



# **UNIVERSIDAD DE CUENCA**

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

## **Influencia en la resistencia final de elementos de hormigón de geometría variable sometidos a diferentes condiciones de curado.**

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

### **Autores:**

Gustavo Andrés Asmal Peña

CI: 0105682116

Pablo Fernando González Guamán

CI: 0106567209

### **Director:**

Ing. Daniel Estuardo Mogrovejo Carrasco, M.Sc., Ph.D.

CI: 0301500476

**Cuenca, Ecuador**

**15/10/2019**



## Resumen:

El hormigón a edades tempranas se encuentra expuesto a factores ambientales que provocan la pérdida de humedad y temperatura necesaria para adquirir las propiedades físicas y mecánicas deseadas, lo cual afecta directamente a su resistencia.

El objetivo principal del proyecto fue analizar la influencia en la resistencia final del hormigón en tres tipos de elementos: cilindros, vigas y losas, expuestos a diferentes condiciones de curado. Se definió una dosificación patrón de aproximadamente 240 kg/cm<sup>2</sup> y se elaboraron 12 muestras de cada elemento de hormigón.

El primer proceso de curado se realizó en una piscina de laboratorio siguiendo las especificaciones de la normativa (sumersión); en los otros dos procesos se expuso los elementos a condiciones extremas de viento y temperatura, respectivamente; y finalmente se aplicó el uso de un curador (antisol) como se lo realiza en obra.

Se utilizaron ensayos destructivos y no destructivos en los diferentes elementos de hormigón. Los ensayos no destructivos aplicados fueron el ultrasonido y la resistividad eléctrica, los cuales indican parámetros de calidad del hormigón. En los ensayos destructivos se realizaron pruebas de resistencia a la compresión en cilindros, y resistencia a la tracción en vigas y losas. Los especímenes de hormigón fueron ensayados a los 7, 14 y 28 días de curado.

Las mayores resistencias a los 28 días de curado en los cilindros se presentaron en los elementos curados en laboratorio, alcanzando resistencias de 257 kg/cm<sup>2</sup>; en los elementos que se aplicó el uso del curador existió una reducción del 10% en comparación del curado por sumersión. La afección más notoria con respecto a la resistencia final se dio tanto en condiciones de exposición al viento, como en exposiciones a bajas temperaturas-viento, presentándose una reducción del 27% y 31%, respectivamente, esto se debe a la pérdida de humedad que provoca las diferentes condiciones ambientales a la que son expuestas los elementos.

En las vigas y losas al igual que en los cilindros la condición más desfavorable se presentó cuando se expuso los elementos a zonas de baja temperatura-viento, la reducción en la resistencia a los 28 días fue de 31% en relación con las curadas en laboratorio.



Con los resultados obtenidos se corroboró la relación directa que existe entre la resistencia final del hormigón y el curado del mismo, por lo que es muy importante tomar en cuenta las condiciones ambientales presentadas en el medio para poder realizar un correcto proceso de curado y alcanzar las propiedades deseadas y cumplir con los parámetros de diseño especificados.

**Palabras claves:** Hormigón. Curado. Resistencia final. Factores medioambientales.



**Abstract:**

Concrete at an early age is exposed to environmental factors that cause the loss of humidity and temperature necessary to acquire the desired physical and mechanical properties, affecting its resistance.

The main objective of the project was to analyze the influence on the final resistance of concrete in three types of elements: cylinders, beams and slabs, exposed to different curing conditions. A standard dosage of approximately 240 kg / cm<sup>2</sup> was defined and 12 samples of each concrete element were made.

The first curing process was carried out in a laboratory pool following the specifications of the regulations (submersion). In the other two processes, the elements were exposed to extreme wind and temperature conditions, respectively. Lastly, the use of a curator (antisol) was applied and done on site.

Destructive and non-destructive tests were used on the different elements of concrete. The non-destructive tests applied were ultrasound and electrical resistivity, which indicated concrete quality parameters. In the destructive test, tests of compressive strength in cylinders, tensile strength in beams, and slabs were performed. Concrete specimens were tested at 7, 14 and 28 days of curing.

The greatest resistance at 28 days of curing in the cylinders was presented in the elements cured in the laboratory, reaching resistance of 257 kg / cm<sup>2</sup>. In the elements where the use of the curator was applied, there was a 10% reduction compared to submersion curing. The most noticeable condition, with respect to the final resistance, occurred both in conditions of exposure to wind and in exposures at low temperatures-wind, presenting a reduction of 27% and 31%, respectively. This reduction is due to the loss of moisture that causes different environmental conditions to which the elements are exposed.

In the beams and slabs, as well as in the cylinders, the most unfavorable condition was presented when the elements were exposed to low temperature-wind areas. The 28-day resistance reduction was 31% in relation to those cured in the laboratory.



With the results obtained, the direct relationship between the final strength of the concrete and the curing of the concrete was corroborated. It is very important to take into account the environmental conditions presented in order to carry out a correct curing process, achieve the desired properties, and meet the specified design parameters.

**Keywords:** Concrete. Curing. Final strength. Environmental factors.



## Índice

<b>CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>18</b>
1.1 Antecedentes .....	18
1.2 Definición del problema .....	19
1.3 Justificación.....	19
1.4 Objetivos .....	19
1.4.1 Objetivo General.....	19
1.4.2 Objetivos Específicos.....	19
1.5 Alcance .....	20
<b>CAPÍTULO II - MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>22</b>
2.1 Áridos.....	22
2.1.1 Evaluación de las fuentes de los áridos.....	22
2.1.2 Muestreo de los áridos. ....	22
2.1.3 Propiedades de los áridos. ....	23
2.1.3.1 Granulometría y tamaño máximo. ....	23
2.1.3.2 Gravedad específica. ....	24
2.1.3.3 Absorción.....	24
2.1.3.4 Peso unitario y huecos del agregado mineral.....	25
2.2 Cemento Portland. ....	25
2.3 Agua.....	26
2.4 Aditivo curador de hormigón.....	26
2.5 Hormigón de cemento portland .....	26
2.6 Curado del hormigón.....	27
2.7 Ensayos no destructivos.....	27
2.7.1 Velocidad de pulso mediante ultrasonido.....	27
2.7.2 Resistividad eléctrica en el hormigón como indicador de calidad del hormigón.....	28
2.8 Ensayos destructivos .....	29
2.8.1 Resistencia a compresión en cilindros de hormigón.....	29
2.8.2 Resistencia a flexión en elementos de hormigón. ....	29
2.8.3 Relación entre resistencia a compresión y módulo de rotura .....	31
<b>CAPÍTULO III - MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>32</b>
3.1 Caracterización de los áridos. ....	32
3.1.1 Granulometría.....	32



3.1.2 Determinación de densidad y absorción de los áridos. ....	34
3.1.3 Determinación de masa unitaria.....	38
3.2 Diseño y elaboración de muestras de hormigón.....	39
3.2.1 Diseño de la mezcla de hormigón.....	39
3.2.2 Elaboración de los especímenes. ....	41
3.3 Exposición de los elementos a distintos tipos de curado. ....	45
3.3.1 Curado en laboratorio siguiendo estándares de la normativa.....	45
3.3.2 Curado de especímenes expuestos al viento.....	46
3.3.3 Curado de especímenes expuestos a bajas temperaturas-viento. ....	47
3.3.4 Curado de especímenes en condiciones normales de temperatura mediante la aplicación de un curado (antisol).....	49
3.4. Metodología de estudio de la calidad de hormigón a través de ensayos no destructivos.....	50
3.4.1 Ensayos de ultrasonido.....	50
3.4.2 Ensayos de resistividad eléctrica .....	51
3.5 Metodología de estudio de las propiedades en hormigón endurecido. ....	53
3.5.1 Ensayo de resistencia a compresión en cilindros de hormigón. ....	53
3.5.2 Ensayo a flexión en especímenes tipo viga y losa. ....	54
<b>CAPÍTULO IV - RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</b>	<b>57</b>
4.1 Caracterización de agregados.....	57
4.1.1 Granulometría y módulo de finura.....	57
4.1.2 Densidad, absorción y masa unitaria. ....	58
4.2 Diseño y elaboración de elementos de hormigón. ....	59
4.2.1 Diseño de la mezcla de hormigón.....	59
4.2.2 Elaboración de los especímenes. ....	59
4.3 Exposición de los elementos a los distintos tipos de curado.....	61
4.4 Análisis de la calidad del hormigón a través de ensayos no destructivos. ....	63
4.4.1 Análisis mediante ensayos de ultrasonido.....	63
4.4.2 Análisis mediante ensayos de resistividad eléctrica.....	65
4.5 Análisis de propiedades en hormigón endurecido. ....	66
4.5.1 Ensayo de resistencia a compresión en elementos tipo cilindro.....	66
4.5.2 Ensayo a flexión en elementos tipo viga y losa. ....	67
4.6 Correlaciones obtenidas.....	70
4.6.1 Correlación de los elementos curados en laboratorio .....	70



4.6.2 Correlación de los elementos curados con antisol.....	71
4.6.3 Correlación de los elementos curados en condiciones de viento.....	71
4.6.4 Correlación de los elementos curados en condiciones de baja temperatura–viento. ....	72
<b>CAPÍTULO V - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>73</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>76</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>80</b>





## Índice de figuras

<b>Figura 1:</b> Esquema de proceso de cuarteo de muestra para análisis. (Fuente: ASTM C702).....	23
<b>Figura 2:</b> Huecos y humedad en los áridos: a) Seco, b) Secado al aire, c) Saturado superficialmente seco (SSS), d) húmedo (Fuente: Materiales para Ingeniería Civil, 2009).....	25
<b>Figura 3:</b> Evolución de la resistencia del hormigón, según el tiempo de curado y las condiciones del mismo (Kosmatka and Panarese, 1988).....	27
<b>Figura 4:</b> Transmisión de carga eléctrica a través de espécimen de hormigón (Fuente: C.Andrade, R D' Andrea, 2011).....	28
<b>Figura 5:</b> Esquema de ensayo a flexión en elementos tipo viga y tipo losa (Fuente: INEN 2554). .....	31
<b>Figura 6.</b> Lavado del material.....	32
<b>Figura 7:</b> Tamizado de agregado grueso. ....	33
<b>Figura 8:</b> Tamizado de agregado fino. ....	33
<b>Figura 9:</b> Determinación de densidad y absorción en árido grueso. ....	36
<b>Figura 10:</b> Determinación de densidad y absorción en árido fino. ....	38
<b>Figura 11:</b> Esquema de ensayo de trabajabilidad (Fuente: Materiales para Ingeniería Civil, 2009).....	43
<b>Figura 12:</b> Determinación de asentamiento de la mezcla de hormigón (Trabajabilidad).....	44
<b>Figura 13:</b> Curado de elementos en laboratorio (sumersión en agua con hidróxido de calcio). ....	46
<b>Figura 14:</b> Ubicación de la locación para el curado (Fuente: Google Earth).....	46
<b>Figura 15:</b> Ubicación de la locación para el curado (Fuente: Google Earth).....	47
<b>Figura 16:</b> Curado de elementos con exposición al viento de la zona. ....	47
<b>Figura 17:</b> Curado de elementos con exposición a bajas temperaturas. ....	48
<b>Figura 18:</b> Ubicación del Parque Nacional El Cajas (Fuente: Google Earth). ....	48
<b>Figura 19:</b> Ubicación de la locación para el análisis (Fuente: Google Earth).....	49
<b>Figura 20:</b> Curado de elementos mediante la aplicación de Antisol blanco. ....	50
<b>Figura 21:</b> Esquema de generador de pulsos. (Fuente: C.Andrade, R D' Andrea, 2011). ....	50
<b>Figura 22:</b> Ensayo de ultrasonido aplicado a espécimen tipo cilindro.....	51
<b>Figura 23:</b> Calibración del equipo previo al ensayo.....	52
<b>Figura 24:</b> Ensayo de resistividad eléctrica en especímenes. ....	53
<b>Figura 25:</b> Especimen sometido a ensayo de resistencia a compresión.....	53
<b>Figura 26:</b> Tipo de falla en cilindros. ....	54
<b>Figura 27:</b> Ensayo a flexión en espécimen tipo viga. ....	55
<b>Figura 28:</b> Ensayo a flexión en espécimen tipo losa. ....	55
<b>Figura 29:</b> Tipo de falla en vigas. ....	56



<b>Figura 30:</b> Tipo de falla en losas. ....	56
<b>Figura 31:</b> Curva granulométrica de agregado grueso. ....	57
<b>Figura 32:</b> Curva granulométrica de agregado fino. ....	57
<b>Figura 33:</b> Resultados obtenidos en elementos tipo cilindro.....	67
<b>Figura 34:</b> Resultados obtenidos en elementos tipo viga. ....	68
<b>Figura 35:</b> Resultados obtenidos en especímenes tipo losa.....	69
<b>Figura 36:</b> Correlación R. Compresión - M. Rotura (laboratorio). ....	70
<b>Figura 37:</b> Correlación R. Compresión - M. Rotura (antisol).....	71
<b>Figura 38:</b> Correlación R. Compresión - M. Rotura (viento).....	72
<b>Figura 39:</b> Correlación R. Compresión - M. Rotura (baja temperatura). ....	72
<b>Figura 40.</b> Mezclado del hormigón. ....	81



## Índice de ecuaciones

<b>Ecuación 1:</b> Módulo de rotura para falla dentro del tercio medio. ....	30
<b>Ecuación 2:</b> Módulo de rotura para falla fuera del tercio medio. ....	30
<b>Ecuación 3:</b> Relación Resistencia a compresión - Módulo de rotura.....	31
<b>Ecuación 4:</b> Densidad relativa con árido grueso en condición seca al horno. ....	34
<b>Ecuación 5:</b> Densidad relativa de árido grueso en condición SSS. ....	34
<b>Ecuación 6:</b> Densidad relativa aparente con árido en condición SSS. ....	35
<b>Ecuación 7:</b> Densidad con árido grueso en condición seca al horno. ....	35
<b>Ecuación 8:</b> Densidad con árido grueso en condición SSS. ....	35
<b>Ecuación 9:</b> Densidad aparente de árido grueso. ....	35
<b>Ecuación 10:</b> Absorción de árido grueso. ....	35
<b>Ecuación 11:</b> Densidad relativa de árido fino en condición seca al horno. ....	37
<b>Ecuación 12:</b> Densidad relativa de árido fino en condición SSS. ....	37
<b>Ecuación 13:</b> Densidad relativa aparente de árido fino. ....	37
<b>Ecuación 14:</b> Densidad de árido fino en condición seca al horno. ....	37
<b>Ecuación 15:</b> Densidad de árido fino en condición SSS. ....	37
<b>Ecuación 16:</b> Densidad aparente de árido fino. ....	37
<b>Ecuación 17:</b> Absorción de árido fino. ....	38
<b>Ecuación 18:</b> Masa unitaria de árido grueso. ....	38
<b>Ecuación 19:</b> Resistividad eléctrica. ....	52



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Gustavo Andrés Asmal Peña en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "INFLUENCIA EN LA RESISTENCIA FINAL DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN DE GEOMETRÍA VARIABLE SOMETIDOS A DIFERENTES CONDICIONES DE CURADO", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 15 de Octubre del 2019

Gustavo Andrés Asmal Peña

C.I: 0105682116



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Gustavo Andrés Asmal Peña, autor del trabajo de titulación "INFLUENCIA EN LA RESISTENCIA FINAL DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN DE GEOMETRÍA VARIABLE SOMETIDOS A DIFERENTES CONDICIONES DE CURADO", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 15 de Octubre del 2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Gustavo Asmal Peña", written over a horizontal line.

Gustavo Andrés Asmal Peña

C.I: 0105682116



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Pablo Fernando González Guamán en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "INFLUENCIA EN LA RESISTENCIA FINAL DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN DE GEOMETRÍA VARIABLE SOMETIDOS A DIFERENTES CONDICIONES DE CURADO", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 15 de Octubre del 2019

---

Pablo Fernando González Guamán

C.I: 0106567209



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Pablo Fernando González Guamán, autor del trabajo de titulación "INFLUENCIA EN LA RESISTENCIA FINAL DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN DE GEOMETRÍA VARIABLE SOMETIDOS A DIFERENTES CONDICIONES DE CURADO", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 15 de Octubre del 2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Pablo Fernando González Guamán", written over a horizontal line.

Pablo Fernando González Guamán

C.I: 0106567209



## **DEDICATORIA**

A mis padres, de manera especial a mi mamá, que son con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo, valentía y perseverancia.

A mi hermana y primos por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias. A toda mi familia porque con sus, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todas mis aspiraciones.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a todos mis amigos y amigas, por apoyarme cuando más los necesito, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día.

Pablo González Guamán.

A mis padres por el amor y cariño que me han brindado desde que era un niño y por el apoyo otorgado a lo largo de mi carrera estudiantil, ya que sin ellos hubiera sido imposible alcanzar esta meta, a mi hermano por la confianza brindada y a mi familia en general por ser el soporte de mi vida diaria.

Andrés Asmal Peña.





## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por guiarnos en el camino del bien y permitirnos concluir con nuestro objetivo.

A nuestros padres quienes son el principal motor en nuestras vidas.

A nuestros compañeros y amigos por la confianza brindada durante el transcurso de esta experiencia.

Al Ingeniero Daniel Mogrovejo por ser nuestro guía durante el desarrollo de este proyecto.

Y a la Universidad de Cuenca y a todas las autoridades, por permitirnos concluir con esta etapa importante en nuestras vidas.



## CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

El hormigón al ser uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo entero, su investigación y estudio es muy importante en el campo de la Ingeniería Civil, dicho material puede verse afectado por varios factores y ser sensible a condiciones medioambientales que afectan a su durabilidad (Mather B.,2004). Uno de los procesos más importantes durante la elaboración del hormigón es el curado, el cual se define como el mantenimiento adecuado de humedad y temperatura del hormigón a edades tempranas, con el objetivo de que se puedan desarrollar las propiedades adecuadas (CSA A23.1-09, 2009).

Cuando las condiciones de curado no son las más óptimas para la hidratación de la mezcla de hormigón, este puede llegar a interrumpirse, provocando daños físicos en los elementos y como consecuencia se produce una reducción en sus propiedades mecánicas, es decir, estas propiedades están ligadas de manera significativa a los cambios que se dan a nivel de microestructura, por lo tanto, la presencia y cantidad de poros a nivel capilar juegan un papel importante en su desarrollo (Neville A., Brooks J. 2010 ).

Existen estudios experimentales en donde se determinó que una de las variables más incidentes en la resistencia del hormigón es la temperatura (Ghaida Al-Assadi, et al., 2009); cuando se realiza el proceso de elaboración del hormigón en ambientes con altas temperaturas y baja humedad, es decir zonas calurosas, es muy importante realizar un curado adecuado, lo cual no siempre se garantiza y a la larga representa problemas en el desempeño de la estructura, ya que no se cumple con los requisitos de diseño establecidos (Palomo. A., 2000).

En condiciones de baja temperatura, donde el hormigón se encuentra expuesto probablemente a heladas, es decir, a ciclos de hielo y deshielo, si no se consideran medidas adecuadas durante su elaboración y curado, se incide de manera negativa ya que provoca de igual manera la aparición de fisuras superficiales en el hormigón permitiendo el ingreso de cualquier tipo de sustancia mediante capilaridad (Gokce, A., et al., 2004).

Experimentos realizados por Gonnerman y Shuman en 1928 demuestran que existe una variación considerable entre los elementos curados por sumersión y los elementos expuestos



permanentemente al aire, en donde se aprecia una ganancia de aproximadamente el 50% de resistencia a los 28 días en los elementos sumergidos.

## 1.2 Definición del problema

A pesar de que existen estudios sobre la afección que tiene el curado en la resistencia del hormigón, no necesariamente se le da la importancia debida. Un mal proceso de curado afecta directamente a la resistencia del hormigón, generalmente en la superficie de los elementos se presentan fisuras, que permiten que sustancias naturales (agua) o artificiales (sustancias nocivas) ingresen en su interior, dejando como consecuencia un hormigón con mayor índice de permeabilidad y una mayor cantidad de poros; además se producen daños a nivel de microestructura, las cuales se forman a partir de una pérdida excesiva de humedad.

## 1.3 Justificación

Debido a que el hormigón debe cumplir con ciertos requisitos que aseguren el buen desempeño de la estructura, nace la necesidad de tener un control de la calidad en este material de construcción, siendo un parámetro universal de verificación, la resistencia a los 28 días de curado. Por lo tanto, se busca a través de la exposición de elementos de hormigón a diferentes condiciones ambientales y mediante la aplicación de ensayos destructivos y no destructivos, la obtención de resultados que corroboren la variabilidad que se presenta en la resistencia del hormigón, y a su vez hacer énfasis en la importancia que tiene el curado en todo tipo de estructura.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo General

Analizar la influencia del curado del hormigón en la resistencia final de elementos de distinta geometría cuando estos son expuestos a diferentes condiciones de curado.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Obtener el diseño de dosificación de una resistencia patrón de 240 kg/cm<sup>2</sup>.
- Elaborar las muestras de hormigón: cilindros, vigas y losas.
- Exponer los 3 tipos de elementos de hormigón a las diferentes condiciones de curado.



- Analizar de manera cualitativa y cuantitativa el estado físico de los elementos mediante ensayos no destructivos a través del uso del equipo de ultrasonido y de resistividad eléctrica.
- Realizar ensayos de resistencia a flexión (vigas y losas) y a compresión (cilindros) de las muestras de hormigón a los 7, 14 y 28 días.
- Evaluar y analizar los datos obtenidos de las diferentes condiciones de curado.
- Determinar que condición de curado influye de manera más significativa a la resistencia final y que condición de curado es la más eficiente para un buen desempeño del hormigón.

### 1.5 Alcance

El proyecto a realizar es de carácter experimental y se desarrolló en gran parte en el laboratorio de Geotecnia y Materiales de Construcción de la Universidad de Cuenca para el diseño y elaboración de las muestras, y en el laboratorio de Alta Tensión para la aplicación de ensayos no destructivos.

Como punto de partida se obtuvo el diseño de la dosificación patrón. Los materiales a emplear fueron previamente caracterizados mediante ensayos técnicos en base a las normativas INEN y ASTM, esto con el fin de determinar sus propiedades físicas y mecánicas; continuamente se procedió a realizar las muestras de hormigón en el laboratorio, las cuales están divididas en los siguientes elementos: 12 cilindros o cilindros de 10 cm x 20 cm, 12 vigas de 53 cm x 15 cm x 15 cm y 12 losas de 50 cm x 50 cm con un espesor de 2.5 cm.

Los 3 tipos de elementos fueron expuestos a cuatro condiciones de curado presentadas a continuación:

- a) Curado en base a la normativa:** Se procedió a realizar el curado cumpliendo los criterios y especificaciones de la normativa (ASTM), es decir un curado en laboratorio mediante la sumersión de los elementos en una piscina de curado.
- b) Curado en condiciones de viento:** Se eligió un lugar con estas características ambientales (El Valle, Azuay - Ecuador) para exponer a las muestras a estas condiciones y analizar las consecuencias que esto genera en el hormigón.



- c) Curado en bajas temperaturas-viento:** Se eligió una zona con temperaturas muy bajas y corrientes de viento cercanas a  $0^{\circ}$  C (Cajas, Azuay - Ecuador) y de igual forma se expuso las muestras a dichas condiciones.
- d) Uso de un compuesto curador:** El curado se realizó en condiciones ambientales normales de la ciudad de Cuenca - Ecuador, es decir siguiendo un proceso normal en campo, a través del uso de un antisol blanco.

Posteriormente, se analizó la condición física de los elementos mediante ensayos no destructivos, como son el ultrasonido y la resistividad eléctrica, y por último se realizó los ensayos de resistencia a los 7,14 y 28 días de curado. Finalmente, se analizó los resultados obtenidos de cada condición de curado de manera individual, además de un análisis general buscando una comparación significativa o algún tipo de tendencia que ayude a demostrar con datos experimentales, la importancia del curado en el desempeño del hormigón.



## CAPÍTULO II - MARCO TEÓRICO

### 2.1 Áridos

Los áridos o agregados en el campo de la Ingeniería Civil hace referencia a una masa rocosa molida, grava o arena; los cuales son de gran importancia al ser parte de la composición del hormigón ocupando aproximadamente entre el 60% al 75% de su volumen (Kosmatka et al., 2004), el porcentaje restante está conformado por cemento y agua.

Es de gran importancia el estudio de sus propiedades y características, ya que el análisis permite lograr un diseño de la mezcla de hormigón mucho más eficiente y adecuado a las exigencias del usuario y del uso para el que está destinado, los áridos de origen natural generalmente se clasifican en agregado fino, el cual hace referencia a todo material pasante por el tamiz N°4; y al material con mayor tamaño se le denomina árido grueso.

#### 2.1.1 Evaluación de las fuentes de los áridos.

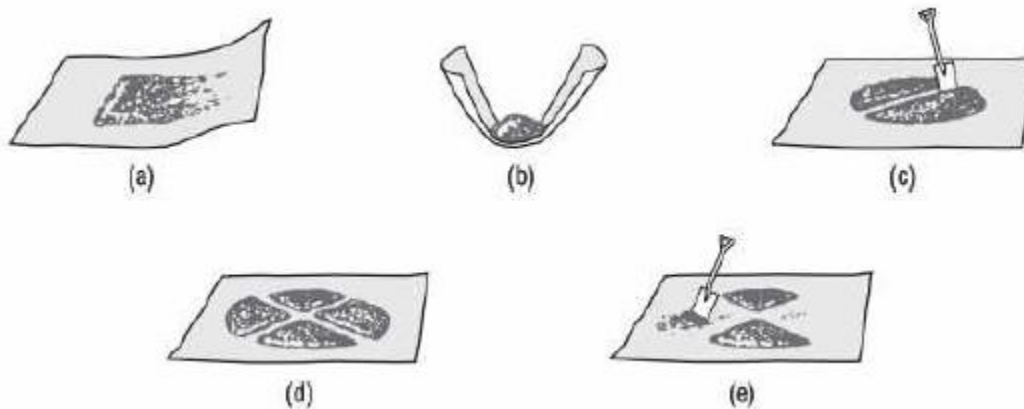
El criterio usado por los ingenieros civiles para la selección de los áridos se basa en la capacidad que tienen para satisfacer los requisitos de cada proyecto en específico, si se acepta o no el uso de un árido es definido según las propiedades tanto físicas, químicas y mecánicas mediante ensayos realizados en laboratorio, estas propiedades pueden variar dentro de una misma fuente de origen, por lo tanto, es necesario realizar muestreos constantes de los materiales y realizar pruebas de forma continua a medida que se extraiga el material (Mamlouk y Zaniewski, 2009).

Debido a que para la construcción de una obra civil generalmente se emplea grandes cantidades de material tanto grueso como fino; el costo y disponibilidad de los mismos son factores importantes a considerar al momento de seleccionar la fuente de extracción del material.

#### 2.1.2 Muestreo de los áridos.

Con el fin de que las propiedades antes mencionadas puedan ser obtenidas de manera correcta, la muestra del material debe ser representativa con respecto a la fuente del mismo, esto es un problema que se presenta de manera común debido a que se produce segregación de los agregados de mayor tamaño al momento de realizar el depósito del material, por lo tanto,

para obtener una muestra representativa se debe realizar un proceso de cuarteo mediante procesos físicos o mecánicos.



*Figura 1: Esquema de proceso de cuarteo de muestra para análisis. (Fuente: ASTM C702).*

El proceso que se usó para el presente proyecto se ilustra en la Figura 1, en donde: a) Se mezclan las partículas haciéndolas rodar sobre un paño; b) Se forma un cono después de realizar la mezcla; c) Se aplanan el cono; d) División en cuartos; y e) Se seleccionan los dos cuartos opuestos.

### **2.1.3 Propiedades de los áridos.**

#### **2.1.3.1 Granulometría y tamaño máximo.**

El análisis granulométrico (granulometría) describe la distribución de los tamaños de los agregados mediante el peso retenido o el peso pasante a través de una serie de tamices ordenados de manera descendente según las aberturas de las mallas, los áridos de gran tamaño proveen ciertas ventajas económicas en la mezcla de hormigón, debido a su área superficial con lo cual se requiere menos cantidad de aglomerante (cemento), sin embargo, trabajar con áridos de gran tamaño puede resultar dificultoso en cuanto a la colocación de la mezcla final, por lo tanto, se consideran ciertas limitaciones al momento de definir el tamaño del agregado a emplear, al igual que la capacidad de los equipos, la dimensión de los elementos a construir, el espaciado de la armadura de acero, entre otros (Niño Hernández, 2010).



De un análisis granulométrico se puede determinar además ciertos parámetros empleados para el diseño de la mezcla de hormigón (Libia G, 2003).

**Tamaño máximo del árido.** - Se define por la abertura de la malla del tamiz más pequeño por el cual puede pasar el 100% de la muestra del agregado.

**Tamaño máximo nominal.** - Se define por la abertura del tamiz de mayor tamaño el cual retiene cierta parte de la muestra de agregado, por lo general hasta el 10% de la muestra inicial.

### **2.1.3.2 Gravedad específica.**

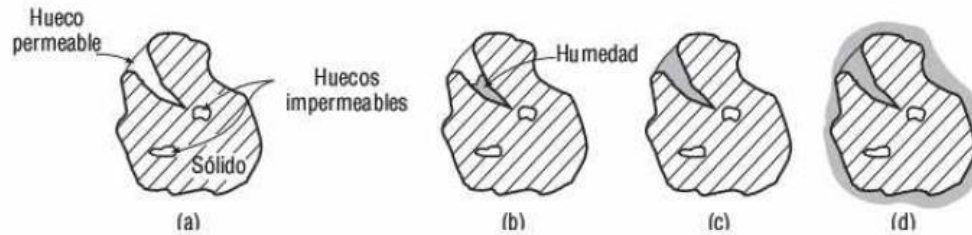
Las características peso-volumen de los áridos, no son indicadores de mayor importancia con respecto a la calidad de los materiales, sin embargo, son de gran importancia para el diseño del hormigón, ya que así se sabe el volumen que ocupa los áridos en las mezclas (Mamlouk y Zaniewski, 2006).

La gravedad específica se define como la masa del material entre la masa de volumen igual de agua destilada (INEN 857), se determinan tres tipos de gravedad específica (gravedad en estado seco, gravedad específica en estado saturado superficialmente seco y gravedad específica aparente).

### **2.1.3.3 Absorción**

Los agregados al ser elementos con superficie irregular, pueden capturar agua en una mezcla de hormigón, por lo tanto, es de gran importancia determinar la cantidad de agua que absorbe el árido, ya que el agua contenida en los poros superficiales no facilita la trabajabilidad de la mezcla y no estará disponible para la reacción con el cemento. (Mamlouk y Zaniewski, 2006).





**Figura 2:** Huecos y humedad en los áridos: a) Seco, b) Secado al aire, c) Saturado superficialmente seco (SSS), d) húmedo (Fuente: *Materiales para Ingeniería Civil*, 2009).

La Figura 2 ilustra las cuatro condiciones de humedad de un árido: a) el agregado no contiene humedad, este estado por lo general se obtiene luego de someter el material a un secado en el horno; b) En este estado el árido posee una cierta cantidad de humedad contenida en los poros de su superficie; c) Los poros del agregado se encuentran húmedos pero la superficie del mismo está seco; d) Tanto los poros como la superficie del agregado están en condición húmeda.

#### 2.1.3.4 Peso unitario y huecos del agregado mineral.

Se define al peso unitario como la masa del agregado que ocupa en un volumen unitario, incluyendo el volumen de los vacíos del agregado (INEN 858), la relación de vacíos o huecos indican la cantidad de mortero necesaria para llenar los espacios que quedan entre las partículas del agregado grueso (Neville A., Brooks J. 2010), estos parámetros permiten determinar las proporciones de los componentes para el diseño de la mezcla de hormigón.

#### 2.2 Cemento Portland.

Material de construcción aglutinante el cual presenta propiedades tanto de adherencia y cohesión permitiendo así la unión de los agregados (grueso y fino) formando una masa compacta, el endurecimiento de la mezcla se da como resultado de una reacción química del cemento en contacto con el agua, este proceso se le conoce como hidratación del cemento (Asocreto, 2010); el tipo de cemento que se empleó para el diseño y la elaboración de los especímenes de hormigón es el cemento Holcim Tipo GU, el cual es usado para cualquier tipo de construcción en general, este tipo de cemento cumple con los estándares de calidad y desempeño establecidos en la normativa NTE INEN 2380.



### **2.3 Agua**

Se usó la dotación de agua suministrada por la empresa pública ETAPA, entidad encargada de proveer agua potable a la ciudad cumpliendo con los estándares de calidad establecidos en la normativa INEN 1108.

### **2.4 Aditivo curador de hormigón**

Solución de consistencia acuosa la cual al aplicarse sobre la superficie de los elementos de hormigón forma una película protectora que evita la pérdida prematura de humedad y garantizar así un curado eficiente de los elementos, el aditivo empleado en este caso de estudio fue un Antisol Blanco Sika.

### **2.5 Hormigón de cemento portland**

El hormigón es un material de construcción compuesto y homogéneo, que resulta de la mezcla de proporciones definidas tanto de agua, de un aglomerante (cemento), agregados minerales (grava, arena) principalmente y de ser necesario la adición de aditivos que permitan mejorar las características de la mezcla (Zabaleta H., 1992).

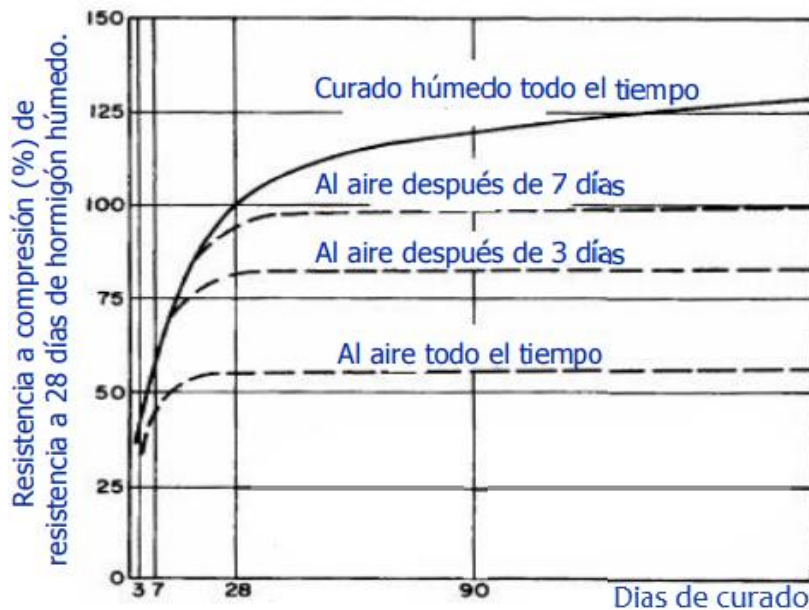
La calidad del hormigón endurecido depende en gran medida de la pasta obtenida durante el proceso de elaboración de especímenes, se denomina pasta adecuada cuando se puede observar que el agregado tanto fino como grueso se encuentran totalmente cubiertos y también los espacios entre los mismos.

La relación  $a/c$  es de vital importancia, ya que, mientras menor sea esta, mayor será la resistencia final del hormigón, entre las ventajas que se obtienen al reducir el contenido de agua en la mezcla están:

- Incremento en la resistencia a la compresión y flexión en los elementos de hormigón.
- Se reduce la permeabilidad en los elementos.
- La tendencia a sufrir agrietamientos debido a contracción se ve reducido.

## 2.6 Curado del hormigón.

El proceso de curado en el hormigón permite que se dé el endurecimiento del mismo de manera progresiva en un cierto periodo de tiempo, el aumento de la resistencia continúa mientras haya la presencia de cemento no hidratado o si el hormigón se encuentra en un ambiente húmedo o de ser el caso, que la humedad relativa del medio sea mayor o igual a 80%, (Kosmatka et al., 2004). La Figura 3 muestra la evolución de la resistencia del hormigón en base al tiempo de curado y condiciones del mismo.



*Figura 3: Evolución de la resistencia del hormigón, según el tiempo de curado y las condiciones del mismo (Kosmatka and Panarese, 1988).*

## 2.7 Ensayos no destructivos

### 2.7.1 Velocidad de pulso mediante ultrasonido

Este ensayo no destructivo es un indicador de la calidad del hormigón, que se define según la velocidad de pulso obtenida en base a cuan uniforme es la estructura del espécimen, además de la presencia de huecos y grietas, cambios en las propiedades del hormigón y la severidad de los tipos de deterioro presentes en los elementos.

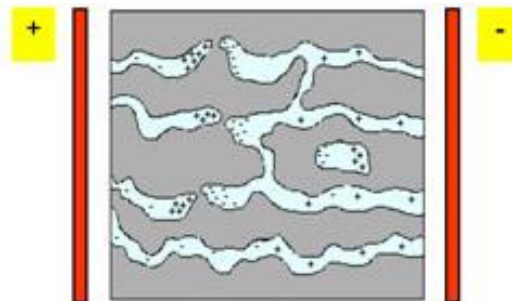
El método se basa en el cálculo de la velocidad de propagación de ondas producidas por un transductor electroacústico en contacto con la superficie del espécimen, los pulsos producidos

viajan a través del elemento y son detectados por un receptor el cuál se encuentra a una distancia definida desde el transmisor, la relación entre la distancia transmisor-receptor y el tiempo que tarda en llegar de un punto al otro define la velocidad de propagación de los pulsos, la velocidad de transmisión de ondas se ve afectado directamente con el grado de deterioro del elemento(ASTM C597).

### 2.7.2 Resistividad eléctrica en el hormigón como indicador de calidad del hormigón.

Este tipo de ensayo no destructivo es aplicado con el fin de llevar un control de calidad del hormigón, permite obtener información acerca del endurecimiento en estado fresco de la mezcla, el grado de curado del espécimen, el índice de corrosión, entre otros parámetros (Andrade y D' Andrea, 2011).

La resistividad eléctrica indica parámetros a nivel de microestructura del hormigón, de su porosidad y además del contenido de agua, con lo cual se obtiene un control mucho más eficiente de todas las etapas por las que pasa dicho material, de manera general se puede definir a la resistividad eléctrica como la oposición al paso de la corriente a través del elemento, esto depende del tipo de material del cual está elaborado el mismo, además, la resistividad varía según las condiciones en la cual se encuentra el espécimen, es decir, si este se encuentra húmedo el valor de resistividad descendería ya que la corriente eléctrica se transmitiría de una manera más eficiente y sucede lo contrario en el caso de que la humedad sea variable.



**Figura 4:** Transmisión de carga eléctrica a través de espécimen de hormigón (Fuente: C.Andrade, R D' Andrea, 2011).



## 2.8 Ensayos destructivos

### 2.8.1 Resistencia a compresión en cilindros de hormigón.

El ensayo a compresión en elementos cilíndricos de hormigón es usado como medida de calidad ya que permite estimar la durabilidad y resistencia a la meteorización, además es uno de los parámetros de diseño de mayor importancia ya que permite garantizar que la estructura va poder soportar las cargas para las cuales fue diseñado, la resistencia a compresión del hormigón es inversamente proporcional a la relación a/c, es decir, mientras menor sea la relación a/c, mayor será la resistencia final obtenida de los especímenes ensayados (Mamlouk y Zaniewski, 2009).

Para realizar el ensayo y obtener la resistencia a compresión de los especímenes se siguieron las especificaciones dadas en las normativas INEN 1573 y ASTM C 39, en donde los resultados de este ensayo son usados como control de calidad de la dosificación, operaciones de mezclado y colocación; para la verificación del cumplimiento de los requisitos de diseño, y en el caso de que se haya adicionado aditivos, comprobar si su uso es efectivo.

Todos los especímenes deben romperse dentro de ciertas tolerancias de tiempo permitidas para cada edad de ensayo, dichos valores de tolerancia establecidos en la normativa se muestran en la siguiente tabla:

*Tabla 1: Tolerancias de tiempo admisible para realizar ensayo de compresión.*

Edad de ensayo	Tolerancia admisible
24 horas	± 0.5 h o 2.1 %
3 días	2 horas o 2.8 %
7 días	6 horas o 3.6 %
28 días	20 horas o 3.0 %
90 días	2 días o 2.2 %

(Fuente: INEN 1573)

### 2.8.2 Resistencia a flexión en elementos de hormigón.

El ensayo a flexión en especímenes de hormigón se determina por medio del módulo de rotura, las superficies secas reducen la resistencia a flexión, por lo que se recomienda realizar el procedimiento tan pronto como sea posible luego de extraer los elementos del almacenamiento húmedo (INEN 2554).



El proceso especificado en la normativa para realizar este ensayo indica en primer lugar que se debe verificar que el espécimen se encuentre centrado en los bloques de apoyo, llevar los bloques con los cuales se aplica la carga en la superficie del elemento a los dos tercios de la luz libre, posteriormente se procede a la aplicación de la carga a una velocidad constante hasta que se produzca la rotura, la velocidad de aplicación de la carga debe estar entre 0.86 Mpa/min y 1.21 Mpa/min.

Consideraciones presentadas en la normativa INEN 2554 para determinar el módulo de rotura en elementos de hormigón.

a) Cuando la rotura del espécimen se produce en la superficie a tracción dentro del tercio medio de la luz libre, el módulo de rotura se determina mediante la ecuación:

$$MR = \frac{P \cdot L}{b \cdot d^2}$$

*Ecuación 1: Módulo de rotura para falla dentro del tercio medio.*

Donde:

MR = módulo de rotura [Mpa].

P = carga máxima aplicada, indicada por el equipo [N].

L = Luz libre [mm].

b = promedio del ancho del espécimen (en la fractura) [mm].

d = promedio de la altura del espécimen (en la fractura) [mm].

b) Si la fractura se produce en la superficie a tracción fuera del tercio medio de la luz libre, pero no más allá del 5% de la luz libre, entonces el módulo de rotura es:

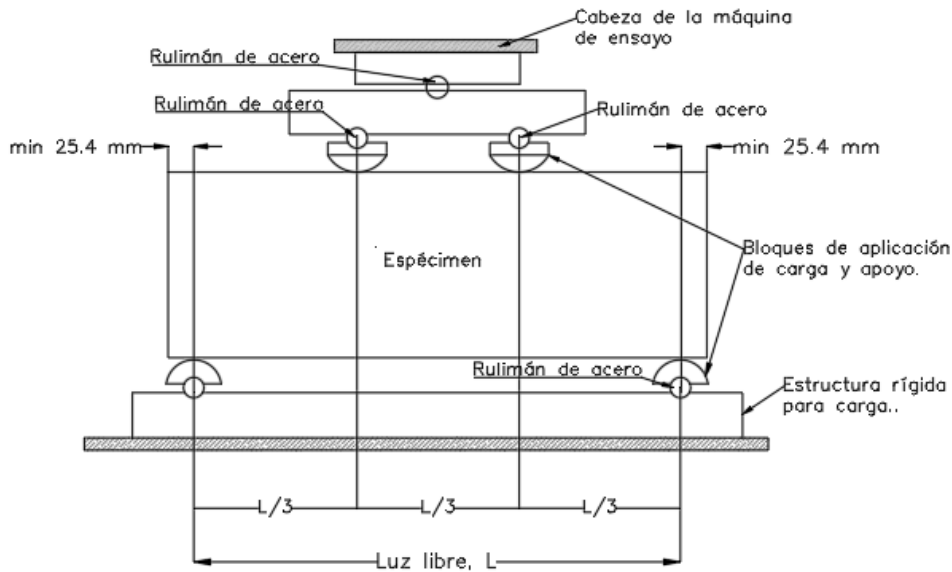
$$MR = \frac{3 \cdot P \cdot a}{b \cdot d^2}$$

*Ecuación 2: Módulo de rotura para falla fuera del tercio medio.*

Donde:

a = distancia media entre la línea de fractura y el apoyo más cercano en la superficie a tracción de la viga.

c) Si la fractura se produce en la superficie de tracción fuera del tercio medio de la luz libre, en más de un 5% de la luz libre, entonces se desechan los resultados del ensayo.



*Figura 5: Esquema de ensayo a flexión en elementos tipo viga y tipo losa (Fuente: INEN 2554).*

### 2.8.3 Relación entre resistencia a compresión y módulo de rotura

La normativa ACI 318 – 14 especifica que la relación entre el módulo de rotura y la resistencia a compresión está definida mediante la siguiente ecuación:

$$f'c = 2 * \lambda * \sqrt{f_r}$$

*Ecuación 3: Relación Resistencia a compresión - Módulo de rotura.*

Donde:

$f'c$  = Resistencia a compresión (kg/cm<sup>2</sup>).

$f_r$  = Módulo de rotura (kg/cm<sup>3</sup>).

$\lambda$  = Igual a 1 para hormigón de peso normal.

## CAPÍTULO III - MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Caracterización de los áridos.

Previo a realizar los respectivos ensayos de caracterización, los materiales fueron debidamente lavados con el fin de eliminar las impurezas que puedan presentarse (Ver Figura 6). Igualmente, se realizó el cuarteo manualmente del agregado buscando una homogenización del material para que los resultados de los ensayos sean correctos.



*Figura 6. Lavado del material.*

#### 3.1.1 Granulometría

Para el ensayo se siguió las especificaciones de la normativa ASTM C 136. El tamaño máximo nominal del agregado grueso fue de 19 mm, por lo tanto, según la Tabla 2 el peso de muestra que se consideró en el ensayo fue de 5 kg.

*Tabla 2: Peso de muestra para ensayo (ASTM C 136)*

Tamaño Máximo Nominal, mm (in)	Peso de la muestra para ensayo, kg (lb)
9.5 (3/8)	1 (2)
12.5 (1/2)	2 (4)
19.0 (3/4)	5 (11)
25.0 (1)	10 (22)
37.5 (1 ½)	15 (33)
50 (2)	20 (44)
63 (2 ½)	35 (77)
75 (3)	60 (130)
90 (3 ½)	100 (220)
100 (4)	150 (330)
125 (5)	300 (660)



Para el proceso de tamizado se utilizaron los tamices 1", 3/4", 1/2", 3/8" y N°4, y con la ayuda de la máquina de cribado se realizó el ensayo durante 5 minutos (Ver Figura 7).



*Figura 7: Tamizado de agregado grueso.*

Para la granulometría del agregado fino se comprobó que todo el material (arena) pase el tamiz N°4; la normativa ASTM C136 establece que el peso mínimo de la muestra después del lavado debe ser de 300 gr, por lo tanto, para el ensayo se utilizó un peso de aproximadamente 500 gr. Igualmente, con la ayuda de la máquina de cribado y utilizando los tamices N°8, N°6, N°10, N°50, N°100 y N°200, se realizó el ensayo durante 5 minutos (Ver Figura 8).



*Figura 8: Tamizado de agregado fino.*



### 3.1.2 Determinación de densidad y absorción de los áridos.

La densidad y absorción de los agregados grueso y fino se obtuvo siguiendo las especificaciones dadas en la normativa INEN 857 e INEN 856, respectivamente.

Para el análisis del agregado grueso se utilizó una muestra de aproximadamente 3 kg, tal como indica la normativa para un tamaño máximo nominal de 19 mm; la muestra se saturó en agua durante 24 h, pasado este tiempo con la ayuda de una franela se secó el agua presente en la superficie del agregado hasta lograr que las partículas se encuentren en un estado de saturación con superficie seca (SSS), posteriormente se colocó toda la muestra en una canastilla agujerada y se tomó el peso al aire, continuamente se sumergió la canastilla con el material en un recipiente con agua y se registró su peso (peso aparente, ver Figura 9), finalmente se dejó la muestra en un horno a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  para el secado del material y de igual manera se registró su peso.

Una vez determinado todos los pesos se calculó las densidades y absorción de los agregados con las ecuaciones especificadas en la normativa. Para cada peso se asignó la siguiente simbología:

A= peso en aire de la muestra seca al horno (gr).

B= peso en aire de la muestra saturada superficialmente seca (gr).

C= peso aparente en agua de la muestra saturada (gr).

#### Densidad relativa con árido en condición seca al horno.

$$\text{Densidad Relativa (SH)} = \frac{A}{(B-C)}$$

*Ecuación 4: Densidad relativa con árido grueso en condición seca al horno.*

#### Densidad relativa con árido en condición SSS.

$$\text{Densidad relativa (SSS)} = \frac{B}{(B-C)}$$

*Ecuación 5: Densidad relativa de árido grueso en condición SSS.*



### Densidad relativa aparente con árido en condición SSS.

$$\text{Densidad relativa aparente (SSS)} = \frac{A}{(A-C)}$$

*Ecuación 6: Densidad relativa aparente con árido en condición SSS.*

### Densidad con árido en condición seca al horno.

$$\text{Densidad (SH), (kg/m}^3\text{)} = \frac{997.5 \cdot A}{(B-C)}$$

*Ecuación 7: Densidad con árido grueso en condición seca al horno.*

### Densidad con árido en condición SSS.

$$\text{Densidad (SSS), (kg/m}^3\text{)} = \frac{997.5 \cdot B}{(B-C)}$$

*Ecuación 8: Densidad con árido grueso en condición SSS.*

### Densidad Aparente.

$$\text{Densidad aparente, (kg/m}^3\text{)} = \frac{997.5 \cdot A}{(A-C)}$$

*Ecuación 9: Densidad aparente de árido grueso.*

### Absorción.

$$\text{Absorción, (\%)} = \frac{B-A}{A} \cdot 100$$

*Ecuación 10: Absorción de árido grueso.*



*Figura 9: Determinación de densidad y absorción en árido grueso.*

En el agregado fino se consideró una muestra seca de 500 gr y se aplicó el método gravimétrico para la determinación de las densidades. En primer lugar, se sumergió la muestra en agua por un periodo de 24 horas para que se sature, posteriormente se dejó al material en estado SSS, esto se comprobó con la ayuda de un molde cónico y un compactador (25 golpes por capa), en donde la muestra de arena tiene que conservar su forma cónica al retirar el molde y poder aceptar que el material se encontraba en estado SSS (Ver Figura 10).

Se determinó el peso del picnómetro con agua a 23°C hasta la marca de calibración y continuamente con la ayuda de un embudo se añadió el material en estado SSS, se agitó el picnómetro de manera manual con el fin de eliminar las burbujas de aire contenidas en su interior, y nuevamente se registró su peso comprobando que se mantenga el agua en la marca de calibración y con la misma temperatura. Finalmente, se dejó a secar la muestra en el horno durante 24 horas a una temperatura de 110°C  $\pm$  5°C y se determinó su peso.

Una vez determinado todos los pesos se calculó las densidades y absorción de los agregados con las ecuaciones especificadas en la normativa. Para cada peso se asignó la siguiente simbología:

A = peso de la muestra seca al horno (gr).

B = peso del picnómetro con agua (gr).

C = peso del picnómetro con agua y muestra (gr).

S = peso de muestra saturada superficialmente seca (SSS).



**Densidad relativa con árido en condición seca al horno.**

$$\text{Densidad relativa (SH)} = \frac{A}{(B+S-C)}$$

*Ecuación 11: Densidad relativa de árido fino en condición seca al horno.*

**Densidad relativa con árido en condición SSS.**

$$\text{Densidad relativa (SSS)} = \frac{S}{(B+S-C)}$$

*Ecuación 12: Densidad relativa de árido fino en condición SSS.*

**Densidad relativa aparente.**

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{A}{(B+A-C)}$$

*Ecuación 13: Densidad relativa aparente de árido fino.*

**Densidad con árido en condición seca al horno.**

$$\text{Densidad (SH), (kg/m}^3\text{)} = \frac{997.5 \cdot A}{(B+S-C)}$$

*Ecuación 14: Densidad de árido fino en condición seca al horno.*

**Densidad con árido en condición SSS.**

$$\text{Densidad (SSS), (kg/m}^3\text{)} = \frac{997.5 \cdot S}{(B+S-C)}$$

*Ecuación 15: Densidad de árido fino en condición SSS.*

**Densidad aparente**

$$\text{Densidad aparente (SSS), (kg/m}^3\text{)} = \frac{997.5 \cdot A}{(B+A-C)}$$

*Ecuación 16: Densidad aparente de árido fino.*

## Absorción

$$\text{Absorción, (\%)} = \frac{(S-A)}{A} * 100$$

*Ecuación 17: Absorción de árido fino.*



*Figura 10: Determinación de densidad y absorción en árido fino.*

### 3.1.3 Determinación de masa unitaria.

Se colocó el agregado grueso en el molde metálico mediante 3 capas, en cada una se compactó el material con 25 golpes mediante una varilla de cabeza redondeada, es importante que durante la compactación de la primera capa, la varilla no toque el fondo del molde; se repitió el mismo proceso para la segunda capa, y en a la tercera capa se colocó el material hasta rebosar, se enrasó y se registró su peso.

Posteriormente, se llenó el molde completo con agua y mediante el uso de una placa de vidrio se aseguró que no queden burbujas de aire en su interior y se determinó el peso, finalmente se obtuvo el peso del molde completamente vacío. El volumen del molde se determinó mediante el cociente entre el peso obtenido con agua y la densidad del agua, los cálculos necesarios se realizaron en base a la siguiente ecuación especificada en la normativa:

$$M (\text{kg/m}^3) = \frac{(G-T)}{V}$$

*Ecuación 18: Masa unitaria de árido grueso.*



Donde:

M = masa unitaria (peso volumétrico), kg/m<sup>3</sup>.

G = peso del árido más el molde, kg.

T = peso del molde, kg.

V = volumen del molde, m<sup>3</sup>.

### 3.2 Diseño y elaboración de muestras de hormigón.

#### 3.2.1 Diseño de la mezcla de hormigón.

Para el diseño de las muestras se empleó el método propuesto por el ACI 211.1, en el cual se presentan diversas tablas y factores a considerar en base a las características de los componentes que se van a emplear en la mezcla de hormigón.

Como primer paso, se estableció la relación a/c, dicho valor se definió según la resistencia final requerida a los 28 días de curado y además tomando en cuenta si el hormigón a diseñar es aireado o no aireado, la siguiente tabla presenta los valores de relación a/c a considerar:

*Tabla 3: Valores de relación a/c según resistencia requerida y el contenido de aire.*

Resistencia a la compresión a los 28 días, f'c Mpa (psi)	Relación a/c en peso	
	Hormigón no aireado	Hormigón aireado
17 (2500)	0.67	0.54
21 (3000)	0.58	0.46
24 (3500)	0.51	0.40
28 (4000)	0.44	0.35
31 (4500)	0.38	**
35 (5000)	**	**

*(Fuente: Materiales para Ingeniería Civil, 2009)*

Posteriormente, se estableció el volumen de árido grueso contenido en una unidad de volumen tomando en cuenta su tamaño máximo nominal y además considerando el módulo de finura del árido fino como se indica en la siguiente tabla:

**Tabla 4:** Volumen de árido grueso según TMN y módulo de finura de árido fino.

Tamaño máximo nominal del árido mm (pulg).	Volumen de árido grueso apisonado en seco por unidad de volumen de hormigón			
	Módulo de finura			
	2.4	2.6	2.8	3
9.5 (3/8)	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2)	0.59	0.57	0.55	0.53
19 (3/4)	0.66	0.64	0.62	0.60
25 (1)	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1 1/2)	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2)	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3)	0.82	0.80	0.78	0.76
150 (6)	0.87	0.85	0.83	0.81

(Fuente: Materiales para Ingeniería Civil, 2009).

En el siguiente paso se definió el porcentaje de vacíos contenido en la mezcla de hormigón en base al valor del tamaño máximo nominal del árido grueso, los valores propuestos en la normativa se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 5:** Contenido porcentual de aire contenido según TMN del árido grueso.

Características de la mezcla de diseño	Tamaño máximo nominal del árido grueso							
	9.5 mm (3/8")	12.5 mm (1/2")	19 mm (3/4")	25 mm (1")	37.5 mm (1 1/2")	50 mm (2")	75 mm (3")	150 mm (6")
Hormigón no aireado	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Hormigón aireado (**)								
Exposición pequeña	4.5	4	3	3	2.5	2	1.5	1
Exposición moderada	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3
Exposición severa	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4

(Fuente: Materiales para Ingeniería Civil, 2009)

Consecuentemente, se procedió a definir los límites de asentamiento recomendados según el tipo de estructura a diseñar, dichos valores se presentan en la siguiente tabla:





**Tabla 6:** Cantidad de agua aproximada en kg/m<sup>3</sup> (lb/yd<sup>3</sup>) en función del asentamiento y TMN.

Asentamiento mm (pulg).	Tamaño máximo nominal del árido grueso mm (pulg).							
	9.5 mm (3/8")	12.5 mm (1/2")	19 mm (3/4")	25 mm (1")	37.5 mm (1 1/2")	50 mm (2")	75 mm (3")	150 mm (6")
<b>Hormigón no aireado</b>								
25 a 50 (1 a 2)	207 (350)	199 (335)	190 (315)	179 (300)	166 (275)	154 (260)	130 (220)	113 (190)
75 a 100 (3 a 4)	228 (385)	216 (365)	205 (340)	193 (325)	181 (300)	169 (285)	145 (245)	124 (210)
150 a 175 (6 a 7)	243 (410)	228 (385)	216 (360)	202 (340)	190 (315)	178 (300)	160 (270)	---
<b>Hormigón aireado</b>								
25 a 50 (1 a 2)	181 (305)	175 (295)	168 (280)	160 (270)	150 (250)	142 (240)	122 (205)	107 (180)
75 a 100 (3 a 4)	202 (340)	193 (325)	184 (305)	175 (295)	165 (275)	157 (265)	133 (225)	119 (200)
150 a 175 (6 a 7)	216 (365)	205 (345)	197 (325)	184 (310)	174 (290)	166 (280)	154 (260)	---

(Fuente: Materiales para Ingeniería Civil, 2009).

Finalmente, se consideró una cierta reducción en la cantidad de agua definida anteriormente, esta reducción se la estableció según el tipo de material grueso usado para el diseño de la mezcla de hormigón, los valores propuestos se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 7:** Reducción de contenido de agua según la forma del árido grueso.

Forma del árido	Reducción en el contenido de agua en kg/m <sup>3</sup> (lb/yd <sup>3</sup> )
Subangular	12 (20)
Grava con partículas trituradas	21 (35)
Grava redondeada	27 (45)

(Fuente: Materiales para Ingeniería Civil, 2009).

### 3.2.2 Elaboración de los especímenes.

Para este proceso se consideró las especificaciones presentadas en la normativa INEN 3124, en donde se establecen los requerimientos que deben cumplir tanto los materiales a usar en la mezcla de hormigón como la preparación de la misma y además el curado de los especímenes.



Es importante mencionar que los áridos que se emplearon para la elaboración de los elementos se encontraban en condición seca (humedad de 0%), es decir se secó al horno de manera previa a la mezcla.

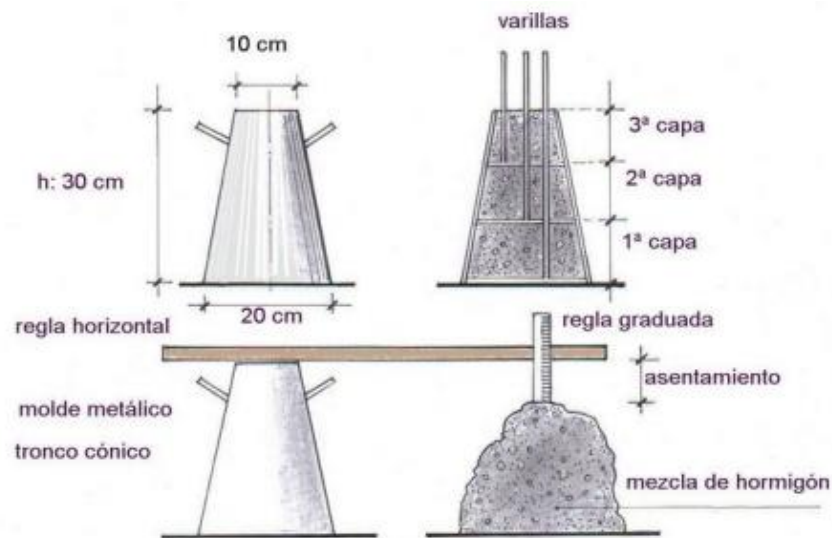
En primer lugar, la normativa dicta ciertas especificaciones con respecto a los equipos a emplearse para la elaboración de las muestras, en cuanto a los moldes para los especímenes, indica que deben ser de acero, hierro fundido o de otro material el cual no sea absorbente, con el fin de evitar la pérdida de agua de la mezcla; los moldes deben asegurar estanqueidad, además deben mantener sus dimensiones y forma bajo todas las condiciones para la cual está destinado. En el caso de los moldes cilíndricos que se emplearon para el proyecto son de acero los cuales cumplen con los requisitos especificados en la normativa ASTM C 470. Los moldes empleados para la elaboración de las vigas deben tener forma rectangular y sus superficies interiores deben ser lisas y libres de cualquier tipo de irregularidad a los lados, el fondo y los extremos deben formar ángulos rectos entre sí, de igual manera los moldes que se emplearon son de acero. En cuanto a los moldes utilizados para las losas fueron construidos de madera no absorbente con las dimensiones definidas de acuerdo a las características de la losa.

Otros equipos de los cuales se especifica ciertas características a cumplir son las varillas compactadoras las cuales deben tener ambos extremos redondeados. Complementariamente se emplearon ciertas herramientas pequeñas como: palas, baldes, cucharas, flexómetro, guantes de caucho.

Para el proceso de mezclado de los componentes del hormigón, se pesaron previamente cada uno de los mismos según el diseño ya definido, se colocó en la mezcladora el total del agregado grueso con la mitad de la cantidad de agua y se dejó mezclar durante 30 segundos, posteriormente, se colocó todo el agregado fino (arena) y el total de cemento con la cantidad restante de agua, se dejó mezclar durante 4 minutos hasta que se logró ver un masa constante, se detuvo el proceso de mezclado y se vertió todo el material en un recipiente.

Uno de las propiedades más importantes a considerar en el hormigón en estado fresco es la trabajabilidad o también denominado asentamiento del mismo ya que facilita el mezclado, transporte, colocación y compactación de la muestra evitando la segregación de los componentes de la misma (NTE INEN 1578), por lo tanto, con el material que se obtuvo al

finalizar el proceso de mezclado se comprobó la trabajabilidad de la mezcla a través del ensayo del cono de Abrams, para lo cual se procedió a colocar la muestra de hormigón por capas en el interior del molde cónico hasta llenarlo por completo, para la primera capa se colocó el hormigón hasta una tercera parte del cono y se compactó con 25 golpes mediante el uso de la varilla, para la segunda capa se realizó el mismo proceso, en cuanto a la tercera capa se llenó el cono hasta que el material rebosara, se compactó de igual manera que en las capas anteriores y se enrasó a nivel, es importante mencionar que para el proceso de compactación se debe asegurar que la varilla se encuentre de manera perpendicular a la base del cono, posteriormente se retiró el cono y se colocó de manera invertida a un lado de la muestra, se colocó la varilla de manera horizontal en la parte superior del cono invertido y se midió la distancia entre la parte central de la varilla y la parte superior de la muestra de hormigón, este valor obtenido es el que define la trabajabilidad de la muestra.



**Figura 11:** Esquema de ensayo de trabajabilidad (Fuente: *Materiales para Ingeniería Civil*, 2009).



**Figura 12:** Determinación de asentamiento de la mezcla de hormigón (Trabajabilidad).

Para definir la consistencia de la mezcla de hormigón en base al asentamiento obtenido se consideró las siguientes especificaciones:

**Tabla 8:** Consistencia del hormigón en base al asentamiento obtenido.

Consistencia de mezcla	Asentamiento (cm)
Seca	0-2
Plástica	3-5
Blanda	6-9
Fluida	10-15
Líquida	16-20

(Fuente: UNE-EN 12350-2)

Una vez que se obtuvo la trabajabilidad de la mezcla final, se procedió a colocar el hormigón en los moldes usando un cucharón, en cuanto al número de capas que se emplearon para la elaboración de los especímenes se consideraron las especificaciones presentadas en la siguiente tabla:

**Tabla 9:** Número de capas requeridas según el espécimen y tipo de consolidación.

Tipo y tamaño del espécimen.	Modo de consolidación.	Número de capas aproximadamente.
<b>Cilindros</b>		
<b>Diámetro, mm (pulg).</b>		
75 a 100 (3 o 4)	Varillado	2
150 (6)	Varillado	3
225 (9)	Varillado	4
Hasta 225 (9)	Vibrado	2



---

<b>Prismas y cilindros horizontales.</b>		
<b>Profundidad, mm (pulg).</b>		
hasta 200 (8)	Varillado	2
más de 200 (8)	Varillado	3 o más
hasta 200 (8)	Vibrado	1
Más de 200 (8)	Vibrado	2 o más

---

(Fuente: INEN 3124)

Por lo tanto, considerando la información presentada en la Tabla 9, el proceso compactación en el caso de los especímenes tipo cilindros se lo hizo mediante varillado y se emplearon dos capas, por otro lado para el caso de las vigas y losas de igual manera se empleó un proceso de compactación mediante varillado y se usaron dos capas para su elaboración, en cada capa se emplearon 25 golpes, cabe recalcar que después de varillar (compactar) cada una de las capas de los especímenes se procedió a golpear los alrededores de los moldes de 10 a 15 veces con el martillo de goma, esto con el fin de cerrar los vacíos provocados durante el proceso de varillado y eliminar las burbujas del aire en el interior de la mezcla.

### **3.3 Exposición de los elementos a distintos tipos de curado.**

#### **3.3.1 Curado en laboratorio siguiendo estándares de la normativa.**

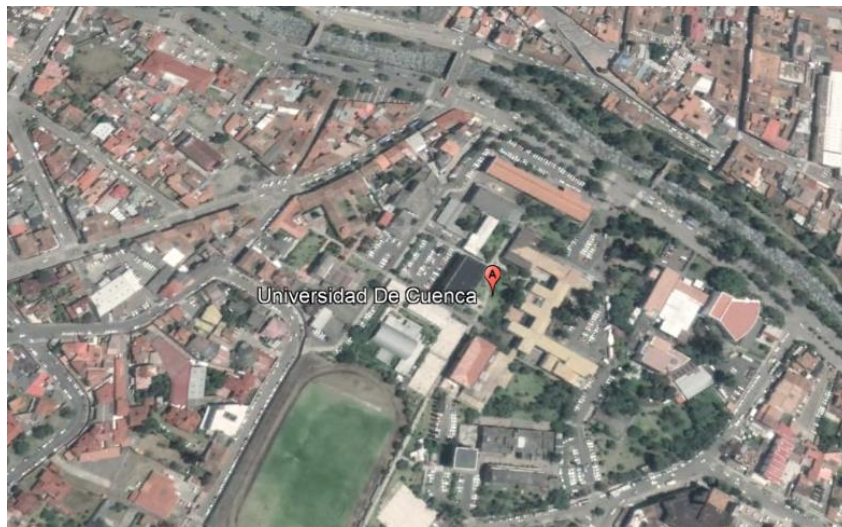
Para este proceso se siguieron las especificaciones establecidas en la normativa INEN 3124, en donde para el curado inicial del hormigón se proveen ciertas consideraciones para evitar la evaporación del agua de la mezcla de hormigón no endurecido, para lo cual se cubrieron inmediatamente los especímenes después del acabado (enrasado) con un material plástico no absorbente comprobando que no esté en contacto con la superficie fresca del hormigón.

Después de finalizado un período de  $24 \pm 8$  horas se procedió a retirar los moldes de los especímenes, posteriormente, se sumergieron por completo las muestras moldeados en un tanque con agua, durante este período de curado por sumersión se verificó que el tanque con agua tenga ciertas condiciones dictadas en la norma, en donde, los elementos a curar deben encontrarse en un ambiente de  $23 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  desde el momento en el que se hace el moldeo de los mismos hasta cuando se realicen los ensayos de resistencia.

Adicionalmente, con el fin de tener un proceso de curado eficiente, la INEN 3124 recomienda adicionar hidróxido de calcio (cal) en el tanque de curado ya que esto permite mantener las características de basicidad del agua usada.



*Figura 13: Curado de elementos en laboratorio (sumersión en agua con hidróxido de calcio).*



*Figura 14: Ubicación de la locación para el curado (Fuente: Google Earth).*

### **3.3.2 Curado de especímenes expuestos al viento.**

Para esta condición se consideró una locación en donde la altura sea considerable y con lo cual la velocidad del viento sea un factor que influya durante el curado de los elementos debido a que provoca una rápida evaporación del agua superficial del hormigón, para este caso se consideró que un lugar adecuado con este tipo de características, son las afueras de la parroquia rural de El Valle, el cual es un sector relativamente cerca de la ciudad y que se encuentra aproximadamente a 2635 msnm.





*Figura 15: Ubicación de la locación para el curado (Fuente: Google Earth).*



*Figura 16: Curado de elementos con exposición al viento de la zona.*

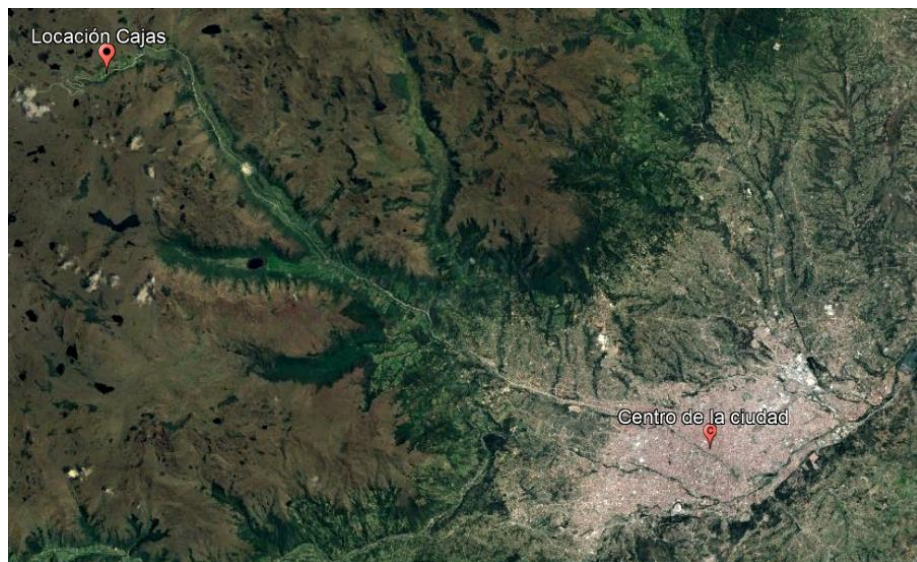
### 3.3.3 Curado de especímenes expuestos a bajas temperaturas-viento.

Para el caso de estudio del presente proyecto, en nuestro medio se consideró que una locación adecuada para realizar este tipo de análisis se encuentra en las afueras de la ciudad de Cuenca, específicamente en el Parque Nacional El Cajas, su altura latitudinal va desde 3152 msnm a 4445 msnm, la temperatura de dicha zona oscila entre  $-2^{\circ}\text{C}$  a  $18^{\circ}\text{C}$ , no existe una regularidad en el clima y se dan frecuentes heladas y lloviznas (garúa).

Después de haber desmoldado los especímenes se transportaron de manera inmediata a la locación (Cajas), posteriormente luego de haber transcurrido 7 días se llevaron de vuelta los primeros 3 especímenes al laboratorio de la Universidad de Cuenca para las pruebas respectivas, este proceso se lo realizó de igual manera con los demás elementos restantes a los 14 y 28 días respectivamente.



*Figura 17: Curado de elementos con exposición a bajas temperaturas.*



*Figura 18: Ubicación del Parque Nacional El Cajas (Fuente: Google Earth).*





### 3.3.4 Curado de especímenes en condiciones normales de temperatura mediante la aplicación de un curado (antisol).

Con este procedimiento lo que se buscó es representar las condiciones en las cuales elementos de hormigón en una obra cualquiera están sometidos a factores climáticos variables al estar expuestos al aire libre, los cuales pueden intervenir en el sitio en donde se está emplazando dicha obra, el proceso de curado se lo realizó mediante la aplicación de un aditivo curador en la superficie de los elementos.

Se usó un antisol blanco, la aplicación del mismo se lo realizó en base a las especificaciones técnicas proporcionadas por el proveedor del producto, para su aplicación se disolvió el aditivo en agua en una relación 1:3 (antisol:agua), y se procedió a rosear dicha solución en los especímenes verificando que todas las superficies del elemento queden cubiertas y lograr así tener un curado más eficiente.

La locación que se consideró para realizar este procedimiento de curado está ubicada al interior de la Universidad de Cuenca, en donde se dejaron los especímenes en una área abierta, de manera que estos se encuentren expuestos a los factores climáticos del medio, y al término de los periodos establecidos (7,14 y 28 días) se procedió a transportar a los elementos al laboratorio y realizar los ensayos pertinentes tanto no destructivos como ensayos de resistencia (destructivos) que se mencionan posteriormente.



*Figura 19: Ubicación de la locación para el análisis (Fuente: Google Earth).*

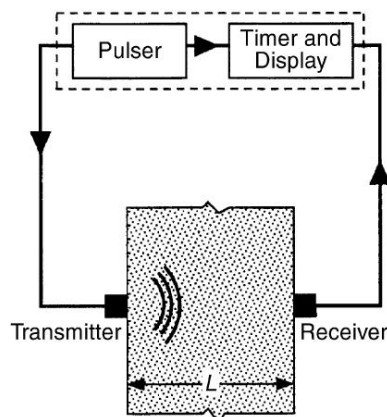


*Figura 20: Curado de elementos mediante la aplicación de Antisol blanco.*

### 3.4. Metodología de estudio de la calidad de hormigón a través de ensayos no destructivos

#### 3.4.1 Ensayos de ultrasonido.

El procedimiento que se siguió es el siguiente: en primer lugar, se aplicó una cierta cantidad de un agente de acople (gel) entre los extremos del transductor y las superficies del espécimen con el fin de evitar que exista aire entre las superficies, posteriormente se aseguró que se dé el contacto adecuado entre las superficies para reducir el porcentaje de error en las mediciones y finalmente, se realizó la medición (ver Figura 22).



*Figura 21: Esquema de generador de pulsos. (Fuente: C.Andrade, R D' Andrea, 2011).*



*Figura 22: Ensayo de ultrasonido aplicado a espécimen tipo cilindro.*

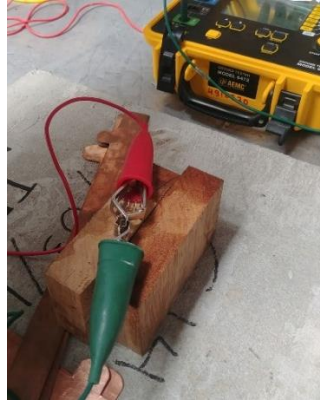
Una vez finalizados los ensayos, mediante las velocidades de onda obtenidas, se definió la condición del hormigón en base a la clasificación propuesta por Leslie y Cheesman, la cual se presentada a continuación:

*Tabla 10: Condición de hormigón según Leslie y Chessman en base a la velocidad de onda.*

<b>Velocidad de onda (m/s)</b>	<b>Condición del hormigón</b>
Más de 4570	Excelente
De 3650 a 4570	Buena
De 3050 a 3650	Regular
De 2130 a 3050	Pobre
Menos de 2130	Muy Pobre

### 3.4.2 Ensayos de resistividad eléctrica

Antes de realizar las mediciones en los elementos se calibró el equipo, ya que caso contrario los valores obtenidos del ensayo tendrían un cierto de margen de error en la medición, para calibrar el equipo se conectaron los electrodos mutuamente y se pasó corriente por los mismos (ver Figura 23).



*Figura 23: Calibración del equipo previo al ensayo.*

El ensayo se efectuó mediante el uso del equipo disponible en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad de Cuenca, para la medición se aplicó el método directo, en el cual se utilizaron placas de cobre con la forma de la sección transversal de cada uno de los elementos, dichas placas se colocaron en los extremos opuestos de cada uno de los especímenes para evitar que exista la presencia de aire y reducir el error en la medición, se utilizó un agente de acople (gel) entre la placa de cobre y la superficie del elemento, una vez colocadas las placas fijamente se conectaron los electrodos, y se procedió a realizar la medición con lo cual se obtuvo un valor de resistencia eléctrica, debido a la falta de disponibilidad tanto del equipo, como del personal encargado del manejo del mismo, se decidió aplicar el ensayo de resistividad eléctrica a los elementos únicamente a los 28 días de curado, se realizaron dos mediciones en cada elemento y poder así verificar el valor de resistencia obtenido, una vez que se obtuvieron dichos valores se realizó un promedio entre los mismos y se determinó la resistividad eléctrica de los especímenes mediante la ecuación que se presenta a continuación:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{l}$$

*Ecuación 19: Resistividad eléctrica.*

En donde:

R= Resistencia eléctrica (k $\Omega$ )

$\rho$  = Resistividad eléctrica (k $\Omega$ .cm)

l = Distancia entre electrodos (cm)

A= Sección transversal del elemento (cm<sup>2</sup>)





*Figura 24: Ensayo de resistividad eléctrica en especímenes.*

### **3.5 Metodología de estudio de las propiedades en hormigón endurecido.**

#### **3.5.1 Ensayo de resistencia a compresión en cilindros de hormigón.**

La resistencia a compresión no es una propiedad intrínseca del hormigón, es decir los resultados obtenidos pueden variar según ciertos parámetros: según el tamaño y de la forma del espécimen, de los agregados minerales, de la dosificación usada para el diseño, del proceso de elaboración, del moldeado de los elementos, de la temperatura y condiciones durante el curado.



*Figura 25: Especímen sometido a ensayo de resistencia a compresión.*

La velocidad de aplicación de la carga axial para los ensayos a compresión es de 0.25 Mpa/s (dada en normativa), para el cálculo de la resistencia a compresión se divide la carga máxima alcanzada al finalizar el ensayo para el área de la sección transversal del cilindro.



*Figura 26: Tipo de falla en cilindros.*

### **3.5.2 Ensayo a flexión en especímenes tipo viga y losa.**

Es importante mencionar que, en el caso de las losas de hormigón al no contar con el equipo necesario en el laboratorio para realizar los ensayos de resistencia, en el presente proyecto se decidió determinar la resistencia a flexión de las losas empleando el mismo proceso del ensayo de las vigas, para las losas de hormigón el ensayo no se realizó en el mismo equipo en donde se ensayaron los cilindros y vigas, esto debido que las dimensiones de la losa eran más grandes.

Para realizar el ensayo en laboratorio a los elementos, en el caso las vigas se aplicó la carga a una velocidad constante de 1.20 Mpa/min, sin embargo, en el caso de las losas debido a que no se ensayaron con un equipo totalmente automatizado, la carga se aplicó de manera manual a través de una palanca de control.



*Figura 27: Ensayo a flexión en espécimen tipo viga.*



*Figura 28: Ensayo a flexión en espécimen tipo losa.*

Después de que se dio la rotura del elemento, se procedió a determinar las dimensiones de la sección transversal en donde se produjo la falla, dicho valor se utilizó para el cálculo del módulo de rotura, se tomaron medidas en una de las caras fracturadas (ancho y altura) y se realizó un promedio de las medidas obtenidas, es importante mencionar que una vez finalizado los ensayos de resistencia tanto en vigas como losas la falla se produjo en el tercio medio de la luz libre, por lo que se determinó la resistencia a flexión o módulo de rotura de todas las vigas y losas a través de la ecuación 1.



*Figura 29: Tipo de falla en vigas.*



*Figura 30: Tipo de falla en losas.*



## CAPÍTULO IV - RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 Caracterización de agregados

#### 4.1.1 Granulometría y módulo de finura.

En la Figura 31, se presenta la distribución granulométrica del agregado grueso obtenida en el ensayo, la curva se encuentra dentro de los límites establecidos en la normativa ASTM C33, siendo el tamaño máximo nominal 3/4.

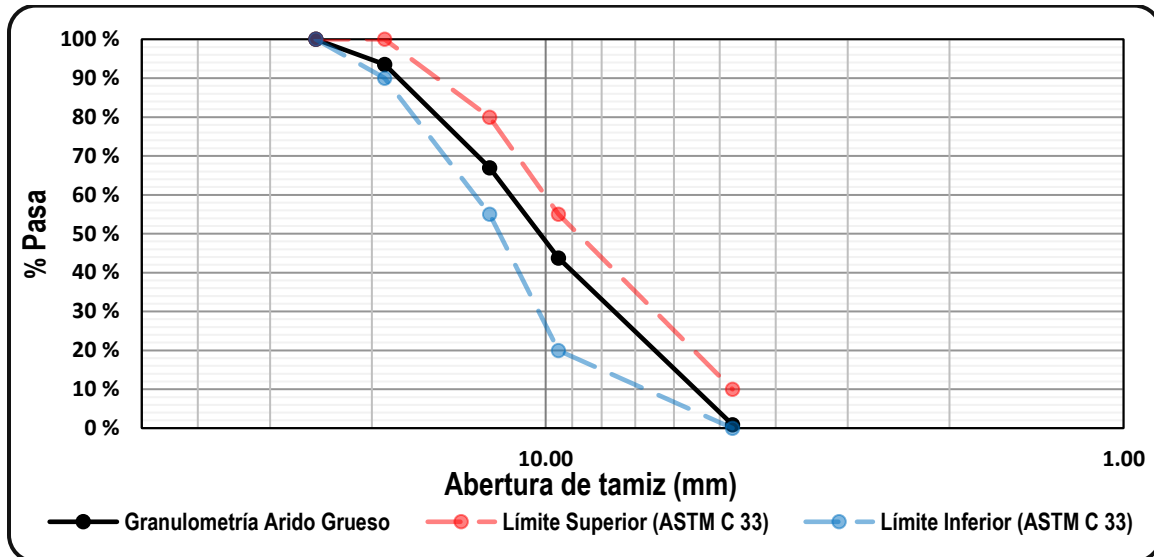


Figura 31: Curva granulométrica de agregado grueso.

Al igual que el agregado grueso, la curva granulométrica del agregado fino cumple con los límites especificados en la normativa ASTM C33 (ver Figura 32).

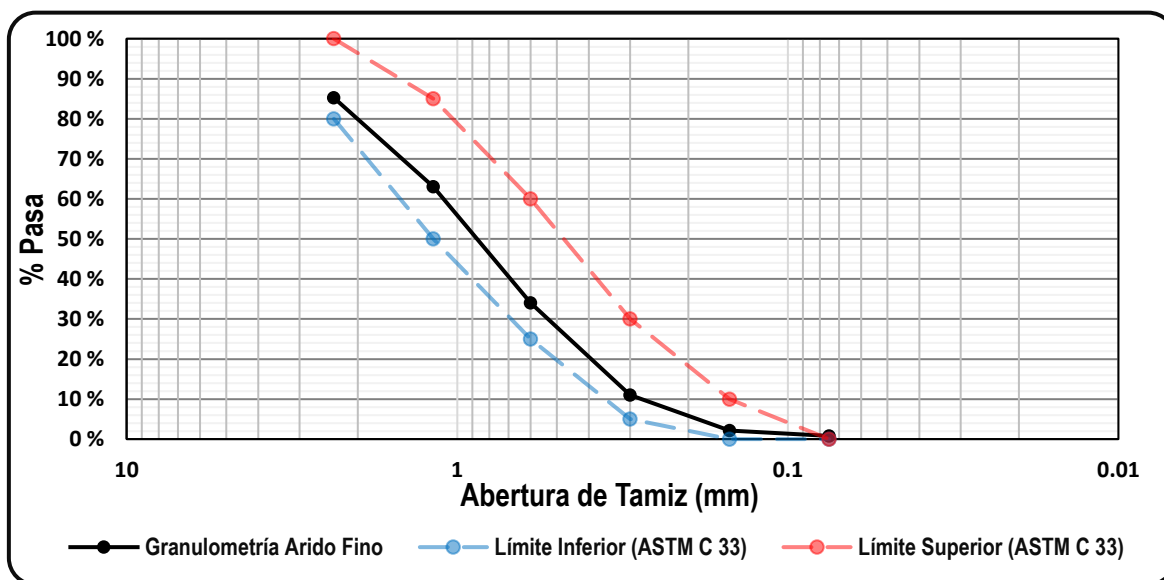


Figura 32: Curva granulométrica de agregado fino.



Según Gutiérrez Libia en 2003, las arenas se pueden clasificar según su módulo de finura en:

- Arenas finas: 0.5 – 1.5.
- Arenas medias: 1.5 – 2.5
- Arenas gruesas 2.5 – 3.5

El módulo de finura del agregado fino fue 3.04, por lo tanto, según la clasificación mostrada anteriormente, el material corresponde a una arena gruesa.

#### 4.1.2 Densidad, absorción y masa unitaria.

A través de las ecuaciones presentadas en el numeral 3.1.2, los resultados obtenidos tanto para agregado grueso y agregado fino se presentan de manera resumida en la Tabla 11 y Tabla 12, respectivamente. La masa unitaria se obtiene únicamente en el agregado grueso; el valor obtenido en el ensayo fue de 1604.46 kg.

*Tabla 11: Resultados de densidad, absorción y masa unitaria obtenidos para árido grueso.*

Descripción	Resultado
Densidad relativa (SH)	2.55
Densidad relativa (SSS)	2.61
Densidad relativa aparente (SSS)	2.72
Densidad (SH), [kg/m <sup>3</sup> ]	2544.87
Densidad (SSS), [kg/m <sup>3</sup> ]	2606.09
Densidad aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	2711.29
Absorción (%)	2.41

*Tabla 12: Resultados de densidad y absorción obtenidos para árido fino.*

Descripción	Resultado
Densidad relativa (SH)	2.49
Densidad relativa (SSS)	2.56
Densidad relativa aparente (SSS)	2.67
Densidad (SH), (kg/m <sup>3</sup> )	2482.53
Densidad (SSS), (kg/m <sup>3</sup> )	2549.85
Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2662.19
Absorción (%)	3.01

Según Kosmatka H., el valor de masa unitaria del agregado grueso que comúnmente se usa para un hormigón de peso normal se encuentra entre 1200 a 1750 kg/m<sup>3</sup>, además que la



mayoría de los agregados naturales tienen densidades entre 2400 a 2900 kg/m<sup>3</sup>, por lo tanto, los agregados empleados son adecuados para la elaboración de los especímenes de hormigón.

Además, acota que la absorción para el agregado grueso varía en un rango de 0.5% a 2% y para el agregado fino entre 2% a 6%. El agregado fino se encuentra dentro de los límites especificados, mientras que la absorción del agregado grueso sobrepasa el 2%, lo cual se consideró en el diseño de la dosificación final.

## 4.2 Diseño y elaboración de elementos de hormigón.

### 4.2.1 Diseño de la mezcla de hormigón.

La relación a/c utilizada en la dosificación de hormigón fue de 0.51, en la tabla 13 se presenta los pesos de los materiales utilizados por 1 m<sup>3</sup> de mezcla de hormigón.

*Tabla 13: Peso de componentes por 1 m<sup>3</sup> de mezcla de hormigón.*

Componente	Peso por 1 m <sup>3</sup> (kg)	Porcentaje (%)
Árido grueso	979	41.2
Árido fino	737	18.4
Agua	224	9.4
Cemento	439	31.0

### 4.2.2 Elaboración de los especímenes.

Después de verificar que los agregados minerales cumplan con los parámetros especificados tanto en la normativa como en las recomendaciones bibliográficas, y de obtener el diseño de la muestra patrón, se elaboró los 3 tipos de elementos de hormigón considerando un cierto porcentaje de desperdicios.

Se fundieron 12 muestras de cada elemento de hormigón, es decir 36 especímenes en total. El volumen de diseño y los pesos de los materiales utilizados para cada mezcla se muestran en las siguientes tablas:



*Tabla 14: Volumen considerado para cilindros.*

Elemento	Cantidad	Medidas de espécimen (cm)			Volumen	
Cilindros	12	$\varnothing = 10$	$h = 20$	20	0.0189	m <sup>3</sup>
				Desperdicio	25	%
				Volumen de diseño	0.0236	m <sup>3</sup>

*Tabla 15: Pesos de los materiales para los cilindros.*

Dosificación final para cilindros		
Grava	23.1	Kg
Cemento	10.3	Kg
Agua	5.3	kg
Arena	17.4	Kg

*Tabla 16: Volumen considerado para vigas.*

Elemento	Cantidad	Medidas de espécimen (cm)			Volumen	
Vigas	12	53	15	15	0.1458	m <sup>3</sup>
				Desperdicio	20	%
				Volumen de diseño	0.1750	m <sup>3</sup>

*Tabla 17: Pesos de los materiales para las vigas.*

Dosificación final para vigas		
Grava	171.2	Kg
Cemento	76.8	Kg
Agua	39.1	Kg
Arena	129.0	kg

*Tabla 18: Volumen considerado para losas.*

Elemento	Cantidad	Medidas de espécimen (cm)			Volumen	
Losas	12	50	50	2.5	0.075	m <sup>3</sup>
				Desperdicio	20	%
				Volumen de diseño	0.09	m <sup>3</sup>

*Tabla 19: Pesos de los materiales para losas.*

Dosificación final para losas		
Grava	88.1	Kg
Cemento	39.5	Kg
Agua	20.1	Kg
Arena	66.4	Kg



Como se puede observar en las tablas mostradas anteriormente el mayor volumen de diseño se presentó en las vigas, seguido de las losas y por último el de los cilindros.

El asentamiento que presentó la mezcla de hormigón fue de 11 cm (ver Figura 12), el cual según la Tabla 8 se designa como una consistencia fluida, la misma que facilitó el vertido del hormigón debido a su adecuada trabajabilidad.

#### 4.3 Exposición de los elementos a los distintos tipos de curado.

Para estudiar la influencia de ciertos parámetros hidrometeorológicos durante el proceso de curado de los distintos elementos, se utilizó los datos diarios registrados de estaciones cercanas a las locaciones definidas para el proceso de curado.

En las Tablas 20, 21 y 22 se muestra un resumen de la temperatura, velocidad del viento y humedad relativa, respectivamente, estos valores corresponden a los meses Febrero y Marzo del 2019 (ETAPA).

*Tabla 20: Temperatura. (Fuente: ETAPA)*

TEMPERATURA (°C)								
	Laboratorio		Obra		Exposición al viento		Exposición a bajas temperaturas	
	Febrero	Marzo	Febrero	Marzo	Febrero	Marzo	Febrero	Marzo
<b>Temperatura Máxima Registrada</b>	23		21	22	23	23	14	14
<b>Temperatura Diaria Máxima</b>	23		18	19	20	20	12	12
<b>Temperatura Diaria Promedio</b>	23		14	15	15	15	9	9
<b>Temperatura Diaria Mínima</b>	23		10	11	10	10	5	5
<b>Temperatura Mínima Registrada</b>	23		8	8	8	9	3	3



*Tabla 21: Velocidad del viento. (Fuente: ETAPA)*

<b>VELOCIDAD DEL VIENTO (km/h)</b>								
	<b>Laboratorio</b>		<b>Obra</b>		<b>Exposición a viento</b>		<b>Exposición a bajas temperaturas</b>	
	Febrero	Marzo	Febrero	Marzo	Febrero	Marzo	Febrero	Marzo
<b>Vel. Viento Máxima Registrada</b>	---		26	28	28	29	36	41
<b>Vel Viento Diaria Máxima</b>	---		20	18	22	21	27	28
<b>Vel. Viento Diaria Promedio</b>	---		10	10	12	11	20	21
<b>Vel. Viento Diaria Mínima</b>	---		1	2	2	2	14	15
<b>Vel. Viento Mínima Registrada</b>	---		0	1	0	1	4	5

*Tabla 22: Humedad relativa. (Fuente: ETAPA)*

<b>HUMEDAD RELATIVA (%)</b>								
	<b>Laboratorio</b>		<b>Obra</b>		<b>Valle</b>		<b>Cajas</b>	
	Febrero	Marzo	Febrero	Marzo	Febrero	Marzo	Febrero	Marzo
<b>H. Relativa Máxima Registrada</b>	100		100	100	100	100	100	100
<b>H. Relativa Diaria Máxima</b>	100		98	98	99	99	100	100
<b>H. Relativa Diaria Promedio</b>	100		78	77	79	78	89	87
<b>H. Relativa Diaria Mínima</b>	100		58	56	59	57	78	74
<b>H. Relativa Mínima Registrada</b>	100		49	46	47	48	63	58

Según los datos proporcionados por ETAPA las condiciones más desfavorables se presentaron en el Cajas, las bajas temperaturas y considerables velocidades de viento afectan de manera negativa al endurecimiento del hormigón, lo cual se ve reflejado en su resistencia final. Cuando se cura en laboratorio por sumersión la temperatura del agua fue de aproximadamente 23°C como lo especifica la norma.



## 4.4 Análisis de la calidad del hormigón a través de ensayos no destructivos.

### 4.4.1 Análisis mediante ensayos de ultrasonido.

En las tablas presentadas a continuación se muestran resultados cualitativos de la calidad del hormigón en base a las velocidades de onda obtenida en los ensayos de ultrasonido.

*Tabla 23: Condición del hormigón para especímenes curados en Laboratorio.*

<b>Espécimen</b>	<b>Días de curado</b>	<b>Velocidad de onda (m/s)</b>	<b>Condición del Hormigón</b>
Vigas	7	3814.55	Buena
	14	3989.19	Buena
	28	4158.00	Buena
Losas	7	3803.54	Buena
	14	3849.51	Buena
	28	3988.04	Buena
Cilindros	7	3812.03	Buena
	14	3863.76	Buena
	28	3909.13	Buena

*Tabla 24: Condición del hormigón para especímenes curados con antisol (obra).*

<b>Espécimen</b>	<b>Días de curado</b>	<b>Velocidad de onda (m/s)</b>	<b>Condición del Hormigón</b>
Vigas	7	3738.37	Buena
	14	3823.28	Buena
	28	4063.00	Buena
Losas	7	3751.06	Buena
	14	3796.24	Buena
	28	3943.83	Buena
Cilindros	7	3678.81	Buena
	14	3814.80	Buena
	28	3858.79	Buena



**Tabla 25:** Condición del hormigón para especímenes curados con exposición al viento.

Espécimen	Días de curado	Velocidad de onda (m/s)	Condición del Hormigón
Vigas	7	3594.31	Regular
	14	3705.09	Buena
	28	3887.00	Buena
Losas	7	3617.03	Regular
	14	3727.64	Buena
	28	3873.97	Buena
Cilindros	7	3562.98	Regular
	14	3785.58	Buena
	28	3850.99	Buena

**Tabla 26:** Condición del hormigón para especímenes curados con exposición a bajas temperaturas-viento.

Espécimen	Días de curado	Velocidad de onda (m/s)	Condición del Hormigón
Vigas	7	3496.17	Regular
	14	3644.14	Regular
	28	3794.00	Buena
Losas	7	3479.00	Regular
	14	3569.72	Regular
	28	3701.40	Buena
Cilindros	7	3396.97	Regular
	14	3773.42	Regular
	28	3810.66	Regular

Según Leslie y Cheesman un elemento de hormigón se encuentra en una “condición buena” siempre y cuando la velocidad de onda se encuentre en un rango de 3650 a 4570 m/s, valores inferiores a 3650 m/s definen una “condición regular” del hormigón.

Con los datos obtenidos se puede observar que tanto los especímenes curados con antisol y los curados por sumersión en laboratorio califican como “condición buena”, mientras que en los elementos curados en condiciones de exposición al viento y bajas temperaturas-viento se presenta una “condición regular” de calidad en los primeros días, los cuales son los más críticos en el endurecimiento del hormigón.



#### 4.4.2 Análisis mediante ensayos de resistividad eléctrica.

En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos de resistividad eléctrica únicamente a los 28 días de curado, debido a la limitada disponibilidad de la máquina con la que se ensayó los elementos.

*Tabla 27: Resultados de resistividad eléctrica en elementos tipo cilindro.*

Tipo de curado	R (k $\Omega$ )	R (k $\Omega$ )	R promedio(k $\Omega$ )	A(cm <sup>2</sup> )	Resistividad eléctrica ( $\Omega$ .m)
Laboratorio	2.35	2.36	2.36	78.54	92.48
Obra	4.21	4.20	4.21	78.54	165.13
Exposición al viento	7.28	7.28	7.28	78.54	285.88
Exposición a bajas temperaturas-viento	5.88	5.73	5.81	78.54	227.96

*Tabla 28: Resultados de resistividad eléctrica en elemento tipo viga.*

Tipo de curado	R (k $\Omega$ )	R (k $\Omega$ )	R promedio(k $\Omega$ )	A(cm <sup>2</sup> )	Resistividad eléctrica ( $\Omega$ .m)
Laboratorio	1.79	1.79	1.79	225	75.99
Obra	2.41	2.43	2.42	225	102.74
Exposición al viento	4.03	4.03	4.03	225	171.08
Exposición a bajas temperaturas-viento	3.82	3.83	3.83	225	162.38

*Tabla 29: Resultados de resistividad eléctrica en elemento tipo losa.*

Tipo de curado	R (k $\Omega$ )	R (k $\Omega$ )	R promedio(k $\Omega$ )	A(cm <sup>2</sup> )	Resistividad eléctrica ( $\Omega$ .m)
Laboratorio	4.09	4.06	4.08	125	101.88
Obra	6.01	6.04	6.03	125	150.63
Exposición al viento	24.60	24.60	24.60	125	355.00
Exposición a bajas temperaturas - viento	13.50	13.30	13.40	125	335.00



Los valores de resistividad eléctrica aumentan según la condición más desfavorable de curado, esto se debe a la pérdida en el contenido de humedad que se genera cuando el curado no es eficiente, lo cual se corrobora con la teoría, que indica que este ensayo es inversamente proporcional al contenido de humedad, es decir a mayor humedad menor resistividad y viceversa.

#### 4.5 Análisis de propiedades en hormigón endurecido.

##### 4.5.1 Ensayo de resistencia a compresión en elementos tipo cilindro.

Analizando los resultados obtenidos en los ensayos a compresión en los cilindros, se aprecia la variabilidad que presentan los valores de resistencia según las condiciones a las que fueron expuestas. A los 7 días de curado existe una disminución del 12% en la resistencia de los cilindros expuestas a baja temperatura con relación a las curadas en laboratorio.

Notablemente, la mejor condición de curado se presentó cuando se siguió las especificaciones de la normativa, mientras que la afección más significativa se dio en los elementos expuestos a las diferentes condiciones del ambiente (temperatura y viento).

*Tabla 30: Resultados de ensayos a compresión es especímenes tipo cilindro.*

Tipo de curado	Días de curado	Resistencia a compresión, Kg/cm <sup>2</sup> (MPa)
Laboratorio	7	154 (15.4)
	14	195 (19.5)
	28	257 (25.7)
Obra	7	145 (14.5)
	14	184 (18.4)
	28	232 (23.2)
Exposición a viento	7	144 (14.4)
	14	176 (17.6)
	28	188 (18.8)
Exposición a bajas temperaturas-viento	7	135 (13.5)
	14	166 (16.6)
	28	178 (17.8)

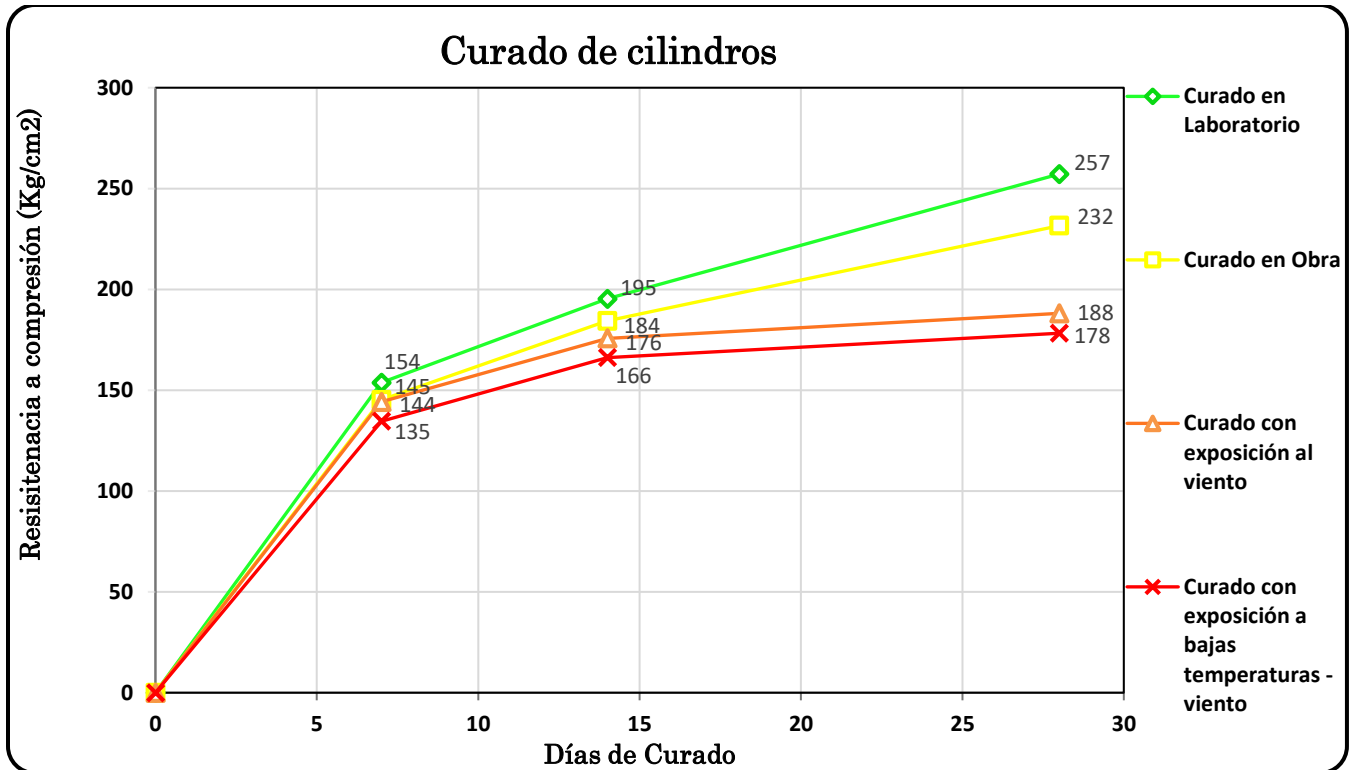


Figura 33: Resultados obtenidos en elementos tipo cilindro.

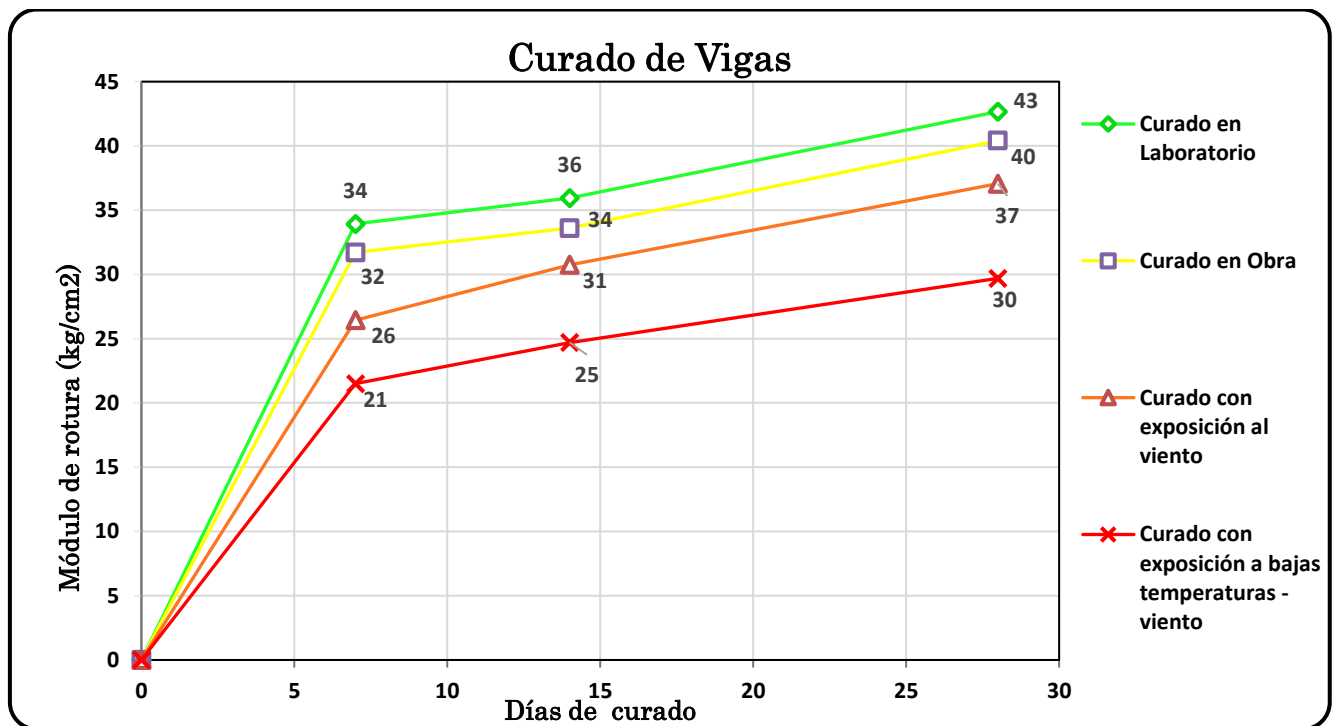
#### 4.5.2 Ensayo a flexión en elementos tipo viga y losa.

En los elementos tipo viga el módulo de rotura máximo a los 28 días fue de 42.67 kg/cm<sup>2</sup> cuando se curó por sumersión en laboratorio, lo cual indica que al igual que en los cilindros las resistencias mayores se presentaron en los elementos que se aplicó las especificaciones de la normativa.

El módulo de rotura alcanzando a los 28 días en los elementos expuestos a condiciones de baja temperatura fue de 29.7 kg/cm<sup>2</sup>, el cual es inferior al valor obtenido a los 7 días de curado (33.92 kg/cm<sup>2</sup>) en las condiciones de laboratorio. Por lo tanto, existió un microfisuramiento interno en los elementos provocando reducciones considerables en la resistencia del hormigón, esto se puede deber a las heladas presentadas en la zona de exposición.

*Tabla 3128: Resultados de ensayos a flexión en elementos tipo viga.*

Tipo de curado	Días de curado	Módulo de rotura, kg/cm2 (MPa)
Laboratorio	7	34 (3.4)
	14	36 (3.6)
	28	43 (4.3)
Obra	7	32 (3.2)
	14	34 (3.4)
	28	40 (4.0)
Exposición a Viento	7	26 (2.6)
	14	31 (3.1)
	28	37 (3.7)
Exposición a bajas temperaturas - viento	7	21 (2.1)
	14	25 (2.5)
	28	30 (3.0)

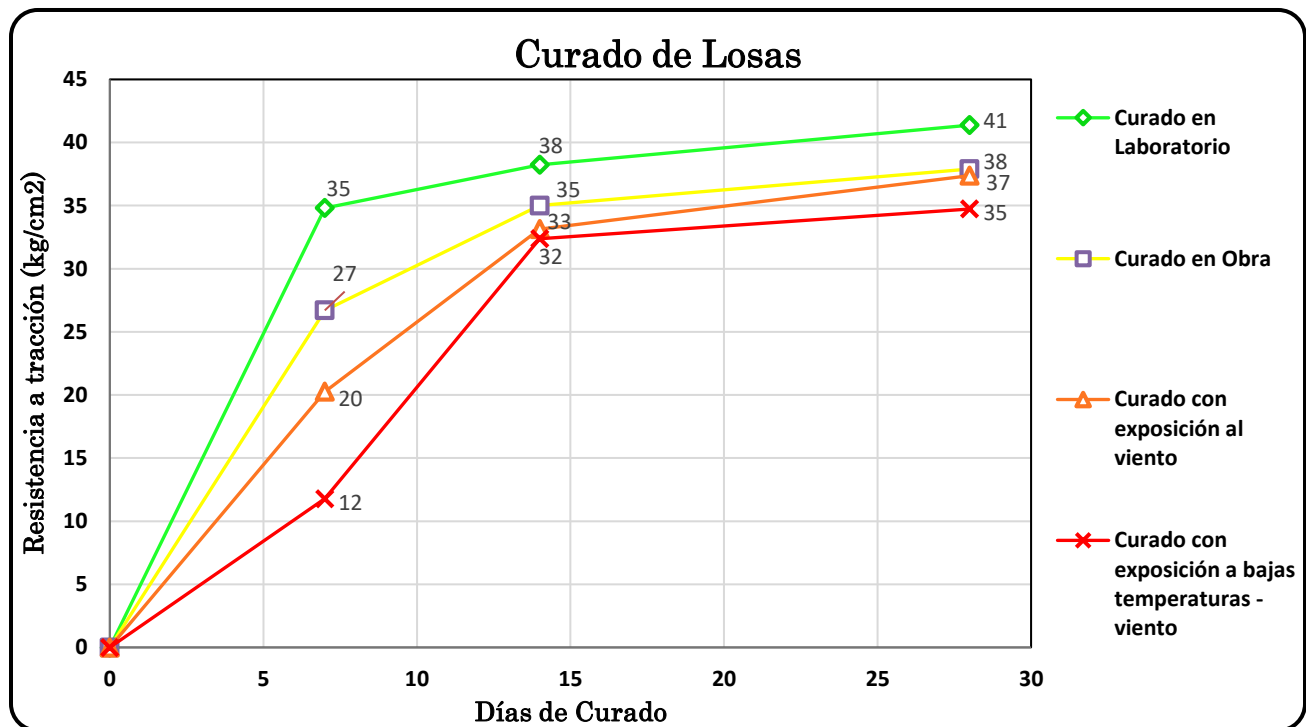


**Figura 34:** Resultados obtenidos en elementos tipo viga.

En los elementos tipo losa se presenta un valor erróneo a los 7 días de curado en las condiciones de baja temperatura debido a un inconveniente por parte del operador de la máquina en el momento del ensayo, sin embargo, los resultados obtenidos son similares a los de la viga en cuanto a la variación según las condiciones a las que fueron expuestas.

**Tabla 32:** Resultados de ensayos a flexión en especímenes tipo losa.

Tipo de curado	Días de curado	Módulo de rotura, kg/cm <sup>2</sup> (MPa)
Laboratorio	7	35 (3.5)
	14	38 (3.8)
	28	41 (4.1)
Obra	7	27 (2.7)
	14	35 (3.5)
	28	38 (3.8)
Exposición a Viento	7	20 (2.0)
	14	33 (3.3)
	28	37 (3.7)
Exposición a bajas temperaturas - viento	7	12 (1.2)
	14	32 (3.2)
	28	35 (3.5)



**Figura 35:** Resultados obtenidos en especímenes tipo losa.

Es importante mencionar que los elementos sometidos a ensayos a flexión son muy sensibles a la preparación, manipulación y procedimientos de curado, por lo que se necesita realizar una correlación con los ensayos a compresión para tener un indicador confiable de calidad en el hormigón.

#### 4.6 Correlaciones obtenidas

Con el fin de poder comparar la resistencia final de los 3 tipo de elementos de una misma condición de curado, se obtuvieron correlaciones entre la resistencia a compresión de los cilindros con el módulo de rotura de vigas y losas. A su vez, se indica los valores obtenidos con la Ecuación 3, la cual corresponde al apartado 19.2.3 de la norma ACI 318-14.

##### 4.6.1 Correlación de los elementos curados en laboratorio

En la Figura 36, se puede apreciar que los valores obtenidos en los ensayos son superiores a los de la normativa y siguen una tendencia muy similar, lo cual indica la eficiencia obtenida en el curado por sumersión.

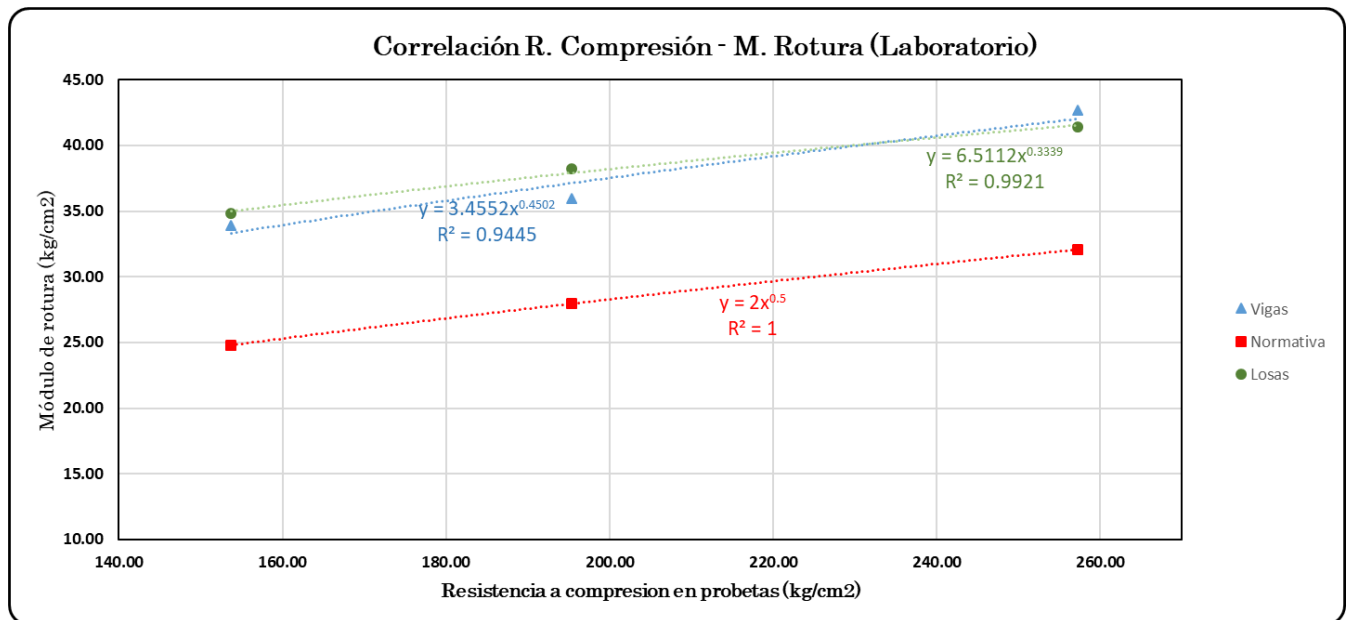


Figura 36: Correlación R. Compresión - M. Rotura (laboratorio).

#### 4.6.2 Correlación de los elementos curados con antisol

Los resultados obtenidos tanto de losas como de vigas cumplen con las especificaciones de la normativa, ya que presentan valores superiores, sin embargo, el R cuadrado de la ecuación de la línea de tendencia es menor al del curado por sumersión (ver Figura 37).

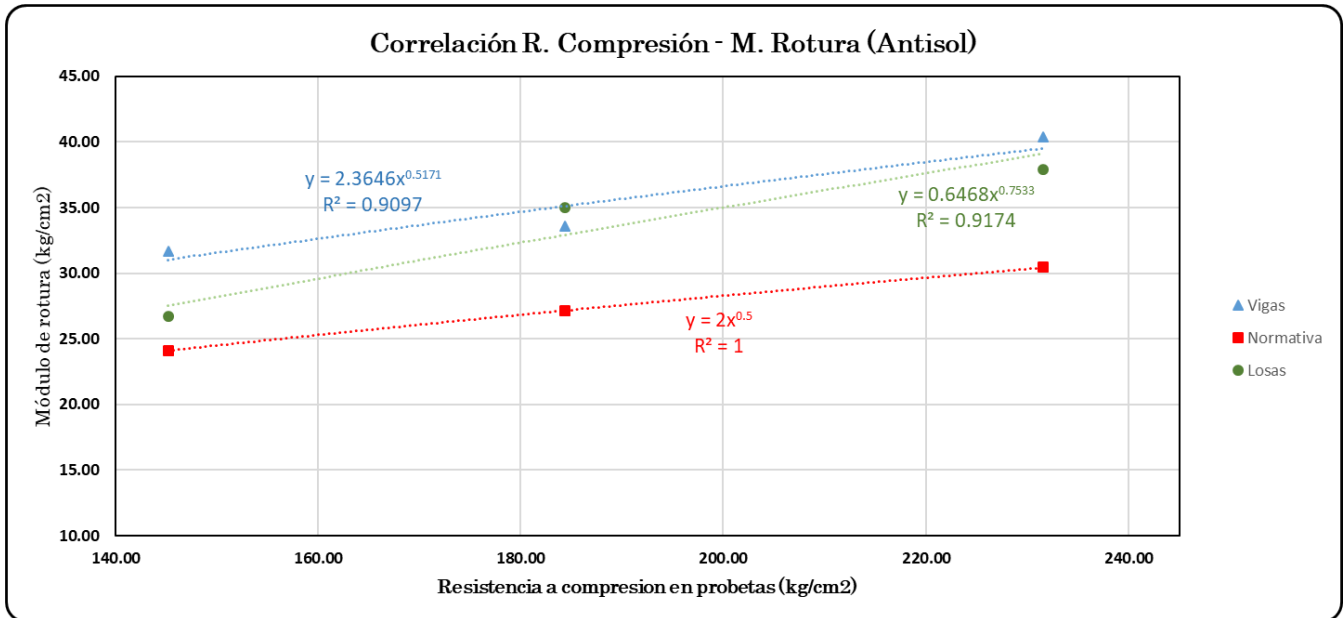


Figura 37: Correlación R. Compresión - M. Rotura (antisol).

#### 4.6.3 Correlación de los elementos curados en condiciones de viento

El primer valor correspondiente a las losas se encuentra por debajo de la normativa, esto se debe a las afecciones provocadas por las corrientes de viento en los primeros días de curado, como se dijo anteriormente, estos días son muy importantes en el hormigón para que se pueda desarrollar las propiedades deseadas.

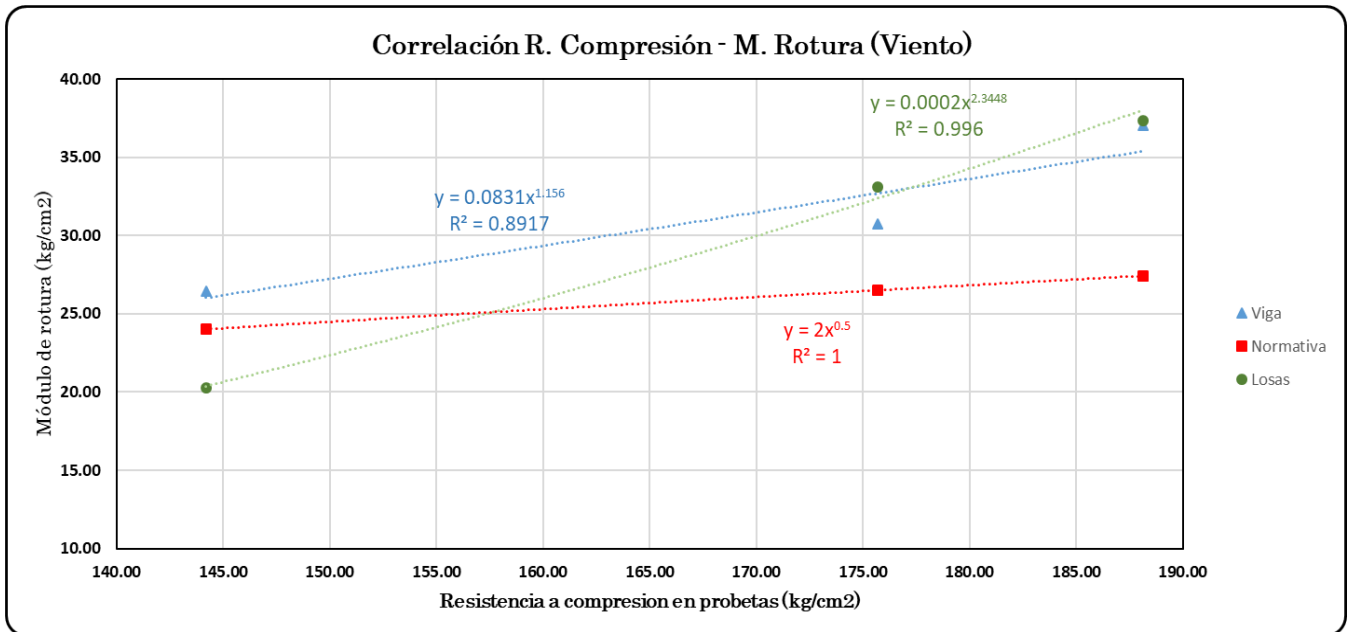


Figura 38: Correlación R. Compresión - M. Rotura (viento).

#### 4.6.4 Correlación de los elementos curados en condiciones de baja temperatura–viento.

En las vigas y losas el valor de resistencia correspondiente a los primeros 7 días de curado es inferior al calculado con la ecuación de la normativa, por lo tanto, se puede apreciar la afección que produce un ambiente de baja temperatura en el hormigón sino se le da un adecuado proceso de curado.

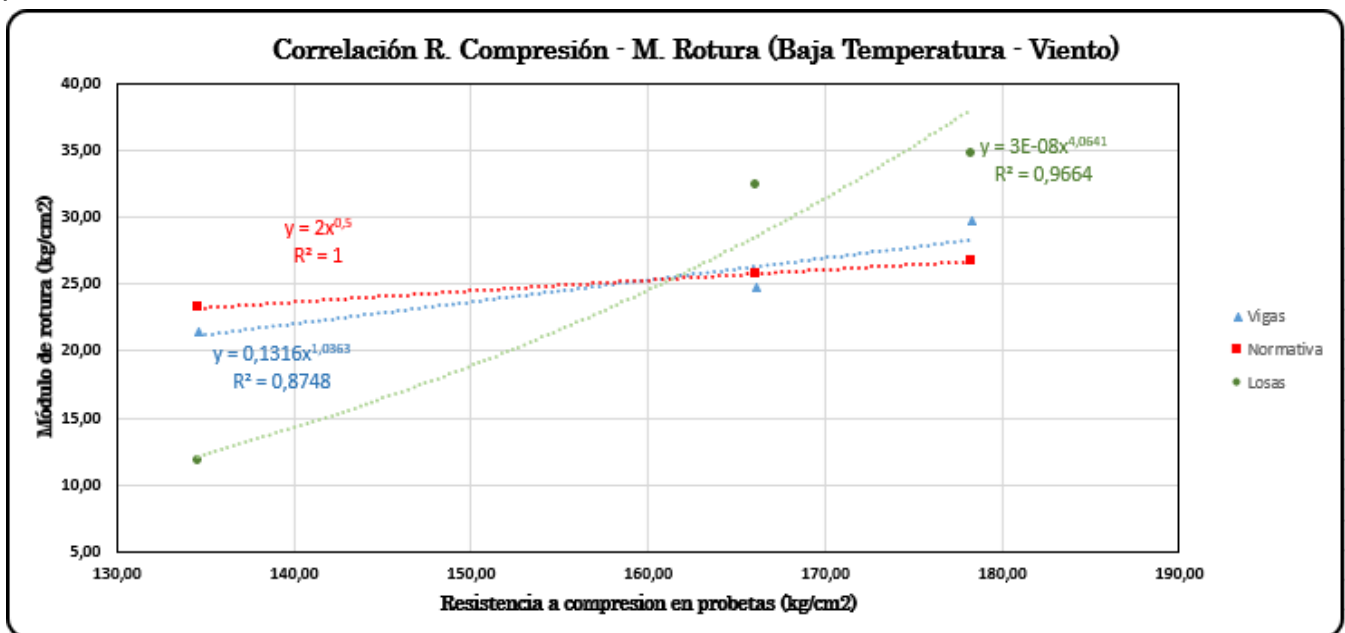


Figura 39: Correlación R. Compresión - M. Rotura (baja temperatura).





## CAPÍTULO V - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se analizó la influencia que tienen las diferentes condiciones de curado en la resistencia a compresión para los cilindros y en la resistencia a flexión para las vigas y losas, los valores analizados son los obtenidos a los 7, 14 y 28 días de curado.

La dosificación patrón utilizada cumplió con las normativas, tanto en el diseño final como en sus componentes (caracterización de los materiales) ya que cumplían con los parámetros recomendados en la bibliografía. Con la relación a/c de 0.51 se consiguió una consistencia fluida en la mezcla del hormigón.

**Con respecto a los cilindros de hormigón:** la resistencia a compresión obtenida en los elementos curados en el laboratorio (curado por sumersión) fue de 257 kg/cm<sup>2</sup>; en los curados con antisol (curado en obra) la resistencia se vio reducida en un 10%, mientras que en las condiciones con exposición al viento y condiciones de baja temperatura-viento se presentó una reducción del 27% y 31%, respectivamente.

**Con respecto a las vigas de hormigón:** la resistencia a flexión en vigas curadas en laboratorio fue de 43 kg/cm<sup>2</sup>, en las curadas con antisol se presentó una reducción del 5%, en las expuestas a condiciones de viento una reducción del 13% y en condiciones de bajas temperaturas-viento se presentó una reducción del 31%.

**Con respecto a las losas de hormigón:** la resistencia a flexión obtenida en laboratorio fue de 41 kg/cm<sup>2</sup>, en obra se presentó una reducción del 8%, en condiciones de viento una reducción del 10% y en condiciones de baja temperatura-viento una reducción del 16%.

En base a los resultados obtenidos se puede concluir que los especímenes curados con antisol tienen una variación de hasta un 10 % con respecto a los que se curaron en condiciones óptimas de laboratorio, esto se debe a las variaciones de la temperatura del medio al cual fueron expuestos (Cuenca, Ecuador); por lo que es importante considerar una técnica de curado más eficiente para cumplir con la resistencia de diseño.

En los resultados obtenidos tanto en los ensayos destructivos como no destructivos las mayores resistencias a los 28 días se obtuvieron en los elementos curados en base a la normativa, es



decir un curado por sumersión, esto se debe a que las especificaciones de la normativa (ASTM, INEN) proponen las condiciones óptimas de curado para lograr un hormigón con propiedades adecuadas y que puedan alcanzar la resistencia de diseño. Por otro lado, la condición más desfavorable se presentó en los elementos que fueron expuestos a bajas temperaturas-viento debido a las constantes heladas (temperaturas cercanas a 0°) y corrientes de viento presentadas en el medio.

Con los ensayos no destructivos se corroboró los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia; en base a las velocidades de pulso obtenidas y según la clasificación de Leslie y Cheesman, la calidad del hormigón tanto para los elementos curados en laboratorio y en obra fue buena, mientras que, para las condiciones de viento y bajas temperaturas-viento, la calidad del hormigón a los 7 y 14 días fue regular lo cual se ve reflejado en la resistencia final de los elementos.

Se sabe que la resistividad eléctrica está ligada al contenido de humedad; a menor humedad mayor es la resistividad, esto se comprueba con los valores obtenidos en los ensayos, ya que los elementos expuestos tanto en condiciones de viento como de baja temperatura-viento presentan valores significativamente mayores a los elementos curados en laboratorio y con el uso del antisol. Por lo tanto, se recalca la pérdida en el contenido de humedad de los elementos expuestos a las condiciones de viento y baja temperatura-viento, y a su vez, esto se aprecia en la reducción de la resistencia obtenida en los ensayos destructivos.

Con los ajustes obtenidos de las correlaciones, el módulo de rotura en vigas y losas corresponde a valores entre 16% y 22% aproximadamente de la resistencia a compresión de los cilindros, en el caso de los procesos de curado en laboratorio y con antisol (obra) la normativa resultó ser conservadora debido a que los resultados analizados están por arriba de los obtenidos con la ecuación que indica la normativa.

Con los resultados obtenidos en el presente proyecto se puede apreciar de manera significativa la importancia de considerar un exhaustivo proceso de curado, más aún si las condiciones climáticas del medio repercuten de manera drástica en las propiedades físico-mecánicas del hormigón. Cuando existen fuerte corrientes de viento la importancia del curado del hormigón es



muy crítica debido a que esta condición medio ambiental afecta significativamente a la resistencia final del hormigón.

Es importante mencionar que la resistencia final del hormigón está relacionada directamente con la durabilidad, es decir si la resistencia del hormigón no es la requerida, se produce fisuras o grietas a corto plazo que afectan a su permeabilidad, permitiendo el paso de sustancias no deseadas las cuales producen daños a nivel de microestructura y a su vez repercuten en el desempeño de la obra y en su durabilidad.

En toda obra de hormigón se debería extraer núcleos que corroboren la resistencia de diseño, ya que los cilindros de hormigón que se utilizan como control de calidad, no necesariamente son parámetros de aceptación que verifiquen la resistencia final del hormigón, debido a que el curado de los cilindros (sumersión en laboratorio) no se encuentra en las mismas condiciones que el curado aplicado a la estructura en la obra.

Se recomienda emplear ensayos no destructivos en el hormigón para tener una idea de la condición en la que se encuentran los elementos sin causar daños físicos en su estructura.



## BIBLIOGRAFÍA

Neville A.M., Brooks J.J. (2010). *Concrete technology, 2<sup>nd</sup> edition*.

Anders Ole S. S., et al. (2010). *Observations on the electrical resistivity of steel fibre reinforced concrete. Materials and Structures*.

Shuman, G. (1928). *Effect of curing time on strength gain of concrete*.

Mamlouk M.S., Zaniewski J.P. (2009). *Materiales para ingeniería civil, 2da edición*.

Ignatius o. Omuh, et al. (2018). *Data on mixing curing methods effects on the compressive strength of concrete. Ota-Nigeria*.

Mather B. (2004) *Concrete durability, Cement and Concrete Composites*.

Libia G. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Manizales-Colombia

Zabaleta H. (1992). *Compendio de tecnología del concreto*.

Torroja E. (2009). *La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y su durabilidad*.

Asocreto (2010). *Tecnología del Concreto. Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas*. Colombia

Palomo. A., et al. (2000) *Modificaciones microestructurales del cemento hidratado por curado del hormigón en periodos estivales*.

Kosmatka E., et al. (2004) *Diseño y control de mezclas de concreto*.

Gokce, A., et al. (2004). Freezing and thawing resistance of air –entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete.

M. S. Gómez, V. A. Sergio. (2006). *Influencia en la Resistencia a Compresión de Hormigones por efecto de la Temperatura Ambiente*. Santiago-Chile.

Ghaida Al-Assadi, et al. (2009). *Influencia de las condiciones de curado en el comportamiento del hormigón sometido a ciclos de hielo y deshielo*. Madrid-España.



L. Garín, et al. (2012). *Influencia del curado en la resistencia a compresión del hormigón: estudio experimental*. Montevideo-Uruguay.

J. C. Cuellar, W. Sequeiros. (2017). *Influencia del curado en la resistencia a compresión del concreto preparado con cemento tipo portland tipo I y cemento puzolánico tipo IP en la ciudad de Abancay-Apurimac*. Abancay – Perú.

R. Solís, E. I. Moreno. (2005). *Influencia del curado húmedo en la resistencia final a compresión del concreto en clima cálido subhúmedo*. Mérida-México.

V. L. Bonavetti, et al. (2005). *Influencia del Curado Inicial sobre las Propiedades de Hormigones con Cementos Compuestos*. Santiago- Chile.

C. Andrade, R. D´ Andrea. (2011). *La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad*. CISDEM (CSIC – UPM) –España.

CSA A23.1-09. (2009). *Concrete Materials and Methods of Concrete Constructions, Canadian Standards Association International*.

P. P. Barriga, (2007). *Tecnología del concreto de alto desempeño*. Arequipa-Colombia.

National Ready Mixed Concrete Association

INEN 695, (2010). *Áridos. Muestreo*. Quito- Ecuador.

INEN 696, (2011). *Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso*. Quito-Ecuador.

INEN 856, (2010). *Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino*. Quito-Ecuador.

INEN 857, (2010). *Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso*. Quito-Ecuador.

INEN 573, (2010). *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico*. Quito-Ecuador.

INEN 2554, (2011). *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la flexión del hormigón. (Utilizando una viga simple apoyada con carga en los tercios)*. Quito-Ecuador.



INEN 3124, (2017). *Hormigón. Elaboración y curado de especímenes de ensayo en el laboratorio*. Quito-Ecuador.

INEN 576, (2011). *Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo*. Quito-Ecuador.

INEN 694, (2010). *Hormigón y áridos para elaborar hormigón. Terminología*. Quito-Ecuador.

ASTM C29, (2003). *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. West Conshohocken-United States.

ASTM C31, (2003). *Standard practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. West Conshohocken-United States.

ASTM C33, (2003). *Standard Specification for Concrete aggregates*. West Conshohocken-United States.

ASTM C39, (2003). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken-United States.

ASTM C70, (2001). *Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate*. West Conshohocken-United States.

ASTM C94, (2004). *Standard Specification for Ready-Mixed Concrete*. West Conshohocken-United States.

ASTM C117, (2003). *Standard Test Method for Materials Finer than 75  $\mu$ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*. West Conshohocken-United States.

ASTM C597, (2002). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. West Conshohocken-United States.

ASTM C684, (2003). *Standard Test Method for Making, Accelerated Curing, and Testing Concrete Compression Test Specimens*. West Conshohocken-United States.

ASTM C136, (2001). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. West Conshohocken-United States.



ASTM C143, (2003). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. West Conshohocken-United States.

ASTM C156, (2003). *Standard Test Water Retention by Concrete Curing Materials*. West Conshohocken-United States.

ASTM C29, (2003). *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. West Conshohocken-United States.

## ANEXOS

## ANEXO 1

Tabla 33: Masa mínima requerida para ensayo de densidad y absorción de árido grueso.

Tamaño máximo nominal de las partículas del árido (mm).	Masa mínima de la muestra de ensayo (kg).
13.2 o menos	2
19	3
26.5	4
37.5	5
53	8
63	12
75	18
90	25

Tabla 34: Distribución granulométrica de árido grueso.

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
1 "	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4 "	19.00	321.80	321.80	6.44	6.44	93.56
1/2 "	12.50	1331.80	1653.60	26.64	33.07	66.93
3/8 "	9.50	1159.90	2813.5	23.20	56.27	43.73
#4	4.75	2141.00	4954.5	42.82	99.09	0.91
Fondo	0.00	45.30	4999.8	0.91	100	0.00

Tabla 35: Distribución granulométrica de árido fino.

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
#8	2.36	73.20	73.20	14.76	14.76	85.24
#16	1.18	111.10	184.30	22.22	35.98	63.02
#30	0.60	144.80	329.10	28.96	65.94	34.06
#50	0.30	115.40	444.50	23.08	89.02	10.98
#100	0.15	44.10	488.60	8.82	97.84	2.16
#200	0.075	6.80	495.40	1.36	99.20	0.80
Fondo	0.00	0.50	495.90	0.10	99.30	0.70





## ANEXO 2

Tabla 36: Parámetros de diseño para 1 m<sup>3</sup> de mezcla.

<b>Requisitos de resistencia <math>f'c= 240 \text{ kg/cm}^2</math></b>	
Hormigón no aireado	
Relación a/c	0.51
Módulo de finura de arena	3.04
TMN de árido grueso (pulg.)	3/4
Volumen de árido grueso compactado	0.61
Densidad de árido grueso (kg/m <sup>3</sup> )	2544.87
Absorción de árido grueso (%)	2.41
Masa unitaria (Kg)	1604.46
Árido grueso por m <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	978.721
Contenido de aire (%)	2
Asentamiento (cm)	7.5
Agua para mezcla (kg/m <sup>3</sup> )	205
Reducción por forma de árido (Grava redondeada) (kg/m <sup>3</sup> )	27
Agua considerada para diseño de la mezcla (kg/m <sup>3</sup> )	178
Cemento calculado (kg/m <sup>3</sup> )	349
Densidad del cemento (kg/m <sup>3</sup> )	2900
Densidad de arena (kg/m <sup>3</sup> )	2482.53
Absorción de arena (%)	3.01

Tabla 37: Volumen de componentes para 1 m<sup>3</sup> de mezcla de hormigón.

<b>Descripción</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
Volumen de aire	0.02
Volumen de agua	0.178
Volumen de cemento	0.120
Volumen de árido grueso	0.385
Volumen de arena	0.297

### ANEXO 3

#### Mezclado del hormigón



*Figura 40. Mezclado del hormigón.*

## ANEXO 4

### Elementos elaborados



*Figura 41. Elementos elaborados de hormigón.*