensayos en estado fresco.

Para el presente proyecto de investigación se realizaron 4 ensayos a la mezcla de hormigón en estado fresco, siendo estos: ensayo de densidad, revenimiento, temperatura y

contenido de aire. Cabe recalcar que todos estos fueron realizados según la norma ASTM que le corresponde a cada uno.

Tabla 9. Resultados de ensayos del hormigón en estado fresco.

Ensayos del hormigón en estado fresco				
Tipo de ensayo	Normativa	Resultados IP	Resultados GU	Unidad
Asentamiento	ASTM C143	7,0	5,5	cm
Contenido de aire	ASTM C231	2,1	2,2	%
Temperatura	ASTM C1064	23,0	23,7	°C
Densidad (Peso unitario)	ASTM C138	2157	2128	kg/m ³

2.4.2. Resistencia a la compresión.

2.4.2.1. Resistencia a la compresión de cilindros con cemento de uso general.

Se realizó el ensayo de 16 especímenes cilíndricos de 100x200 mm de acuerdo a la norma ASTM C39. En la tabla 11 y figura 7 se muestra los resultados obtenidos.

Tabla 10. Resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos con hormigón fabricado con cemento por desempeño.

ID Especímen	fc [MPa]	fc [MPa] Promedio
GU003-A	12,0	12,2
GU003-B	12,3	
GU703-A	11,3	11,3
GU703-B	11,4	
GU007-A	16,2	15,8
GU007-B	15,4	
GU707-A	17,4	17,1
GU707-B	16,8	
GU0028-A	19,4	20,7
GU0028-B	21,9	
GU7028-A	26,4	26,3
GU7028-B	26,1	
GU10028-A	25,0	27,6
GU10028-B	30,2	
GU90028-A	27,4	28,3
GU90028-B	29,1	

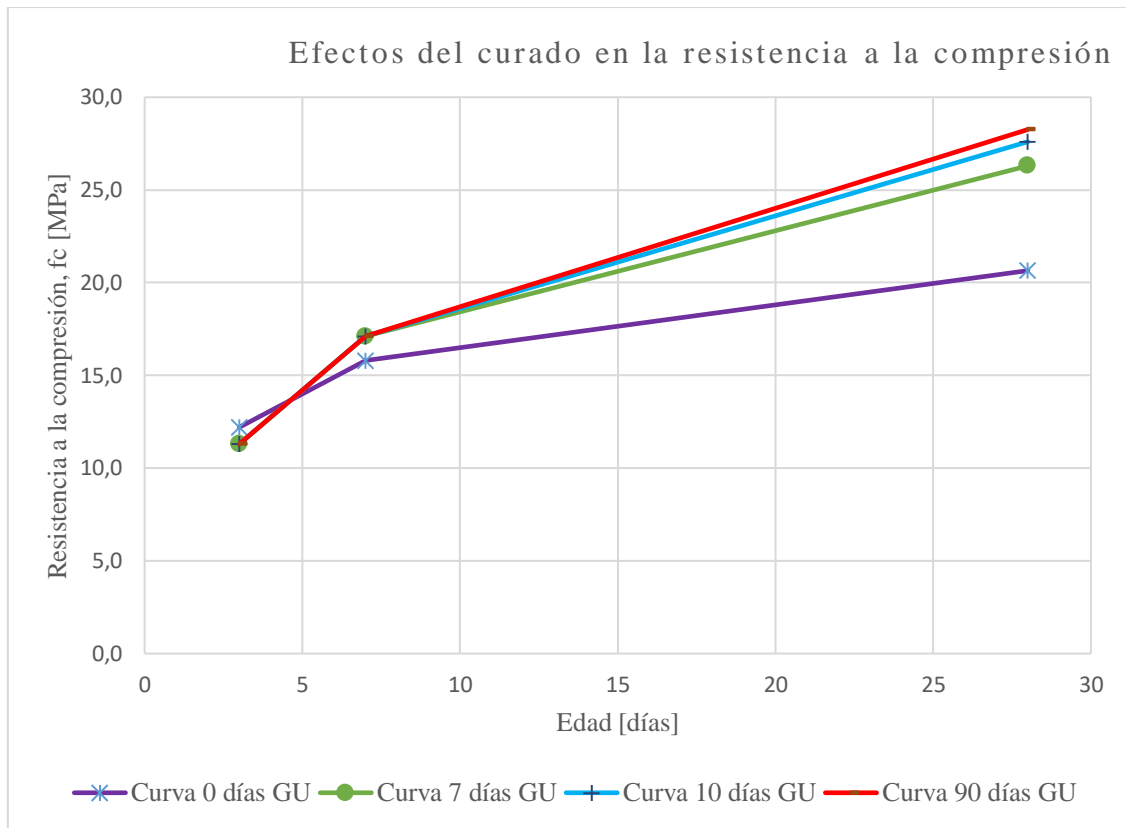


Figura 10. Resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos con hormigón fabricado con cemento por desempeño.

2.4.2.2. Resistencia a la compresión de cilindros con cemento puzolánico.

Se realizó el ensayo de 16 especímenes cilíndricos de 100x200 mm de acuerdo a la norma ASTM C39. A continuación, en la tabla 12 y figura 8 se muestra los resultados obtenidos.

Tabla 11. Resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos con hormigón fabricado con cemento compuesto.

ID Especímen	fc [MPa]	fc [MPa] Promedio
IP003-A	8,8	9,1
IP003-B	9,4	
IP703-A	9,1	8,8
IP703-B	8,5	
IP007-A	11,6	11,6
IP007-B	11,6	
IP707-A	12,4	12,3
IP707-B	12,2	
IP0028-A	16,9	17,8
IP0028-B	18,8	
IP7028-A	17,6	18,5
IP7028-B	19,4	
IP10028-A	21,3	21,2
IP10028-B	21,0	
IP90028-A	22,2	22,0
IP90028-B	21,7	

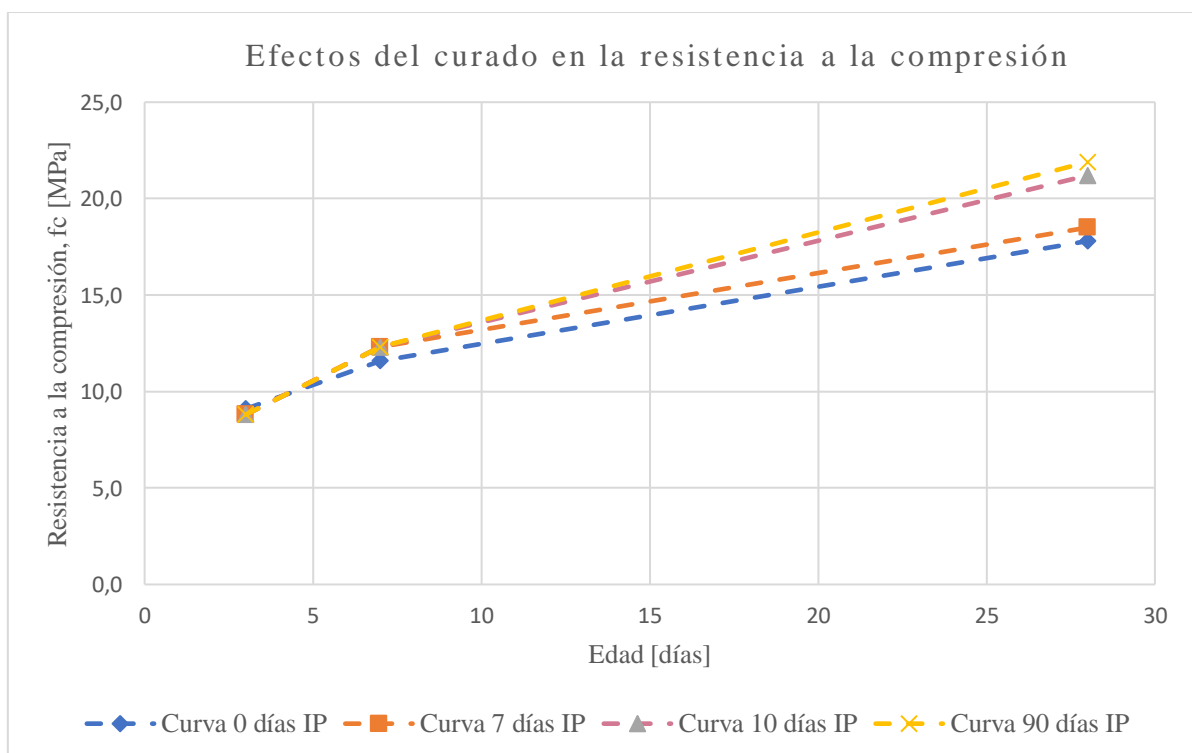


Figura 11. Resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos con hormigón fabricado con cemento compuesto.

2.4.3. Porcentaje de resistencia a la compresión alcanzado.

A continuación, se estandarizan los valores de la resistencia del concreto al valor máximo de resistencia a la compresión que es la curva de los 90 días de curado a la edad de los 28 días, para encontrar los porcentajes de la resistencia a la que llegaron los especímenes dependiendo los días de curado que tuvieron, es decir, el porcentaje de la resistencia que cubrieron en relación al máximo valor de f_c , con el objetivo de medir de una forma cuantitativa el rendimiento de cada una de las curvas.

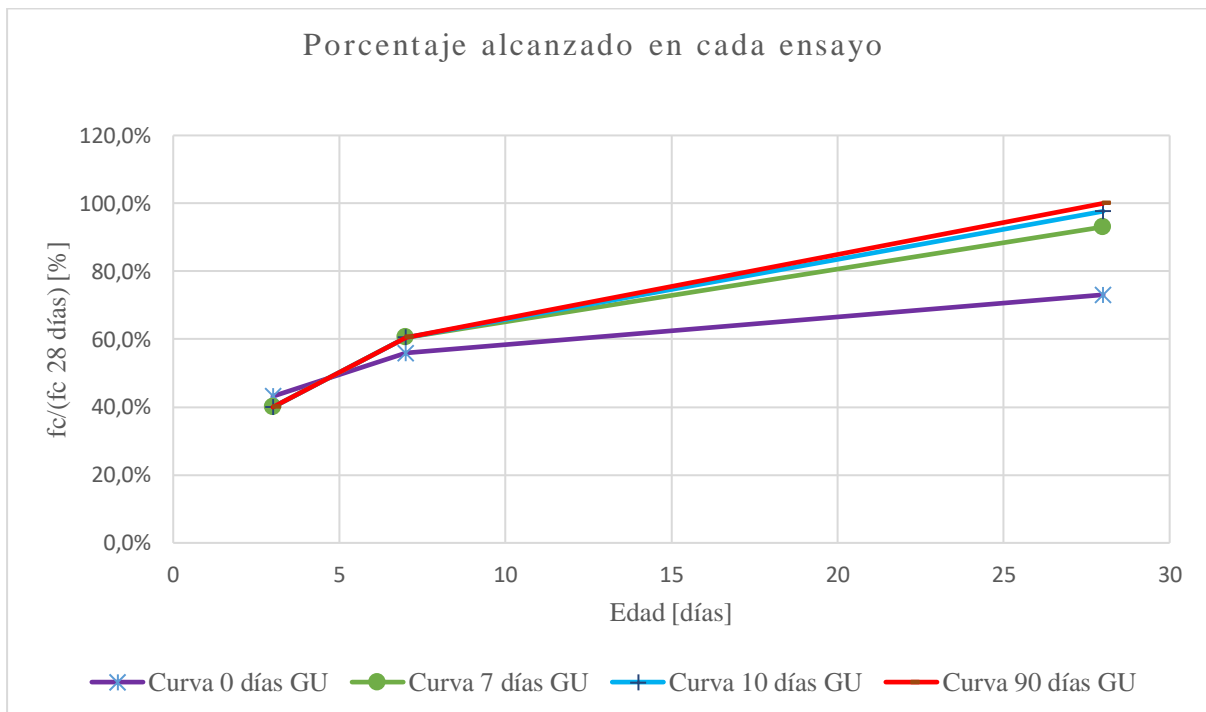


Figura 12. Porcentaje alcanzado en cada ensayo para mezcla con cemento GU.

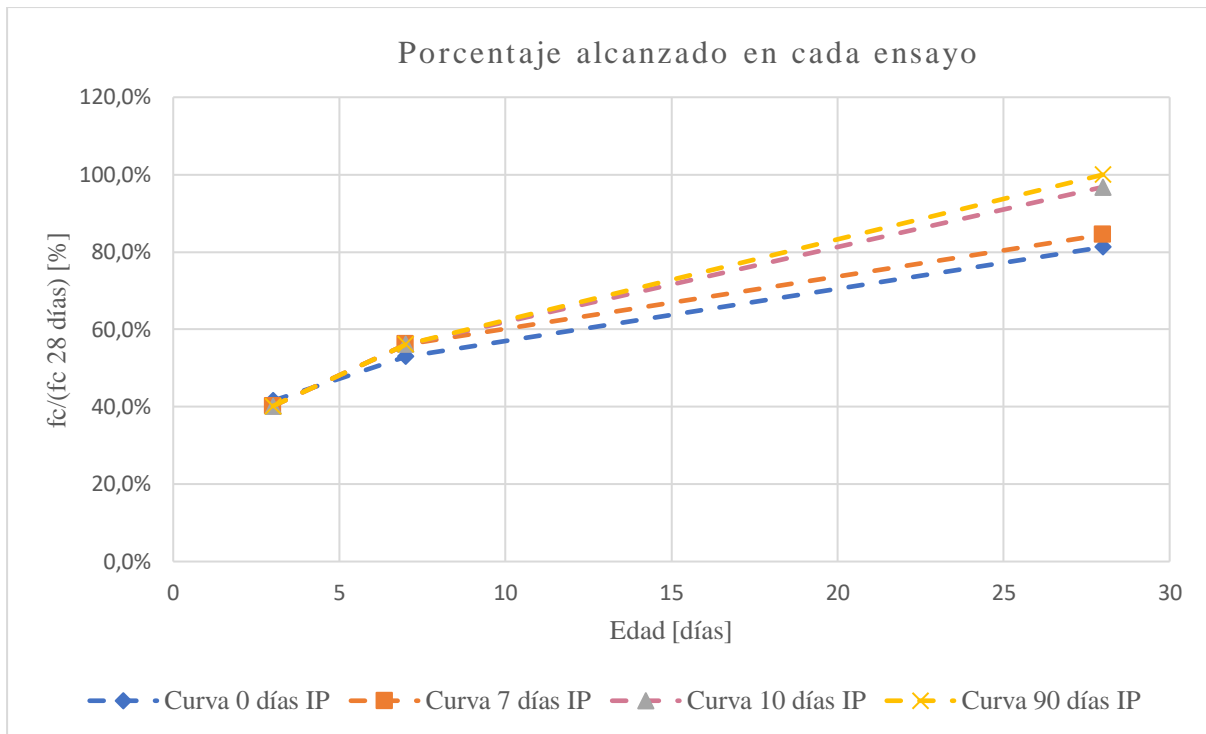


Figura 13. Porcentaje alcanzado en cada ensayo para mezcla con cemento IP.

2.5. Análisis de resultados

2.5.1.1. Tipos de fallas en la resistencia a la compresión

Según la norma ASTM C39, los tipos de fracturas que se pueden dar en los cilindros de hormigón con relación de esbeltez igual a 2 son las que se muestran en la figura 11.

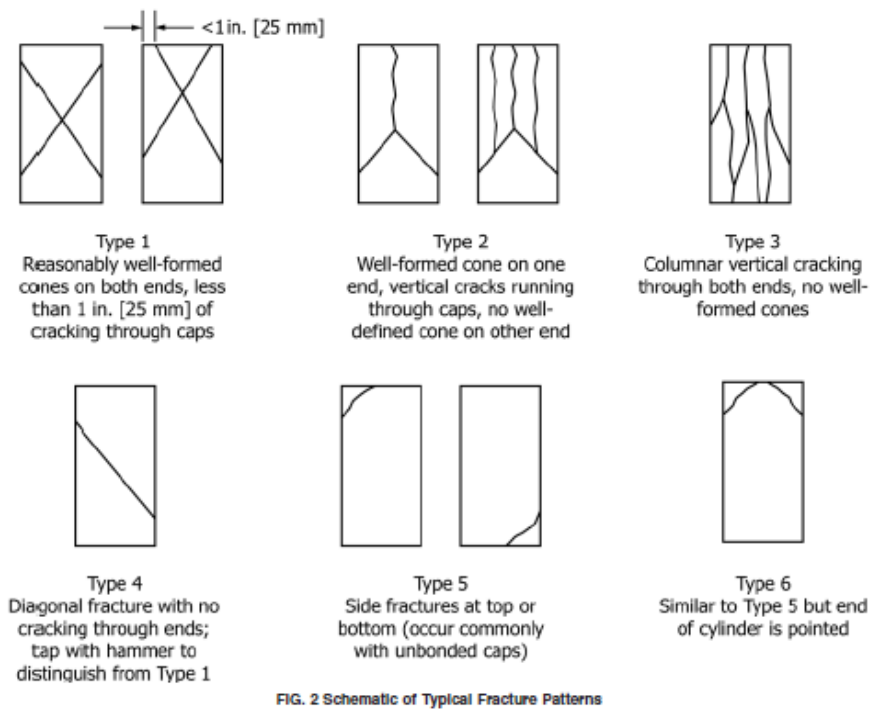


Figura 14. Tipo de fracturas en especímenes cilíndrico (ASTM C39).

En los ensayos a la compresión realizados a los especímenes cilíndricos fabricados con cemento GU se obtuvo diferentes tipos de fallas, especialmente; el tipo 2: cono bien formado en uno de los extremos con fisuras que recorren a través de la cabecera; tipo 3: fisura vertical columnar a través de los dos extremos con conos no definidos; y tipo 6: cilindro tipo punta.

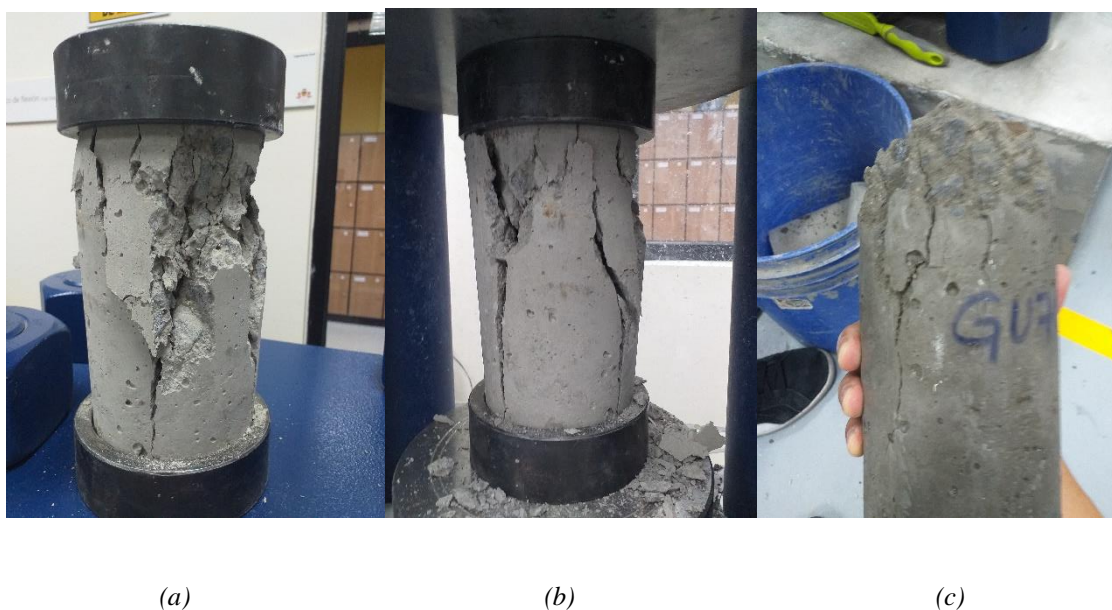


Figura 15. a) Fractura tipo 2, b) Fractura tipo 3 y c) Fractura tipo 6. Cilindros fabricados con cemento GU.

Por otro lado, los tipos de fracturas obtenidos en la mayoría de los cilindros, después de haber realizado los ensayos a la compresión a los especímenes fabricados con cemento IP corresponden al tipo 3: fisura vertical columnar a través de los dos extremos con conos no definidos, tal como se muestra a continuación.

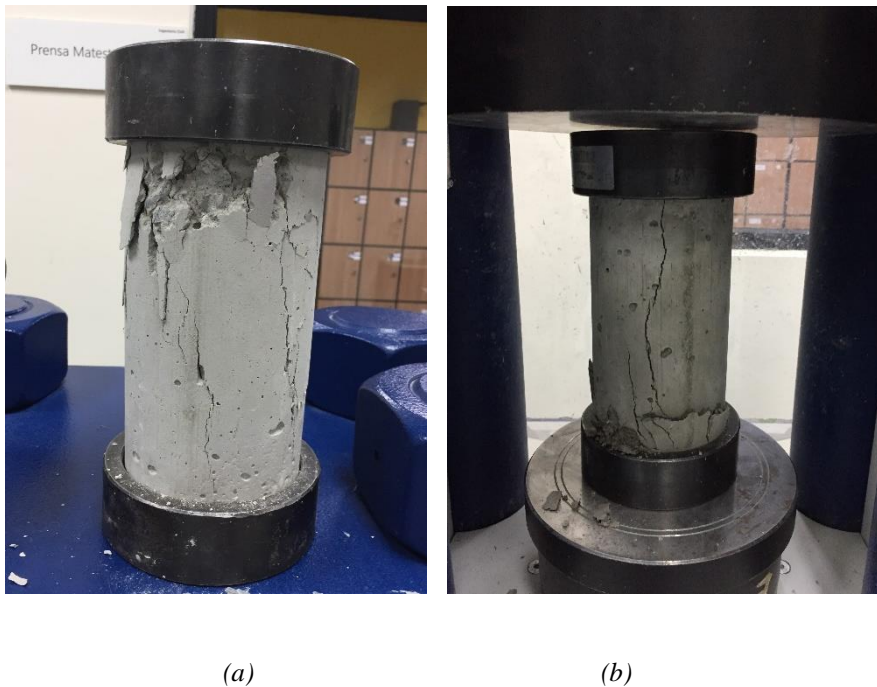


Figura 16. a), b) Fracturas tipo 3 en cilindros fabricados con cemento IP.

2.5.1.2. Resistencia a la compresión

La figura 12, misma que se muestra a continuación, corresponde a la evolución de la resistencia a diferentes edades y tiempos de curado. Como se puede apreciar, los especímenes cilíndricos fabricados con cemento GU han ganado más resistencia que los especímenes fabricados con cemento IP. Como ya se ha mencionado en el texto, la resistencia a obtenerse del hormigón puede variar debido a varios factores que afectan las propiedades del hormigón.

Ahora, basándonos únicamente en las curvas de la resistencia a la compresión vs. Edad de los especímenes cilíndricos fabricados con cemento GU podemos ver que los días de curado tienen una gran influencia. Para la curva de 0 días de curado la resistencia máxima que se

alcanzó a los 28 días es de 20,7 MPa, por el contrario para los cilindros que estaban siempre en curado se obtuvo una resistencia a la compresión de 28,3 MPa, es decir, tuvo un aumento del 7,6 MPa lo cual es muy significativo, ya que alcanza una resistencia óptima para que las construcciones civiles tengan durabilidad y funcionalidad adecuada.

La norma ecuatoriana de la construcción considera que se debe curar de 5 a 7 días, por otro lado la norma internacional ACI 318S-14, plantea que se debe curar por al menos 7 días. Nuestros datos obtenidos muestran que con 7 días de curado se obtiene una resistencia de 26,3 MPa a la edad de los 28 días, es una resistencia considerablemente buena, sin embargo, si analizamos la curva de los 10 días de curado, podemos ver que tenemos una resistencia de 27,6 MPa, es decir, incremento 4,94% con respecto a la anterior curva.

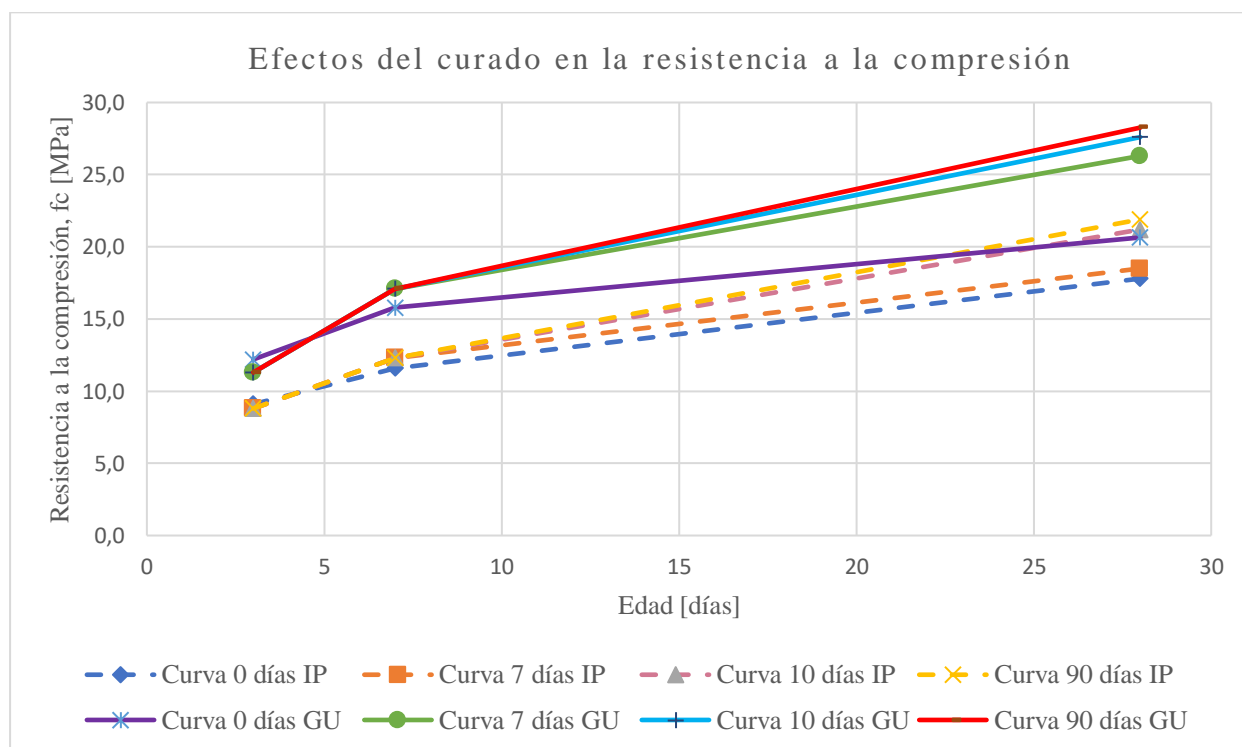


Figura 17. Comparación de resultados de las dos mezclas de hormigón.

Con respecto a los especímenes cilíndricos fabricados con cemento IP, para la curva 0 días de curado se obtuvo una resistencia a la compresión de 17,3 MPa, por el contrario la

resistencia para los especímenes que estaban siempre en proceso de curado se obtuvo una resistencia de 22,0 MPa, es decir, tuvo un incremento de 4,7 MPa lo que corresponde al 27,17% con respecto al anterior. Los datos analizados corresponden a la edad de los 28 días.

Haciendo referencia a las dos normas mencionadas anteriormente, para la curva de 7 días de curado tenemos una resistencia de 18,5 MPa a la edad de los 28 días. Por otro lado, para los cilindros que se sometieron al proceso de curado durante 10 días tenemos una resistencia de 21,2 MPa. Para estos ensayos, podemos ver que a los 10 días de curado alcanza una resistencia a la compresión considerable, sin embargo, no es demasiado buena.

Por último, cabe mencionar que lo óptimo y esencial en los resultados obtenidos sería analizar cómo se desarrolla la resistencia a la compresión en el tiempo de ambos tipos de cilindros, es decir, más allá de los 28 días, sin embargo, por situaciones que atraviesa el país en estas fechas no se han podido realizar los análisis y ensayos respectivos a los 60 y 90 días, tal y como se había planteado inicialmente.

A lo antes mencionado cabe recalcar que los especímenes cilíndricos que no se han podido ensayar queda a cargo del grupo investigador que forma parte de esta investigación por lo cual, en un siguiente proyecto se realizara los análisis respectivos.

2.5.1.3. Estandarización de resultados

Se realizó una estandarización de los resultados a los 28 días, de tal manera de saber qué porcentaje de resistencia genero cada punto en relación a la máxima resistencia.

Tabla 12. Porcentaje alcanzado para cada curva y edad.

Edad	Cemento IP				Cemento GU			
	Curva 0	Curva 7	Curva 10	Curva 90	Curva 0	Curva 7	Curva 10	Curva 90
3	41,6%	40,2%	40,2%	40,2%	43,2%	40,0%	40,0%	40,0%
7	53,0%	56,2%	56,2%	56,2%	55,9%	60,5%	60,5%	60,5%
28	81,3%	84,5%	96,8%	100,0%	73,1%	93,1%	97,7%	100,0%

Como se observa en la tabla 13, las curvas de los 7 días de curado llegan a un 84,5% para el cemento IP y 93,1 % para el cemento GU, mientras que las curvas para los 10 días llegan al 96,8 % para el cemento IP y a 97,7% para el cemento GU, lo cual indica un notable mejor comportamiento en relación a la resistencia máxima obtenida a los 28 días.

Sin duda, existe un aumento considerable en la resistencia a la compresión en tan solo 3 días de diferencia, por lo cual podemos decir que se debería tomar mucho en cuenta los resultados obtenidos en esta investigación ya que, si tomamos en cuenta los aspectos técnicos al momento de fabricar el hormigón en obra es difícil que cumpla con todos los parámetros, y aún si se cumplieran con todos, el tiempo de curado establecido por la Norma Ecuatoriana de la Construcción no es suficiente para hormigones realizados con estos tipos de cementos.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1. Conclusiones

Una vez culminado el proyecto de investigación, mismo que tenía como objetivos estudiar el efecto del tiempo del curado en la resistencia del hormigón y el incremento de la resistencia a diferentes edades y diferentes tiempos de curado para hormigón fabricado con cemento por desempeño y cemento compuesto puzolánico, se llegaron a las siguientes conclusiones:

1. Los cilindros realizados tuvieron un comportamiento adecuado ya que, posteriormente realizado el ensayo a compresión se verificaron los tipos de fractura obtenidos, mismos que cumplen con los tipos de fallas que se puede obtener en los especímenes cilíndricos con una relación de esbeltez igual a 2 que se especifica en la norma ASTM C39.
2. Para las muestras realizadas con cemento portland GU e IP, el tiempo de curado establecido en la NEC-SE-HM (2015), al igual que en los códigos internacionales como lo es la ACI 318S-14 cumplieron con una resistencia aceptable. Para el caso del hormigón con cemento GU se obtuvo una resistencia mucho mayor a 21 MPa, mientras que las muestras fabricadas con el cemento tipo IP se obtuvo una resistencia cercana pero mayor a 21 MPa a la edad de 28 días y con 10 días de curado. Como ya se hizo mención en el texto, debido a que el hormigón es un material tan heterogéneo ninguna mezcla se va a comporta de la misma manera, una muestra de ello son las mezclas realizadas con cemento que tienen adicionado otros cementantes, en donde estos cementantes adicionales siguen reaccionando en el proceso de hidratación, ganando resistencia aun estando en condiciones de 0 días

de curado, tal como se observó con las muestras fabricadas con cemento tipo IP, que siguen generando resistencia aun en los 28 días, es decir, que su curva no llego al pico de máxima resistencia; a diferencia del hormigón con cemento GU, el cual se comporta de manera diferente en el caso de que no se realice el proceso de curado.

3. En la norma ecuatoriana de la construcción NEC-SE-HM (2015), se expresa un tiempo de curado de al menos 5 a 7 días, es decir, existiría una diferencia de 3 a 5 días en base al nuevo planteamiento según los resultados obtenidos, con lo cual desde el punto de vista técnico, esto podría estar generando una mayor inseguridad en el cumplimiento de los buenos resultados. Si bien los códigos toman en cuenta la parte técnica, tendrían que realizar un análisis más profundo, es decir, de cómo se construye de una forma más generalizada, por lo que se concluye en el presente trabajo, que por los resultados obtenidos, los 7 días de curado no representan una medida óptima como recomendación dentro del código
4. En países como Ecuador, que son lugares de alta peligrosidad sísmica, proponemos que se debería tomar en cuenta que el tiempo de curado del hormigón sea de al menos 10 días ya que, con ese tiempo de curado no solo se cumple con una resistencia óptima, sino que a su vez se generó un comportamiento para ambos casos mayor al 96% de su resistencia máxima a los 28 días, es por ello que tomar en cuenta este factor no solo abarcaría todos los tipos de cemento, sino que a su vez los hormigones tendrían un nivel de seguridad mayor y las estructuras tendrían un mejor comportamiento.
5. Por último, cabe mencionar que esta investigación está basada en los análisis hasta la edad de los 28 días, pese a que se realizaron especímenes para analizar a los 60 y 90 días. Sin embargo, como se mencionó en los análisis, la situación mundial por el

caso de la pandemia COVID-19 que se está atravesando en estas precisas fechas ha paralizado todo tipo de actividades académicas, por lo cual no nos permitió completar de manera definitiva la investigación, por ende esos análisis quedan a cargo del grupo investigador, mismos que se encargaran de realizar análisis en posteriores fechas y a edades mucho mayores que pueden ser aprovechadas para determinar mejor su comportamiento de la resistencia en el tiempo.

3.2. Recomendaciones

De igual manera, en el transcurso de la investigación se pudo observar algunos aspectos que podrían ayudar en el caso de que se requiera un nuevo desarrollo o continuación del tema en curso, por lo cual planteamos las siguientes recomendaciones:

1. Para que el diseño de la mezcla de hormigón sea adecuado, se recomienda realizar uno o varios “*trial batch*” para garantizar que la dosificación sea óptima y se pueda obtener un hormigón con buena trabajabilidad.
2. Para obtener un mejor análisis de los datos, sugerimos que se debe realizar por lo menos 3 especímenes cilíndricos para cada ensayo, ya que en el caso de que en los resultados exista una variación exagerada del f_c se puede ir descartando los datos que se alejen de los demás.
3. Se recomienda realizar un estudio económico, del impacto que tendría en la construcción de obras civiles, el adicionar más días de curado a los tiempos establecidos en el código, en donde se pueda cuantificar los costos y los beneficios de seguridad que generaría cambiar el código.
4. Para abarcar una mayor porción de muestras, se recomienda realizar el mismo plan experimental hasta los 28 días, pero de cementos de otras marcas y con otro tipo de

agregado, mucho mejor si se podrían tomar muestras de obras reales en el Ecuador, de tal manera que nos permita generar un análisis con datos a mayor escala.

5. Es recomendable realizar especímenes de hormigón fabricado con cementos portland puros y de cementos compuestos, de esta manera se podrá analizar la resistencia obtenida en los ensayos y así poder verificar el tiempo de curado que necesita cada uno, generando una relación en días de esta variabilidad.

4. REFERENCIAS

ACI E3-13 (2013). *Cementitious Materials for Concrete*: American Concrete Institute.

ACI 308R (2001). *Guide to Curing Concrete*: American Concrete Institute.

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

ASTM Standard C31. (2012). *Preparación de especímenes de hormigón*.

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

ASTM Standard C143. (2012). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. ASTM INTERNATIONAL.

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

ASTM Standard C172. *Dosificación de muestras de hormigón*.

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

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

ASTM INTERNATIONAL.

Figuroa, M. (2007). *Uso de un sistema de curado intermedio de hormigón fresco*.

Universidad de Chile.

Garín, L., Santilli, A., & Pejo, E. (2012). *Influencia del curado en la resistencia a compresión del hormigón: estudio experimental*. Universidad de Montevideo.

HOLCIM. (2015). *Cemento Fuerte*. Cemento hidráulico para uso general.

HOLCIM. (2016). *Evolución de las normas para la fabricación del cemento*. Cemento Fuerte.

INECYC. (2007). *Consejos Prácticos sobre el hormigón (1 ed.)*. El manual de Pepe el Hormigón: Instituto Ecuatoriano de Cemento y el Concreto.

Kosmatka, S., et.al. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU.

Moreno, D. (2016). *Materiales cementantes suplementarios y sus efectos en el concreto*. 360 en concreto. Recuperado el 05 de febrero del 2020 de:

<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/categoryid/180/categoryname/aditivos-adiciones-y-fibras/efectos-de-cementantes-suplementarios>

NEC-SE-HM. (2015). *Estructuras de hormigón armado*.

Neville, A. (1995). *Properties of Concrete* (4 ed.). Pearson Education.

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.

Selvalegre (2018). *Ficha técnica Selvalegre*. Cemento portland puzolánico.

Torre, A. (2004). Curso básico de tecnología del concreto.

Videla, C. (s/f). *Tecnología del hormigón*. Pontificia Universidad Católica de Chile.

ANEXO A: REGISTRO FOTOGRÁFICO



Figura A 1. Humedecimiento de materiales.



Figura A 2. Ensayos de temperatura.



Figura A 3. Ensayo de asentamiento



Figura A 4. Especímenes cilíndricos fabricados.



Figura A 5. Especímenes cilindros expuestos al aire libre (Cero días de curado).



Figura A 6. Especímenes cilíndricos en proceso de curado a 23°C.



Figura A 7. Toma de medidas de cilindros con 0 días de curado.



Figura A 8. Calibración de máquina para realizar ensayos de compresión.



Figura A 9. Ensayo a compresión utilizando neoprenos.



Figura A 10. Tipo de fractura en cilindros ensayados.

ANEXO B: REGISTRO DE DATOS DE LABORATORIO

Fecha	Descripción	Componente	Dimensión [mm]						Promedio [mm]	Área [mm ²]
3-feb-20	GU003-A	D	101,0	102,0	102,0	102,1	102,9	103,0	102,2	8198,0
		H	204,0	203,0	203,0	204,0	-	-	203,5	
	GU003-B	D	101,6	101,8	102,0	103,0	103,2	102,2	102,3	8219,4
		H	204,0	204,0	204,0	204,0	-	-	204,0	
	GU703-A	D	103,5	102,0	103,0	103,4	102,0	100,0	102,3	8222,1
		H	204,0	203,0	204,0	205,0	-	-	204,0	
	GU703-B	D	102,0	104,1	103,0	102,0	103,0	101,3	102,6	8262,3
		H	204,0	203,0	203,0	203,0	-	-	203,3	
7-feb-20	GU007-A	D	103,0	103,0	102,2	101,6	102,7	102,3	102,5	8246,2
		H	203,0	202,0	203,0	203,0	-	-	202,8	
	GU007-B	D	102,2	102,4	102,4	102,7	102,0	102,4	102,4	8227,5
		H	203,0	204,0	203,0	203,0	-	-	203,3	
	GU707-A	D	102,4	101,5	103,0	101,2	102,6	101,0	102,0	8163,3
		H	204,0	203,0	203,0	202,0	-	-	203,0	
	GU707-B	D	102,5	101,5	103,0	101,2	102,6	101,0	102,0	8165,9
		H	202,0	203,0	203,0	202,0	-	-	202,5	
28-feb-20	GU0028-A	D	101,7	101,4	101,7	101,6	101,3	102,0	101,6	8110,0
		H	203,0	203,0	202,0	203,0	-	-	202,8	
	GU0028-B	D	102,0	102,4	102,4	101,3	102,4	101,7	102,0	8176,6
		H	203,0	203,0	201,0	203,0	-	-	202,5	
	GU7028-A	D	102,1	102,6	102,6	102,6	102,6	101,3	102,3	8219,4
		H	203,0	203,0	204,0	204,0	-	-	203,5	
	GU7028-B	D	101,5	102,5	102,0	101,2	101,7	101,4	101,7	8125,9
		H	203,0	204,0	204,0	204,0	-	-	203,8	
	GU10028-A	D	102,1	101,6	101,7	101,3	101,8	101,5	101,7	8118,0
		H	203,0	202,0	203,0	202,0	-	-	202,5	
	GU10028-B	D	102,2	102,1	102,2	102,1	102,3	102,1	102,2	8198,0
		H	202,0	203,0	203,0	204,0	-	-	203,0	
	GU90028-A	D	102,0	101,6	102,0	102,0	101,0	101,6	101,7	8123,3
		H	203,0	203,0	205,0	204,0	-	-	203,8	
	GU90028-B	D	101,4	101,8	101,9	101,5	102,3	102,5	101,9	8155,3
		H	203,0	202,0	203,0	204,0	-	-	203,0	

Tabla B 1. Dimensiones de especímenes cilíndricos fabricados con cemento GU.

Fecha	Descripción	P [KN]	P [KN] Promedio
3-feb-20	GU003-A	98,05	99,7
	GU003-B	101,41	
	GU703-A	92,90	93,4
	GU703-B	93,88	
7-feb-20	GU007-A	133,61	130,1
	GU007-B	126,58	
	GU707-A	141,98	140,5
	GU707-B	139,10	
28-feb-20	GU0028-A	157,18	168,2
	GU0028-B	179,18	
	GU7028-A	217,21	214,7
	GU7028-B	212,14	
	GU10028-A	202,86	225,1
	GU10028-B	247,29	
	GU90028-A	222,48	230,0
	GU90028-B	237,52	

Tabla B 2. Fuerza axial aplicada a especímenes cilíndricos fabricados con cemento GU.

FECHA	Descripción	Componente	Dimensión [mm]						Promedio [mm]	Área [mm ²]
3-feb-20	IP003-A	D	103,0	104,0	101,0	107,0	106,0	106,0	104,5	8576,7
		H	203,0	203,0	202,0	202,0	-	-	202,5	
	IP003-B	D	101,0	106,0	106,0	105,0	105,0	104,0	104,5	8576,7
		H	204,0	204,0	205,0	204,0	-	-	204,3	
	IP703-A	D	102,5	103,0	101,8	103,0	101,5	102,5	102,4	8232,8
		H	202,0	202,0	200,0	201,0	-	-	201,3	
IP703-B	D	102,0	101,9	100,7	102,1	102,0	102,4	101,9	8147,3	
	H	203,0	203,0	204,0	203,0	-	-	203,3		
7-feb-20	IP007-A	D	102,0	102,4	102,0	102,7	103,0	103,0	102,5	8254,3
		H	202,0	202,0	202,0	202,0	-	-	202,0	
	IP007-B	D	202,2	202,4	202,0	202,1	202,0	202,3	202,2	32100,3
		H	203,0	203,0	204,0	203,0	-	-	203,3	
	IP707-A	D	102,0	102,6	102,0	102,0	101,9	102,0	102,1	8184,6
		H	203,0	202,0	203,0	203,0	-	-	202,8	
IP707-B	D	101,8	100,8	100,9	100,8	100,8	100,3	100,9	7996,0	
	H	200,0	200,0	202,0	202,0	-	-	201,0		
28-feb-20	IP0028-A	D	102,3	102,2	102,2	101,6	101,7	101,4	101,9	8155,3
		H	204,0	203,0	203,0	203,0	-	-	203,3	
	IP0028-B	D	101,3	101,5	101,7	102,1	102,0	103,0	101,9	8160,6
		H	204,0	204,0	203,0	203,0	-	-	203,5	
	IP7028-A	D	102,0	101,7	102,0	102,0	102,6	102,0	102,1	8179,3
		H	203,0	202,0	200,0	203,0	-	-	202,0	
	IP7028-B	D	101,3	102,6	102,1	101,5	101,7	101,4	101,8	8133,9
		H	202,0	202,0	202,0	201,0	-	-	201,8	
	IP10028-A	D	101,7	102,0	102,4	102,0	101,7	101,7	101,9	8157,9
		H	203,0	203,0	203,0	202,0	-	-	202,8	
	IP10028-B	D	100,3	101,0	100,5	100,3	100,4	100,5	100,5	7932,7
		H	202,0	202,0	202,0	202,0	-	-	202,0	
IP90028-A	D	101,5	102,2	102,6	101,2	102,5	101,3	101,9	8152,6	
	H	201,0	203,0	201,0	201,0	-	-	201,5		
IP90028-B	D	102,0	101,6	101,5	102,4	102,1	102,3	102,0	8168,6	
	H	202,0	203,0	202,0	202,0	-	-	202,3		

Tabla B 3. Dimensiones de especímenes cilíndricos fabricados con cemento IP.

Fecha	Descripción	P [KN]	P [KN] Promedio
3-feb-20	IP003-A	73,8	74,7
	IP003-B	75,7	
	IP703-A	74,9	72,1
	IP703-B	69,2	
7-feb-20	IP007-A	95,8	95,4
	IP007-B	95,1	
	IP707-A	101,4	99,4
	IP707-B	97,4	
28-feb-20	IP0028-A	137,5	145,3
	IP0028-B	153,1	
	IP7028-A	143,9	150,9
	IP7028-B	157,8	
	IP10028-A	174,1	170,5
	IP10028-B	166,8	
	IP90028-A	181,2	178,6
	IP90028-B	175,9	

Tabla B 4. Fuerza axial aplicada a especímenes cilíndricos fabricados con cemento IP.