

**INFLUENCIA DEL CURADO INTERNO EN LA RESISTENCIA A LA
COMPRESIÓN Y LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CONCRETO LIGERO
USANDO COMO AGREGADO GRUESO LA PIEDRA PÓMEZ**

**ACERO SÁNCHEZ GUSTAVO ADOLFO
QUEVEDO MORALES FREDY ALEJANDRO
VANEGAS BUITRAGO DIEGO FERNANDO**



**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2015**

**INFLUENCIA DEL CURADO INTERNO EN LA RESISTENCIA A LA
COMPRESIÓN Y LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CONCRETO LIGERO
USANDO COMO AGREGADO GRUESO LA PIEDRA PÓMEZ**

**ACERO SÁNCHEZ GUSTAVO ADOLFO
QUEVEDO MORALES FREDY ALEJANDRO
VANEGAS BUITRAGO DIEGO FERNANDO**

**Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil**

Asesor Disciplinar: Alfonso Amézquita Nieto, Ingeniero Civil

Asesor Metodológico: Olga Lucia Vanegas, Ingeniero Civil



**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
MAYO 04 DE 2015**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, 04 de mayo de 2015

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
2. ANTECEDENTES.....	19
3. JUSTIFICACIÓN.....	22
4. HIPÓTESIS.....	23
5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	24
5.1 OBJETIVO GENERAL.....	24
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
6. MARCOS REFERENCIALES	25
6.1 MARCO CONCEPTUAL.....	26
6.1.1 El concreto ligero	27
6.1.2 El fenómeno de curado interno	31
6.1.3 Resistencia a la compresión	38
6.1.4 La resistividad eléctrica.....	41
6.2 MAPA CONCEPTUAL.....	47
6.3 MARCO LEGAL	48

7. DISEÑO METODOLÓGICO.....	50
7.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	50
7.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN	50
7.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	50
7.3.1 Población y muestra	51
7.3.2 Constantes de la investigación	51
7.3.3 Variables de la investigación	51
7.3.4 Operación de las variables	52
7.3.5 Procedimiento experimental	52
7.4 FASES DE LA INVESTIGACIÓN.....	54
8. DESARROLLO DE FASES DE LA INVESTIGACIÓN.....	57
8.1 ELABORACIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO.....	57
8.1.1 Registro fotográfico de elaboración de probetas de concreto	58
8.2 EFECTOS DE CURADO INTERNO.....	60
8.2.1 Fase 1: efecto del curado interno en la resistencia a la compresión.....	60
8.2.2 Fase 2: Efecto del curado interno en la resistividad eléctrica	65
8.2.3 Fase 3: relación entre la resistencia a la compresión y resistividad eléctrica	92
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	94

9.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	94
9.1.1 Resistencia a la compresión a los 14 días	94
9.1.2 Resistencia a la compresión a los 28 días	95
9.1.3 Resistencia a la compresión a los 60 días	96
9.2 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	97
9.2.1 Resistividad eléctrica hasta la edad de 14 días	97
9.2.2 Resistividad eléctrica hasta la edad de 28 días	99
9.2.3 Resistividad eléctrica hasta la edad de 60 días	100
9.3 Resistencia a la compresión y resistividad eléctrica.....	104
10. CONCLUSIONES	106
11. RECOMENDACIONES	110
12. PRESUPUESTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	111
13. CRONOGRAMA	112
14. REFERENCIAS	113
15. ANEXOS	116

LISTADO DE FIGURAS

Fotografía 1. Concreto ligero, piedra pómez y curado interno. Tomada 27 de Febrero de 2015	25
Fotografía 2. Resistividad eléctrica y resistencia a la compresión. Tomada 26 de Marzo de 2015	25
Fotografía 3. Piedra pómez. Tomada 25 de Febrero de 2015	30
Figura 1. Poliestireno expandido (ICOPOR)	30
Figura 2. Virutas de madera	30
Figura 3. Arcilla expandida	30
Figura 4. Imagen pedúnculo en una imagen 100*100 μ m (a) y luego con aumento a 50*50 μ	35
Figura 5. Red tridimensional de capilares paralelos (derecha) a cubica simple de capilares cilíndricos de tamaño distribuido (izquierda)	35
Figura 6. Red percolativa. Las ramificaciones en gris corresponden a redes finitas (separadas), mientras que las negras corresponden a ramos infinitos a través del medio	36
Fotografía 4. Esquema para determinar la resistencia a la compresión del concreto. 26 de marzo de 2015	39
Fotografía 5. Falla de cilindro de concreto en prueba de resistencia a la compresión. 26 de marzo de 2015	40
Fotografía 6. Medición de la resistividad eléctrica del concreto por el método directo. 27 de febrero de 2015	42

Figura 7. Medición de la resistividad eléctrica del concreto por el método de las cuatro puntas. (a) Montaje, (b) Resistivímetro de cuatro puntas	43
Fotografía 7. Trituración de agregado grueso. Tomada 25 de Febrero de 2015 ..	58
Fotografía 8. Pesaje de muestra triturada para tamizar. Tomada 25 de febrero de 2015	58
Fotografía 9. Tamizado de muestra de material triturado. Tomado 25 de Febrero de 2015	58
Fotografía 10. Saturación de muestras de piedra pómez para probetas sometidas ha curado interno. Tomado 25 de febrero de 2015	58
Fotografía 11. Cantidades de piedra pómez saturada y cemento para 5 cilindros. Tomado 27 de Febrero de 2015	58
Fotografía 12. Mezcladora de concreto. Tomado 27 de Febrero de 2015	58
Fotografía 13. Preparación de mezcla en el trompo. Tomado 27 de Febrero de 2015	59
Fotografía 14. Mezcla de concreto con piedra pómez saturada. Tomado 27 de febrero de 2015	59
Fotografía 15. Realización de cilindros de concreto con piedra pómez saturada. Tomado 27 de Febrero de 2015	59
Fotografía 16. Probetas de concreto encofradas. Tomado 27 de febrero de 2015	59
Fotografía 17. Desencofrado de cilindros de concreto. Tomado 28 de Febrero de 2015	59

Fotografía 18. Marcación de cilindros de concreto. Tomado 28 de febrero de 2015	59
Fotografía 19. Grupos de probetas en sus diferentes condiciones de curado; curado convencional (lado izq.); curado interno bajo techo (centro) y curado interno expuesto al ambiente (lado der.). Tomada 28 de febrero de 2015	60
Fotografía 20. Medición de resistencia con multímetro marca TMC-80. Tomada 3 de Marzo de 2015	66
Fotografía 21. Muestra de 60 días expuestas a la lluvia. Tomada 6 de marzo de 2015	67
Fotografía 22. Muestra de 60 días expuestas al sol. Tomada 14 de marzo de 2015	67
Fotografía 23. Probetas a la edad de 49 días de edad, expuesta a curado convencional (izquierda), curado interno bajo techo (centro) y curado interno expuesto al ambiente (derecha). Tomada 16 de Abril de 2015	102
Fotografía 24. Muestras de piedra pómez. Tomada 16 de Marzo de 2015	116
Fotografía 25. Muestras de piedra pómez con agua. Tomada 16 de Marzo de 2015	116
Fotografía 26. Muestras de piedra pómez seca. Tomada 16 de Marzo de 2015	118

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Principales agregados usados en el concreto ligero	30
Tabla 2. Especificaciones técnicas para el concreto ligero	31
Tabla 3. Criterios para interpretar las medidas de resistividad	45
Tabla 4. Fases de la investigación	54
Tabla 5. Formato para registro de datos de resistencia a la compresión	55
Tabla 6. Formato para registro de datos de resistividad eléctrica	56
Tabla 7. Cantidad en gramos para elaboración de 5 probetas de concreto	57
Tabla 8. Densidad aparente del concreto ligero	58
Tabla 9. Valores de resistencia a la compresión obtenidos en cada condición de curado a la edad de 14 días	60
Tabla 10. Valores de resistencia a la compresión obtenidos en cada condición de curado a la edad de 28 días	61
Tabla 11. Resistencia a la compresión a los 60 días de edad	62
Tabla 12. Resumen de valores de resistencia a la compresión obtenidos hasta los 60 días de edad	64
Tabla 13. Resistencia a la compresión promedio a los 14, 8 y 60 días de edad encada condición de curado	64
Tabla 14. Porcentaje de ganancia de resistencia a la compresión del grupo sometido	

a las condiciones de curado interno respecto del grupo sometido a la condición de curado convencional 65

Tabla 15. Porcentaje de ganancia de resistencia a la compresión respecto de la edad anterior de medición en cada condición de curado 65

Tabla 16. Resistividad eléctrica a los 3 días de edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días 68

Tabla 17. Resistividad eléctrica a los 3 días de edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días 69

Tabla 18. Resistividad eléctrica a los 3 días edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 14 días 70

Tabla 19. Resistividad eléctrica a los 7 días edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días 71

Tabla 20. Resistividad eléctrica a los 7 días de edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días 72

Tabla 21. Resistividad eléctrica a los 7 días de edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 14 días 73

Tabla 22. Resistividad eléctrica a los 14 días de edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días 74

Tabla 23. Resistividad eléctrica a los 14 días de edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días 76

Tabla 24. Resistividad eléctrica a los 14 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a la misma edad 77

Tabla 25. Resistividad eléctrica a los 21 días de edad para el grupo al cual se le

realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días	78
Tabla 26. Resistividad eléctrica a los 21 días de edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días	79
Tabla 27. Resistividad eléctrica a los 28 días de edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días	80
Tabla 28. Resistividad eléctrica a los 28 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a la misma edad	81
Tabla 29. Resistividad eléctrica a los 35 días de edad	83
Tabla 30. Resistividad eléctrica a los 42 días de edad	84
Tabla 31. Resistividad eléctrica a los 49 días de edad	85
Tabla 32. Resistividad eléctrica a los 56 días de edad	86
Tabla 33. Resistividad eléctrica a los 60 días de edad	87
Tabla 34. Resumen de valores de resistividad eléctrica de cada grupo sometido a las tres condiciones de curado hasta la edad de 60 días	89
Tabla 35. Valores promedio de resistividad eléctrica hasta la edad de 60 días	90
Tabla 36. Porcentajes de ganancia de resistividad eléctrica por parte de los grupos sometidos a curado interno respecto del grupo sometido a curado convencional .	91
Tabla 37. Porcentaje de ganancia de resistividad eléctrica para cada edad de ensayo entre la misma condición de curado	91
Tabla 38. Valores de resistencia a la compresión a la edad de 14 días	94

Tabla A1. Datos iniciales para medición de capacidad de absorción de piedra pómez	117
Tabla A2. Cálculo de porcentaje de absorción de piedra Pómez	117
Tabla A3. Granulometría del agregado grueso (piedra pómez)	119
Tabla A4. Cálculo de la densidad relativa del concreto	120
Tabla A5. Registro climático desde febrero 1 de 2015 hasta abril 27 de 2015 ...	123

LISTADO DE GRÁFICAS

- Gráfica 1. Desarrollo de la resistividad y la resistencia a la compresión durante el tiempo de endurecimiento del concreto 46
- Gráfica 2. Valores de resistencia a la compresión obtenidos en cada condición de curado a la edad de 14 días, para cada probeta 61
- Gráfica 3. Valores de resistencia a la compresión obtenidos en cada condición de curado a la edad de 28 días, para cada probeta 62
- Gráfica 4. Valores de resistencia a la compresión obtenidos en cada condición de curado a la edad de 60 días, para cada probeta 63
- Gráfica 5. Comportamiento de la resistencia a la compresión hasta los 60 días de edad en cada condición de curado 64
- Gráfica 6. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 3 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días 68
- Gráfica 7. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 3 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días 69
- Gráfica 8. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 3 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 14 días 70
- Gráfica 9. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 7 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días 72
- Gráfica 10. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 7 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la

compresión a los 28 días 73

Gráfica 11. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 7 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 14 días 74

Gráfica 12. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 14 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días 75

Gráfica 13. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 14 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días 76

Gráfica 14. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 14 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a la misma edad 77

Gráfica 15. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 21 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días 79

Gráfica 16. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 21 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días 80

Gráfica 17. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 28 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días 81

Gráfica 18. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 28 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a la misma edad 82

Gráfica 19. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a

los 35 días de edad	83
Gráfica 20. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 42 días de edad	84
Gráfica 21. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 49 días de edad	85
Gráfica 22. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 56 días de edad	86
Gráfica 23. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 60 días de edad	87
Gráfica 24. Comportamiento de la resistividad eléctrica del concreto ligero para cada condición de curado hasta los 60 días de edad	90
Gráfica 25. Resistividad eléctrica y resistencia a la compresión desde los 3 hasta los 60 días, en condición de curado convencional	92
Gráfica 26. Resistividad eléctrica y resistencia a la compresión desde los 3 hasta los 60 días, en condición de curado interno bajo techo	93
Gráfica 27. Resistividad eléctrica y resistencia a la compresión desde los 3 días hasta los 60 días, en condición de curado interno expuesto al ambiente	93

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos de resistencia a la compresión y resistividad eléctrica alcanzados por un grupo de probetas de concreto en las cuales se usó como agregado grueso piedra pómez, ya que éste agregado por sus propiedades absorbentes, permite almacenar gran cantidad de agua que puede ser aprovechada por la matriz cementante en el proceso de formación del concreto, éste proceso de hidratación autónomo es lo que se conoce como curado interno del concreto, en el cual a diferencia del curado convencional en donde se agrega agua de forma externa, el agua en esta situación es almacenada a la hora de la mezcla y cuando se hace necesario, es absorbida por la pasta de cemento y permite continuar con su proceso de hidratación.

El proceso experimental se llevó a cabo de la siguiente manera: un grupo de probetas se sometió a curado convencional; los otros dos grupos se someten a curado interno (uno con condiciones controladas bajo techo y el grupo restante expuesto al ambiente). Cada grupo evaluado consiste en una muestra de 15 probetas, por lo tanto la muestra experimental fue de 45 probetas de concreto ligero. Para la condición de curado interno, la mezcla se realizó con piedra pómez en condición saturada, la cual, previo a la mezcla el agregado grueso, se sometió al proceso de sumersión con el propósito de que absorbiera agua suficiente para que más adelante sea utilizada por el cemento en su proceso de formación. En el caso restante de condición de curado, el agregado grueso se usó en condición seca, de tal forma que el concreto no tuviera una fuente adicional de agua que la agregada de forma externa.

Cada uno de los grupos se sometió a ensayos de resistencia a la compresión a las edades de 14, 28 y 60 días, y entre esos intervalos de tiempo entre las pruebas destructivas, se realizó el ensayo no destructivo de la resistividad eléctrica a las edades de 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56 y 60 días. El propósito de cada ensayo era determinar bajo que condición de curado se obtuvieron los mejores resultados teniendo como referencia a la condición de curado convencional.

Con todos los resultados obtenidos en cada ensayo, al final por medio de una serie de gráficas, se encontró una relación entre ambos parámetros a través del tiempo, llegando a la conclusión de que la condición de curado interno presento un mejor comportamiento a lo largo de todo su periodo de vida, con resultados muy superiores a los obtenidos en la condición de curado convencional.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los métodos convencionales de curado requieren de un riguroso control que en muchas ocasiones no se logra y por lo tanto, en el concreto no se permite el desarrollo de todas sus propiedades de forma adecuada. Esto conlleva a que el concreto presente algunas fallas en sus propiedades, como por ejemplo grietas a temprana edad, problema que no es ajeno en las construcciones de las edificaciones de la ciudad de Bogotá.

La causa principal de un mal curado del concreto es el control que se lleva a cabo para su hidratación, ya que va tomando su desarrollo por el exterior de la estructura, provocando a que el concreto no llegue a su punto máximo de resistencia mecánica o se presenten fallas después de largos periodos de la construcción.

El hormigón logra su máximo estado de endurecimiento con grandes cantidades de hidratación de agua, lo que lleva a que se tenga un alto costo en la construcción no sólo de los materiales principales del hormigón, sino ayudando a que él desarrolle sus propiedades físicas y químicas reales.

Por las problemáticas mencionadas anteriormente, se hace necesario una alternativa para llevar a cabo el curado a un concreto; es aquí donde toma importancia el fenómeno de curado interno, como un procedimiento alterno para lograr una hidratación de la matriz cementante por acción propia; es decir, que en el momento que le haga falta agua al concreto para continuar el proceso hidratante y por ende el desarrollo de sus propiedades, el cemento pueda absorber las reservas de agua presentes dentro del cuerpo del concreto y por lo tanto, pueda mantener las condiciones de hidratación que permiten un mejor desarrollo de las reacciones químicas que se necesitan para que la matriz cementante (clave para lograr un concreto de calidad) pueda desarrollar todas sus propiedades.

Para determinar la influencia de este tipo de curado, se medirán dos parámetros, los cuales son la resistencia a la compresión medida a las edades de 14, 28 y 60 días del concreto y por otro lado, se medirá la resistividad eléctrica que es un parámetro que relaciona la permeabilidad, resistencia a la carbonatación, porosidad y por ende la durabilidad del concreto, para así poder tener un control general sobre el desarrollo de las propiedades del concreto expuesto en diferentes condiciones de curado.

¿Cuál es la influencia del curado interno en la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica de un concreto ligero usando como agregado grueso piedra pómez?

2. ANTECEDENTES

En el ámbito del curado del concreto se han realizado gran variedad de investigaciones que pretenden demostrar el comportamiento que puede desarrollar el concreto cuando se expone a este fenómeno; sin embargo, en cada una de estas investigaciones se han considerado diferentes formas de exponer el concreto, ya sea usando materiales no convencionales o exponiendo el concreto ante diversas condiciones de curado, para analizar diferentes parámetros como por ejemplo la resistencia, la durabilidad, el hendidamiento, etc. que son generalmente aceptados como indicadores de un buen curado, y por ende de la calidad del concreto.

En el estudio realizado por Lucio Guillermo López Yépez¹, se obtiene que los concretos de alto desempeño, logran un aumento del 30% de resistencia a la compresión cuando son curados en relación a los que no lo son, esta ganancia de resistencia, es más notoria cuando se agrega un determinado porcentaje de microsilice y por otra parte, los concretos curados independientemente del porcentaje de microsilice, presentan mayor resistencia a la penetración del ion cloruro, lo que lo hace más durable.

De forma general sobre el curado se encuentra el trabajo realizado por Fernández Luco², en el cual pretende mostrar qué factores son indicadores de un buen curado del concreto, concluyendo que las propiedades mecánicas del concreto como la resistencia a la compresión no es buen indicador de la eficacia del curado, más sin embargo si es un parámetro que se ve afectado por él, mientras que parámetros como la carbonatación y permeabilidad si son factores claramente dependientes del curado efectuado en el concreto.

En otros aspectos también se ha estudiado como la humedad del ambiente puede influir en el desarrollo de las propiedades del concreto, se tienen entonces trabajos como el de Solís Carcaño, Eric Moreno y Cecilio Vázquez³, en el cual comparan las resistencias a la compresión de una serie de probetas de concreto expuestas a curado húmedo y al ambiente durante diferentes épocas del año en un contexto de clima subhúmedo, en este trabajo se obtuvo que a tempranas edades (de 7 a 28 días) el efecto del curado húmedo es muy pequeño, mientras que a las edades de

¹ LÓPEZ YÉPEZ, Lucio Guillermo. Influencia del porcentaje de adición de la microsilice y del tipo de curado en la penetración del ion cloruro en el concreto de alto desempeño. Bogotá, Colombia. 2010. Tesis para optar por el título de Maestría en estructuras. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería.

² LUCO FERNÁNDEZ, Luis. Propuesta de indicadores del curado en obra. En: revista investigación y desarrollo. Vol. 1 No. 2 (Junio, 2010) pág. 17-30.

³ MORENO, Éric I., SOLÍS-CARCAÑO, Rómel, VÁZQUEZ-ROJAS, Cecilio; Diferencias en la resistencia de concretos sujetos a curados húmedos y al ambiente en clima cálido subhúmedo. En: revista investigación y desarrollo. Vol. 3. No. 1 (Julio-Diciembre, 2011) pág. 25-35

90 días ya es significativo, sin embargo, esta influencia se ve mediada en gran parte por la época del año en las que se curaron, pues aquellos concretos que se curaron en época de invierno, lograron desarrollar mayores resistencias que los curados en primavera.

Otro trabajo significativo acerca de las condiciones climáticas se presenta también en la investigación presentada por Moreno Éric I.⁴, sobre la influencia del tiempo de curado húmedo en la resistencia y durabilidad del concreto en clima tropical; en el cual como su nombre lo indica, estiman la influencia que tiene la humedad relativa del entorno en el desarrollo de la resistencia del concreto y en su durabilidad, concluyendo que cuando las condiciones de humedad son altas (90% en adelante) el concreto logra desarrollar buenas propiedades sin necesidad de un curado húmedo permanente; sin embargo, si estas condiciones de humedad no pueden mantenerse y por el contrario el concreto puede estar expuestos a condiciones agresivas de exposición, el material debe permanecer siempre curado para obtener una buena durabilidad.

El estudio realizado por Carlos Videla⁵, evalúa el efecto de la humedad relativa del ambiente de servicio en el desarrollo de las resistencias a compresión y a tracción y en el módulo de elasticidad de hormigones estructurales livianos a base de piedra pómez y pellets de ceniza volcánica, se concluyó que las propiedades mencionadas anteriormente se ven gravemente afectadas cuando el concreto ligero es expuesto a ambientes con bajas humedades relativas, a pesar de lograr ganancias significativas de resistencia (debido al curado interno) estas se pierden durante el paso de los días si las condiciones de curado no se mantienen; además de que la relación agua cemento y el porcentaje de árido liviano utilizado son claves para mejorar la permeabilidad con la cual pueden reducir el efecto del secamiento sobre las propiedades mecánicas en especial la de resistencia, ya que permite al curado interno suplir las pérdidas de agua.

Específicamente en el ámbito del curado interno, se ha trabajado para el desarrollo de las propiedades en concretos de alto desempeño y usando polímeros súperabsorbentes, como lo muestra el estudio realizado por Mauricio López⁶; en donde se evidencia por varios métodos de curado interno la efectividad de este en el desarrollo de las propiedades de hormigones de alto desempeño y demuestran como los métodos de curado convencionales resultan poco efectivos debido a la

⁴ MORENO, Éric I., SERRRANO - ZEBADUA, Carlos, SOLÍS - CARCAÑO, Rómel G.; Influencia del tiempo de curado húmedo en la resistencia y durabilidad del concreto en clima tropical. En: revista investigación y desarrollo. Vol. 4 No. 2 (Enero- Junio, 2013) pág. 15-25.

⁵ VIDELA, Carlos, TAPIA, Patricio; Efecto del secado en ambiente de servicio en la evolución de las propiedades mecánicas de hormigones livianos estructurales. En. Revista ingeniería de construcción. Vol. 22. No. 2 (Agosto, 2007). Pág. 123-137.

⁶LÓPEZ, Mauricio. Curado interno en hormigones de alto desempeño – un nuevo paradigma. En: revista ingeniera de construcción. Vol. 20. No. 2. (Agosto, 2005).Pág. 117-126.

impermeabilidad del concreto, retardando los procesos de desarrollo del concreto, caso contrario a cuando se usa el método de curado interno, ya que cuando el agua necesaria para desarrollar la matriz cementante es escasa, los polímeros súperabsorbentes liberan el agua contenida en ellos y así se continúa con el proceso de curado y por ende el desarrollo de las propiedades óptimas del hormigón de alto desempeño.

De igual forma al anterior en Portugal, L.P. Esteves⁷, realizó un estudio similar al de Mauricio López; sin embargo, el expone a curado interno al mortero con partículas súperabsorbentes e intenta determinar la influencia del curado en el desarrollo de las propiedades del mortero, por medio de diferentes condiciones de curado, determinando así que el curado interno permite un desarrollo óptimo de las propiedades como por ejemplo la resistencia, sin embargo para que este fenómeno ocurra es necesario no aplicar curado externo, de otra manera no se permitiría la acción de los polímeros.

⁷ H., Paiva, L. P., Esteves, P., Cachim V. M., Ferreira; Efecto de las condiciones de curado en las propiedades mecánicas de los morteros con partículas súper absorbentes. En: revista Materiales de construcción. Vol. 60. No. 298 (Abril-Junio, 2010). Pág. 61-72.

3. JUSTIFICACIÓN

Si existiese una clara influencia del curado interno en el desarrollo de las propiedades del concreto, se lograría un cambio tanto en el diseño como en la puesta en obra del concreto, por ejemplo, se modificarían los tiempos constructivos en una obra, si la obra es en su mayor parte consistente en concreto, el tiempo gastado en el proceso de curado convencional podría utilizarse en otro tipo de actividad constructiva, lo cual reducirá tanto el tiempo de duración de la construcción como el costo del proyecto. Por otra parte, si por medio de este método se logra una mejora de las propiedades que hacen referencia a la durabilidad del concreto como por ejemplo la resistencia a la carbonatación y demás, se reducirán los aditivos agregados a una mezcla de concreto que tengan la función de mejorar la durabilidad, pues se lograría una matriz cementante más compacta y con un mejor desarrollo de sus propiedades, debido a la disponibilidad de agua que tendrá internamente para continuar su proceso de formación.

El concreto es un material impermeable y por ende la entrada del agua por medio del curado no siempre resulta efectiva y para asegurar su entrada, este proceso se debe llevar a cabo de manera rigurosa dentro de la obra, lo cual a su vez consume tiempo y más agua de la necesaria, lo que a la larga se refleja en un aumento de costos. El fenómeno del curado interno, como alternativa al curado convencional, elimina las problemáticas mencionada anteriormente, ya que éste a diferencia del curado convencional y tal como su nombre lo indica se lleva a cabo en el interior del cuerpo de concreto, permitiendo de esa forma una mejor formación de la matriz cementante que es la clave del desarrollo de las propiedades del concreto.

En concretos ligeros, la posibilidad de desarrollar un curado interno es muy grande, debido a que el principal material para este tipo de concreto, es el agregado poroso, el cual posee una capacidad de almacenamiento de agua que puede ser liberado a la hora de la formación de la matriz cementante y puede mantener las condiciones de humedad óptimas en el material que permiten el desarrollo óptimo de sus propiedades. Por medio de este proceso se reducirán los tiempos de construcción y los excesos de agua necesarios en un proceso constructivo con curado común, esta reducción disminuirá a su vez costos, (menos material, menos tiempo y menos personal para llevar a cabo estas actividades), que por ejemplo en el caso de una construcción de carácter prioritaria resulta de gran beneficio.

4. HIPÓTESIS

El uso de agregado poroso, en este caso piedra pómez en condición saturada como agregado principal del concreto, permite llevar a cabo un proceso de curado interno, tal que las propiedades del concreto como lo son la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica mejoren, producto de una mejor formación de la matriz cementante.

5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la influencia del curado interno en la resistencia a la compresión y resistividad eléctrica del concreto ligero usando como agregado grueso piedra pómez.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 5.2.1** Establecer el efecto que tiene el curado interno en la resistencia a la compresión del concreto ligero a partir de la prueba a compresión.
- 5.2.2** Identificar el efecto del curado interno en la resistividad eléctrica del concreto ligero con el método directo.
- 5.2.3** Analizar la relación entre la resistencia y resistividad lograda por el concreto en las diferentes condiciones de curado a través de bases de datos y graficas en Excel.

6. MARCOS REFERENCIALES

Para el desarrollo de esta investigación, es necesario tener conocimiento acerca de los cuatro pilares fundamentales sobre los cuales se trabajará; estos son en primera instancia, el uso del *concreto ligero*, en el cual se usará como agregado grueso la piedra pómez, de tal forma que pueda desarrollarse un proceso de *curado interno* (aprovechando la porosidad del agregado), hasta este punto, las teorías necesarias tratan sobre la elaboración del concreto y el proceso de formación; sin embargo, es necesario usar un método de control, el cual permita determinar las características que el concreto ligero desarrollará a lo largo de su proceso de formación; por tal motivo la tercera teoría fundamental consiste en la *resistividad eléctrica*, en la cual se relacionarán las propiedades del concreto tales como la durabilidad, permeabilidad y la resistencia a la carbonatación, que junto con la *resistencia a la compresión* serán las propiedades analizadas para determinar la influencia del fenómeno del curado interno en el concreto ligero. A continuación se explicará en detalles cada una de estas teorías mencionadas con anterioridad.



Fotografía 1. Concreto ligero, piedra pómez y curado interno. Tomada 27 de Febrero de 2015.



Fotografía 2. Resistividad eléctrica y resistencia a la compresión. Tomada 26 de Marzo de 2015.

6.1 MARCO CONCEPTUAL

Los métodos de curado convencionales son aquellos en los cuales el agua adicionada al concreto se hace de forma externa, pues el *curado*, es el proceso por medio del cual se busca mantener al concreto en condiciones de hidratación óptimas de tal manera que este logre desarrollar todas sus propiedades al 100%, generalmente y como ya se mencionó anteriormente este proceso se lleva a cabo de forma externa; sin embargo, en muchas ocasiones al ser el concreto un material impermeable, el proceso de hidratación que quiere lograr el curado no resulta muy efectivo. Los resultados de un mal curado son entre muchos otros la pérdida de la *resistencia a la compresión*; que es la capacidad que tiene el concreto de soportar la presión generada por cargas externas, generalmente medida a los 28 días de endurecimiento. Por otro lado está la *resistencia a la carbonatación*, que no es más que la resistencia que posee el concreto al ingreso de CO₂ atmosférico⁸, y también está presente en estos factores la *permeabilidad*, que es la propiedad que tiene un medio para facilitar el paso de un fluido a través de él; los factores mencionados anteriormente son el resultado de la *porosidad* del concreto, que es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos en el cuerpo de concreto.

Cuando el proceso de curado es deficiente, la resistencia del material disminuye, mientras que la permeabilidad y porosidad aumentan, provocando una menor resistencia a la carbonatación y con la alteración de estos factores se pierde la calidad del concreto. Este tipo de problemas ocasionados por un mal curado se presenta generalmente cuando se trabajan con *concretos de alto desempeño*, que son los concretos con capacidad de desarrollar una resistencia de 50MPa que por tener bajas *relaciones agua cemento (W/C)*, que es la cantidad de agua proporcional a una determinada cantidad de cemento, son concretos muy impermeables y por lo tanto los métodos convencionales de curado no resultan eficaces.

Es así como nace la idea del *curado interno*, que es igual que el curado normal con la diferencia de que en este caso el agua necesaria para realizar este proceso fue incorporada en el concreto por medio de agregados porosos o por medio de polímeros súper absorbentes, de manera que cuando se hace necesario estos liberan la cantidad de agua incorporada en ellos y permiten continuar con el proceso de hidratación del cemento⁹. Para efectuar un curado interno por medio de agregados porosos se debe reemplazar una cantidad considerable de agregado normal, y por eso el concreto disminuye su módulo de elasticidad (lo que no es muy bueno cuando se trata de concretos de alto desempeño) y por eso el método de

⁸ LUCO FERNÁNDEZ, Luis. Propuesta de indicadores del curado en obra. En: revista investigación y desarrollo. No. 2 (Junio, 2010) pág. 17-30. P. 23.

⁹LÓPEZ, Mauricio. Curado interno en hormigones de alto desempeño – un nuevo paradigma. En: revista ingeniera de construcción. No. 20. (Agosto, 2005).Pág. 117-126. P. 120.

curado por medio de polímeros súper absorbentes es el más usado para estos concretos.

Las propiedades de los agregados porosos que posibilitan el proceso de curado interno en un concreto resultan muy útiles, ya que así los tiempos constructivos pueden reducirse y por lo tanto la eficiencia en obra aumentará. Si bien esta propiedad resulta como ya se mencionó útil, para los *concretos ligeros* que son los concretos con base en agregados porosos, como por ejemplo la piedra pómez, la escoria de alto horno y demás, que hacen que su densidad sea menor a los concretos normales, resultaría de gran beneficio analizar su comportamiento bajo condiciones de curado interno, midiendo su *resistencia a la compresión* y *resistividad eléctrica*, que es la resistencia que presenta un cuerpo para permitir el paso de cargas eléctricas a través del él; midiéndose en periodos distintos del endurecimiento, lo que refleja la calidad del concreto, (en forma no destructiva) y por lo tanto es un indicador del desarrollo de sus propiedades tales como la permeabilidad y la resistencia a la carbonatación.

6.1.1 El concreto ligero

El concreto ligero es aquel cuyo relleno consiste en agregados ligeros (porosos), que hace que su densidad sea menor en comparación al concreto convencional, según la ACI 213R, se designa como concreto ligero a aquel que la máxima densidad es de 1850 kg/m^3 , y su resistencia se encuentra alrededor de los 17MPa, mientras que para concretos normales, su densidad es de 2400 kg/m^3 y su resistencia mínima exigida es de 21MPa¹⁰. Es particularmente usado cuando se busca reducir peso a una estructura, o que en su defecto el terreno no pueda soportar mucho peso (siempre y cuando se cumpla con las condiciones mínimas de resistencia). Existen dos tipos de concretos ligeros se clasifican en:

Concreto ligero según su utilización:

- Concreto de relleno.
- Concreto aislante.
- Concreto estructural o de alto desempeño.

Sin embargo, adicional a la clasificación anterior este tipo de concretos también se pueden clasificar de acuerdo a su tipo producción:

- Concreto de agregado ligero.
- Concreto aireado, celular, espumoso o gaseoso.

¹⁰ AMERICAN INSTITUTE OF CONCRETE. Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete. ACI COMMITTEE. Estados Unidos de América: ACI COMMITTEE, 2003, 38h: il.(ACI 213R).

- Concreto sin finos.

A continuación se describirán rápidamente las dos clasificaciones que se le dan al concreto ligero.

6.1.1.1 Tipos de Concreto ligero según su utilización

- **Concreto de relleno:** este tipo de concreto se usa para solidarizar las armaduras con la mampostería, llenando los huecos en donde se aplica; por lo tanto son concretos con una densidad entre 300 y 1000 Kg/m³ sin una resistencia a la compresión específica y por lo tanto no pueden ser usados como concretos estructurales.
- **Concreto aislante:** es el concreto ligero con los rangos de densidad más bajos (menor a los 800 Kg/m³) con una resistencia última a la compresión que se sitúa entre 0.7 y 7 MPa, como su nombre lo indica, sus servicios es para aislamiento y acústica*.
- **Concreto estructural de alto desempeño:** es el concreto descrito inicialmente, es alrededor de un 30% más liviano que un concreto convencional, con una densidad no mayor a 1850 Kg/m³ y una resistencia a la compresión mínima a los 28 días de 28 MPa, “empleado en edificios de estructura de acero, de estacionamientos. Elementos prefabricados de hormigón como vigas en “T”, paneles de planchas y bóvedas; estructuras marinas, muelles flotantes, puentes, buques y plataformas de extracción de petróleo”¹¹.

6.1.1.2 Tipos de concreto ligero de acuerdo al tipo de producción

- **Concreto de agregado ligero:** en este tipo de hormigón se usan agregados porosos, usando por ejemplo piedra pómez, escoria de alto horno o poliestireno expandido.
- **Concreto aireado, celular, espumoso o gaseoso:** para este caso se introducen en el hormigón, vacíos por el arrastre de aire, de tal manera que al momento de iniciar el fraguado, la estructura tenga una apariencia espumosa.

*el componente fundamental de este tipo de concreto es la incorporación del poliestireno expandido, que es comúnmente conocido como “ICOPOR”.

¹¹ VALDEZ GUZMÁN, Luis Alberto; Hormigones livianos; Guayaquil, Ecuador, 2010; tesina de grado para optar por el título de ingeniero civil; escuela superior politécnica del litoral, facultad de ingeniería en ciencias de la tierra; p. 21.

- **Concreto sin finos:** “se omite el agregado de finos, por lo que gran número de vacíos intersticiales están presentes, los agregados gruesos son de peso específico normal”¹².

6.1.1.3 Ventajas del uso de concretos ligeros

Dentro de las muchas ventajas que presenta el uso se encuentran la disminución del peso en la estructura y por ende de la carga aplicada a la cimentación; por sus características de aislamiento, permite el ahorro de energía eléctrica; es un concreto de fácil trabajabilidad; como se menciona reiteradamente en ocasiones anteriores es de baja densidad; presenta un bajo módulo de elasticidad lo cual permite una mejor respuesta ante las cargas de impacto; no requiere compactación y el fraguado es controlado y uniforme.

6.1.1.4 Desventajas de los concretos ligeros

Las principales desventajas que presenta este tipo de concreto, es que los agregados usados al no ser tan comunes en el área de la construcción, podrían ser más costosos que los agregados convencionales del concreto; por la absorción de los agregados usados, no se puede establecer la influencia de la relación W/C y debido a que este concreto desarrolla un bajo módulo de elasticidad, las deformaciones producidas por las cargas son excesivas en comparación a las del concreto convencional y podría no cumplir con los requerimientos establecidos en la NSR-10.

6.1.1.5 Agregados convencionales para la elaboración de concretos ligeros

A continuación se muestra en la tabla 1, los principales materiales usados en este tipo de concreto con una pequeña descripción de él.

¹²Ibid., p. 22.

Tabla 1. Principales agregados usados en el concreto ligero.

MATERIAL	DESCRIPCIÓN	FOTO
Piedra pómez	Roca magmática volcánica vítrea capaz de flotar en el agua, con un peso específico entre 350 y 800 Kg/m ³ y una gravedad específica entre 2.3 y 2.5.	 <p>Fotografía 3. Piedra pómez. Tomada 25 de Febrero de 2015</p>
Poliestireno expandido (ICOPOR)	Es un excelente aislante térmico y acústico. No reacciona con el cemento, tiene buena adherencia con el mismo y presenta una densidad aparente que se encuentra entre 10 y 30 Kg/m ³	 <p>http://construpanelpuebla.com/3505/img/g_productos09.jpg</p>
Virutas de madera	Fragmento de material residual con forma de lámina curvada o espiral, "en su mayoría los aserrines de maderas suaves son compatibles con el cemento, si el aglutinante es una mezcla de cemento y cal" ¹³ .	 <p>http://www.mundoconejo.com.ar/graficos/jau-11.jpg</p>
Arcilla expandida	Aislante de origen cerámico, fabricado industrialmente. Es un material muy duro, de granulometría variable y forma redondeada; no es un material corrosivo ni se pudre; presenta un peso específico entre 270 y 600 Kg/m ³	 <p>http://sustratosjardineria.com/wp-content/uploads/arcilla-expandida-21.jpg</p>

Fuente: trabajo actual.

¹³Ibid., p. 50

6.1.1.6 Especificaciones técnicas para el concreto ligero

A continuación se muestra en la tabla 2. Algunas especificaciones técnicas para el concreto ligero suministradas por ARGOS.

Tabla 2. Especificaciones técnicas para el concreto ligero.

ESPECIFICACIÓN	VALOR		OBSERVACIONES
	Concreto especificado por densidad	Concreto especificado por densidad y resistencia	
Asentamiento	6" +/-1" (152+/-25 mm)	6" +/-1" (152+/-25 mm)	Evaluado de acuerdo con la NTC 396.
Resistencia especificada a compresión (28 días)	NA	2000 psi (14 MPa) 2500 psi (17,5 MPa) 3000 psi (21 MPa)	Evaluada de acuerdo con la NTC 673.
Tamaño máximo nominal del agregado	1/2", y 1" (12,5mm y 25,4mm)	1/2", y 1" (12,5mm y 25,4mm)	Dependiendo de la disponibilidad de fuentes de suministro de cada región.
Densidad	1200 kg/m ³ (+/-50 kg/m ³) 1600 kg/m ³ (+/-50 kg/m ³)	1800 kg/m ³ (+/-50 kg/m ³)	Evaluada de acuerdo con la NTC 1926.
Características adicionales	Color	Color	Estas características son adicionadas por requerimiento del cliente de acuerdo con sus necesidades y viabilidad técnica. Los colores ofrecidos están sujetos a las materias primas disponibles en cada región.

Fuente: ARGOS, Concreto liviano, (en línea) <<http://www.argos.co/Media/Colombia/images/concreto+liviano-1.pdf>> (citado en 10 de mayo de 2014).

6.1.2 El fenómeno de curado interno

Para explicar lo que es el fenómeno del curado interno, primero es necesario definir lo que es el curado del concreto, el curado “es el proceso por medio del cual el concreto endurece y adquiere resistencia, una vez colocado en su posición final”¹⁴; es entonces el curado la forma de mantener el concreto en estado húmedo, de forma tal que la matriz cementante pueda desarrollar todas sus reacciones químicas y de esa forma adquirir todas sus propiedades. Lo que se busca con el curado es mantener húmedo el cuerpo de concreto con el propósito de evitar las pérdidas en éste, de forma tal que pueda desarrollar sus propiedades de manera óptima.

¹⁴NORMA SISMORESISTENTE COLOMBIANA. Título C concreto estructural: definiciones. Bogotá: ICONTEC, 2010. C-18: il. (NSR-10 C2.2).

¿Cuál es la necesidad de un curado del concreto?

Según lo ha descrito el comité 308 del ACI, “el curado tiene una influencia significativa sobre las propiedades del concreto endurecido, tanto en el interior del concreto como en su superficie, tales como la resistencia, permeabilidad, resistencia a la abrasión, estabilidad de volumen, resistencia al hielo-deshielo y resistencia a sustancias conglomerantes. El desarrollo de resistencia superficial puede reducirse significativamente cuando el curado es defectuoso”¹⁵; lo anterior quiere decir entonces que el concreto solo puede lograr el máximo de sus cualidades cuando se somete a un proceso de curado; de no ser así, el concreto no desarrollaría la durabilidad de diseño que es un parámetro fundamental para el control de calidad de este.

Cuando no se lleva un proceso de curado al concreto durante su etapa de fraguado, la capa exterior del cuerpo de concreto se deteriora, agrietándose, permitiendo así la entrada del agua hacia su interior, lo que se traduce en una mayor permeabilidad, y una resistencia menor a la carbonatación, que en los casos más severos, terminarían en la destrucción de la estructura, pues ya no es un concreto confiable para el proyecto constructivo, aunque la resistencia (parámetro fundamental de la calidad del concreto), en algunos casos no se vea afectada en gran medida, las demás propiedades si lo están y por lo tanto en algún futuro (de seguir el uso de este concreto) el concreto llegaría a una falla prematura.

A la hora de tomar muestras para evaluar la calidad del concreto que se va a utilizar en la ejecución de determinada obra, estas muestras son llevadas a un laboratorio donde las condiciones climáticas y de hidratación son totalmente controladas; por lo tanto, pueden desarrollar todas sus propiedades al 100% sin ningún inconveniente, caso contrario cuando el concreto es trabajado directamente en obra donde está expuesto a cualquier tipo de cambio climático y la hidratación no es tan constante ni uniforme, lo cual influye en el proceso de su formación óptima.

Esto no quiere decir que el curado convencional no sea bueno y no se deba utilizar, pero sí tiene ciertas deficiencias las cuales puede suplir el curado interno bien sea que el concreto este expuesto a las condiciones climáticas o no, que este pueda hidratarse constante y uniformemente para desarrollar sus propiedades al 100%.

6.1.2.1 Especificaciones del curado

¹⁵AMERICAN INSTITUTE OF CONCRETE. “standard specification for curing concrete (ACI308.1)”,”guide to curing concrete” (ACI 308R), ACI COMMITTEE, Estados Unidos de América, 2007, 31h: ii (ACI 308).

Si bien como se mencionó anteriormente, el curado es el proceso para mantener en condición húmeda al concreto, la forma de curar debe realizarse bajo unos ciertos parámetros los cuales se encuentran especificados en la NSR-10 título C, sección C.5.11 dentro de los cuales se resalta que la temperatura en la cual se efectúa el curado debe mantenerse por encima de los 10°C como mínimo durante los primeros tres días; sin embargo, cuando el proceso de curado corresponde a un curado acelerado, con el cual se pretende acelerar la adquisición de resistencia a compresión del concreto reduciendo el tiempo de curado, la condición nombrada anteriormente no es necesaria.

6.1.2.2 Curado interno del concreto

La idea del curado interno nace con el modelo propuesto por Powers acerca de la relación entre el curado del concreto y la hidratación del cemento¹⁶, en el cual establece que a medida que el cemento se hidrata, el volumen inicial de agua en el concreto disminuye considerablemente (también se deben considerar las pérdidas de agua generadas por el clima y demás), llegando finalmente a un estado en el cual si bien están los productos de hidratación, ya no hay agua suficiente para ejercer el proceso y el material empezaría con el proceso de secado; esta situación ocurre generalmente para cualquier concreto con una relación W/C menor o igual a 0.36 , que por lo tanto necesita de agua adicional para poder llegar al grado de hidratación del 100%, esta situación es muy común cuando se trabajan con concretos de alto desempeño, en donde los métodos de curado convencionales no son efectivos y por lo tanto la idea de un curado interno cobra gran importancia.

Cuando el concreto se prepara con relaciones W/C bajas (menores al 0.43), la porosidad capilar del cuerpo de concreto es muy baja, por ende más impermeable, lo cual hace que el paso del agua a través del medio sea muy complejo y en la mayoría de los casos imposible, por lo tanto la idea de **curado interno** simplemente hace referencia al proceso que mantiene húmedo al concreto efectuado al interior del concreto, es decir que ya no se hace uso de la aplicación externa del agua al concreto para cumplir con dicho fin, este método no convencional se basa en “incorporar agua en la mezcla que no está disponible para la hidratación al comienzo (baja W/C), pero que es liberada más tarde cuando es requerida para continuar la hidratación”¹⁷.

¹⁶T.C., Powers; a discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete, in Proceedings of the Highway Research Board: Washington DC. 1947.

¹⁷LÓPEZ, Mauricio. Curado interno en hormigones de alto desempeño – un nuevo paradigma. En: revista ingeniera de construcción. No. 20. (Agosto, 2005).Pág. 117-126. P. 120.

6.1.2.3 Explicación del fenómeno del curado interno

La mejor forma de ilustrar el fenómeno del curado interno es por medio de la teoría de la percolación, la cual es una descripción del recorrido que puede llegar a realizar un fluido a través de un medio aleatorio (para este caso medio poroso), que para este caso ilustraría como se hace posible la hidratación interna del concreto.

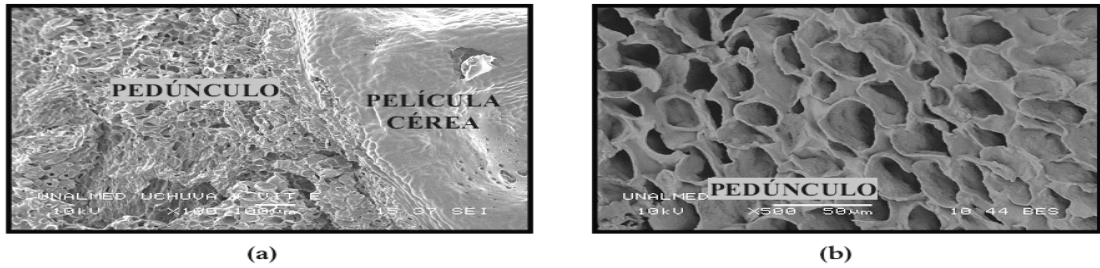
Cuando se pasa por un proceso percolativo, el agua (que fue incorporada a la hora de la mezcla y es independiente de la relación W/C) se dice que el fluido atravesó un medio movilizándose entonces desde el interior del polímero súperabsorbentes (generalmente usado para crear el proceso de curado interno) y finalmente llega a la pasta de cemento para darle continuidad a la hidratación de esta; sin embargo, este proceso se debe a una serie de probabilidades y suposiciones que a continuación se describen con más detalle, aunque de forma breve ya que este no es el propósito de la investigación.

La teoría de la percolación

Como se explicó anteriormente, la percolación es la forma de describir el paso de un fluido a través de un medio aleatorio, este término fue propuesto por Broadbent y Hammersley en 1957, con el cual se logran explicar gran variedad de fenómenos físicos, en los cuales el desorden está presente¹⁸. Para entender el fenómeno de la percolación primero considérese una estructura cualquiera, por ejemplo el pedúnculo mostrado en la figura 1, en donde a) representa la apariencia del cuerpo a vista normal y b), representa la vista del cuerpo pero esta vez en un acercamiento.

¹⁸HORACIO LÓPEZ, Raúl; caracterización de medios porosos y procesos percolativos y de transporte. SAN Luis, Argentina. 2002. Tesis de grado (magister en Física). Universidad Nacional de San Luis, facultad de ciencias Físico-Matemáticas y Naturales; departamento de Física. P. 38.

Figura 4. Imagen pedúnculo en una imagen 100*100µm (a) y luego con aumento a 50*50 µm

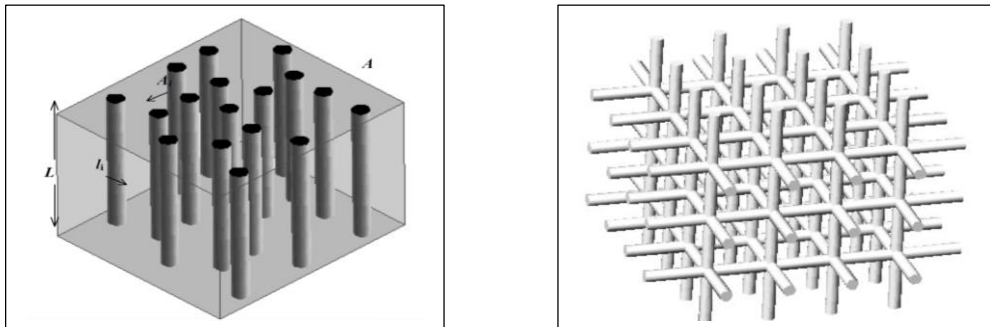


Fuente: <http://goo.gl/0GGHhJ>(citado en 10 de Mayo de 2014).

Cuando se realiza el acercamiento a la figura en (b), se observa como la textura del pedúnculo consiste en una serie de poros interconectados a micro escala que se encargan de formar una serie de caminos al interior del material, esta serie de conductos es por donde se dan los procesos de percolación.

Si ahora se analiza interna y tridimensionalmente la red de capilares, en su forma más simple se asemejaría a lo mostrado en la figura 2, siendo la parte de la izquierda la red más simple y la de la derecha la más compleja.

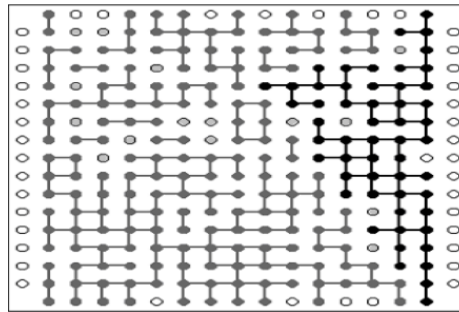
Figura 5. Red tridimensional de capilares paralelos (derecha) a cubica simple de capilares cilíndricos de tamaño distribuido (izquierda).



Fuente: ROZAS CADENAS, Roberto Eduardo. Permeabilidad de medios porosos: Experimentos Numéricos y Teoría. Concepción, Chile. 2002. Tesis de grado (magister en ingeniería química). Universidad de Concepción. P. 36.

Se aprecia en la figura 2, en la sección derecha una red compleja de capilares al interior de un medio poroso, la interconexión entre estas redes, es la que permite la existencia de la probabilidad de percolación y por ende del paso de un fluido a través de este, pues si se considera una sección plana, la conexión entre redes sería algo similar a lo mostrado en la figura 3. En donde puede apreciarse con mayor detalle, como la interconexión entre redes capilares que permiten el paso del fluido a través del medio.

Figura 6. Red percolativa. Las ramificaciones en gris corresponden a redes finitas (separadas), mientras que las negras corresponden a ramos infinitos a través del medio.



Fuente: ROZAS CADENAS, Roberto Eduardo. Permeabilidad de medios porosos: Experimentos Numéricos y Teoría. Concepción, Chile. 2002. Tesis de grado (magister en ingeniería química). Universidad de Concepción. P. 125.

Como se observa en la figura 3, las ramificaciones de color gris, representan redes finitas aisladas dentro del medio, por lo cual no generan un aporte a la percolación del fluido a través del medio a comparación de las ramificaciones negras que si están interconectadas entre sí a través de todo el medio y por eso se denominan ramos infinitos a través del medio, sobre los cuales si existe una probabilidad de percolación significativa. Finalmente, entonces la percolación no es más que la probabilidad que tiene un fluido de atravesar un medio (en este caso poroso) a través de los capilares interconectados que generen una ramificación infinita a través del medio, por supuesto como se mencionó antes de explicar la teoría esto solo es una definición muy concisa de lo que representa esta teoría.

El curado interno y las redes capilares

Si ahora, se considera a la masa de concreto como un medio poroso (por supuesto con una porosidad muy pequeña) y por ende los agregados del concreto forman una serie de interconexiones sobre las cuales se genere una probabilidad de percolación suficiente para permitir el paso del fluido, en el momento que se genere la falta de agua para el proceso de hidratación el agua incorporada al concreto (ya sea por medio de polímeros súper absorbentes o agregados porosos) tendrá el paso libre para moverse a través de estas redes y llegar a la matriz cementante permitiendo que continúe así el proceso de hidratación.

6.1.2.4 Métodos para efectuar el curado interno en el concreto

Para incorporar el agua dentro del concreto, se debe contar con un agregado que permita el almacenamiento del agua en su interior, por lo tanto los métodos

generalmente aceptados para cumplir con este proceso son: por medio de agregados ligeros (porosos) o usando polímeros súperabsorbentes.

- **Curado interno por medio de polímeros súperabsorbentes:** este tipo de polímeros son aquellos capaces de retener grandes cantidades de fluido acuoso, de hecho son capaces de retener hasta 50 veces su peso incluso cuando actúan bajo condiciones de presión, el uso de estos polímeros representa una gran alternativa para la ejecución de un curado interno, ya que a diferencia de los agregados porosos, no vuelven al concreto liviano y por lo tanto no afectan propiedades como por ejemplo el módulo de elasticidad de este; este método es el más comúnmente utilizado sobre todo para concretos de alto desempeño; sin embargo, para su uso se debe ser precavido ya que debido a su baja densidad puede ocasionar la segregación en el concreto.
- **Curado interno por medio de agregados ligeros (porosos):** fue el primer método para desarrollar el curado interno en el concreto, ya que la propiedad de este tipo de agregados (la porosidad) permite una alta capacidad de absorción, debido a su porosidad, los agregados ligeros pueden presentar una absorción después de 24 horas de inmersión entre 5 a más 25%, ello permite la incorporación de grandes cantidades de agua para curado interno¹⁹.

6.1.2.5 Efectos del curado interno en el concreto

Son muchos los efectos positivos que produce el uso del curado interno, sin embargo los principales giran en torno a la resistencia a la compresión y la durabilidad del concreto. A continuación se enunciará los efectos más significativos del curado interno en el concreto:

- **Resistencia a la compresión:** ya que el curado interno mejora el desarrollo de la matriz cementante (que es clave para lograr la resistencia), después de una serie de estudios realizados en los cuales se concluye que la resistencia a la compresión no se ve influenciada por un curado externo si la muestra se expone a curado interno, y por el contrario los concretos expuestos a esta condición no convencional de curado lograron ganancias

¹⁹ HOLM, T.A.; BREMMER, T.W.; state of the art report on High-Strength, high-Durability Structural Low-Density Concrete for Applications in Severe Marine Environments, in Innovations for Navigation Projects Research Program. Citado por: LÓPEZ, Mauricio. Curado interno en hormigones de alto desempeño-un nuevo paradigma. En: revista ingeniería de construcción. No. 20 (Agosto, 2005). Pág. 117-126.p. 21.

de hasta el 12% que los concretos expuestos a curados convencionales (Weber y Reinhardt 1997)²⁰.

- **Porosidad:** Weber y Reinhardt (1997), demostraron que dentro de un periodo entre los 180 y 365 días de vida del concreto, se reduce significativamente²¹.
- **Permeabilidad, agrietamiento y resistencia a la carbonatación:** como un derivado de la baja porosidad, el concreto expuesto a curado interno desarrolla una capa superficial más compacta (con menos porosidad), lo cual por ende desarrolla una mayor resistencia a la carbonatación y al agrietamiento, lo que en combinación de ambos factores, reduce la permeabilidad del medio; es decir, que el concreto se vuelve más impermeable, por lo cual es más resistente ante la entrada de agentes corrosivos y por lo tanto es un concreto más durable.

6.1.3 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del concreto es la propiedad mecánica del concreto que indica el máximo esfuerzo que puede soportar una probeta de concreto sometida a cargas de compresión, es la medida más común de desempeño que emplean los ingenieros para el diseño de estructuras, esta se mide fracturando probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayos de compresión.

La resistencia a la compresión se calcula a partir de la carga de ruptura dividida por el área de la sección que resiste a la carga y se da en unidades de libra-fuerza por pulgada cuadrada (PSI) o en mega pascales (MPa). Los requerimientos de la resistencia a la compresión pueden variar desde 2.500 PSI (17 MPa) para concreto residencial hasta 4.000 PSI (28 MPa) para estructuras comerciales²².

$$Rec = P/A \quad (1)$$

Dónde:

Rec = Resistencia a la compresión.

P = Carga de ruptura.

²⁰LÓPEZ, Mauricio. Curado interno en hormigones de alto desempeño – un nuevo paradigma. En: revista ingeniera de construcción. No. 20. (Agosto, 2005).Pág. 117-126. P. 122

²¹Ibid., p.122

²² NRMCA. CIP35-Prueba de Resistencia a la Compresión del Concreto. Artículo en línea <<http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP35es.pdf>>. pág. 1 (citado 10 de noviembre de 2014).

A = Área de la sección que resiste a la carga.

6.1.3.1 ¿Por qué se determina la resistencia a la compresión?

Los resultados de las pruebas de resistencia a partir de cilindros fundidos se pueden utilizar para fines de control de calidad, aceptación del concreto o para estimar la resistencia del concreto en estructuras para programar las operaciones de construcción, tales como remoción de formaletas o para evaluar la conveniencia de curado y protección suministrada a la estructura²³.

El proceso para determinar la resistencia a la compresión se debe realizar de acuerdo a la NTC 673 (ASTM C31) teniendo en cuenta que un valor de resistencia a la compresión del concreto será el obtenido a los 28 días (f'c) de edad y además el promedio de dos pruebas realizadas bajo el proceso dictado por la dicha norma. A continuación en la figura 4 se muestra un esquema para la medición de la resistencia a la compresión.



Fotografía 4. Esquema para determinar la resistencia a la compresión del concreto. 26 de marzo de 2015.

²³ Ibid; pág 1.

6.1.3.2 ¿Cómo realizar la prueba de resistencia del concreto?

Para realizar la prueba de resistencia a la compresión se debe seguir el proceso dictado en la NTC 673 o su equivalente la norma ASTM C31²⁴, dentro de los cuales se resaltan los siguientes aspectos:

- Las probetas cilíndricas para pruebas de aceptación deben tener un tamaño de 6 x 12 pulgadas (150 x 300mm) o 4 x 8 pulgadas (100 x 200mm) cuando así se especifique. Las probetas más pequeñas tienden a ser más fáciles de elaborar y manipular en campo y en laboratorio. El diámetro del cilindro utilizado debe ser como mínimo 3 veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso que se emplee en el concreto.
- Los cilindros se deben centrar en la máquina de ensayo de compresión y cargados hasta completar la ruptura. El régimen de carga con máquina hidráulica se debe mantener en un rango de 20 a 0 PSI/s (0,15 a 0,35 MPa/s).
- El rango entre los cilindros compañeros del mismo conjunto y probado a la misma edad deberá ser en promedio de aproximadamente 2 a 3% de la resistencia promedio. Si la diferencia entre los 2 cilindros compañeros sobrepasa el 8% o el 9,5%, se deberán evaluar y rectificar los procedimientos de ensayo de laboratorio.



Fotografía 5. Falla de cilindro de concreto en prueba de resistencia a la compresión. 26 de marzo de 2015.

²⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN: ENSAYO DE REISSITENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS NORMALES DE CONCRETO. Bogotá: ICONTEC, 2000. 14h. : il. (NTC 673).

6.1.4 La resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es uno de los métodos no destructivos para el control del desarrollo de las propiedades del concreto durante su periodo de formación; este método consiste en medir la resistencia que presenta el concreto al paso de cargas eléctricas a través del él como un medio conductor; de tal manera que cuando la resistividad es mayor, la porosidad del medio es muy pequeña y en el caso inverso si la resistividad es muy pequeña, la porosidad es muy alta.

6.1.4.1 ¿Cómo medir la resistividad eléctrica?

La resistividad es una medida de la capacidad del hormigón de actuar como electrolito y conducir las corrientes de corrosión. Se basa en la suposición de que la resistividad es proporcional a la velocidad de corrosión cuando los ensayos de potencial de corrosión indican que es probable que haya corrosión²⁵.

Para la medición de la resistividad eléctrica es necesario recurrir a La Ley de Ohm, ya que establece que la intensidad I es directamente proporcional a la diferencia potencial V e inversamente proporcional a la resistencia R de la corriente eléctrica que circula por un conductor eléctrico, la intensidad se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$I = \frac{V}{R} \quad (2)$$

Dónde:

I : Intensidad de corriente (A).

V : Diferencia de potencial (V).

R : Resistencia (Ω).

Al grado de dificultad que encuentran los electrones para poder desplazarse se le llama resistividad. El comportamiento de un material frente al paso de corriente eléctrica es el que describe su valor, ya que con este valor da idea de que tan buen o mal conductor eléctrico es. Un alto valor de resistividad indica que el material es mal conductor mientras que un valor bajo indicará que es buen conductor. Como propiedad de un material, la resistividad eléctrica se puede definir como:

²⁵ANDRADE, C., Alonso, C. y Castellote, M; La dependencia umbral de cloruro de enfrentar potencial de refuerzos. Electrochimica Acta, vol.47, 2006, 3469-3481.

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (3)$$

Dónde:

ρ = Resistividad eléctrica ($\Omega \cdot m$).

R = Resistencia (Ω).

L = Longitud del material (m).

A = Área de la sección transversal del material (m^2).

6.1.4.2 Métodos para realizar la prueba de la resistividad eléctrica

Para la medida de la resistividad existen dos métodos: el primero es la medición directa colocando electrodos en los extremos de la probeta de concreto y el segundo método es conocido como el método de las cuatro puntas.

Método directo

Para dar a un método sencillo de la resistividad eléctrica del concreto se supone la aplicación de corriente por medio de dos electrodos "I", la separación será la distancia dada por "L" y de sección "A" (dimensiones de probeta de ensayo). Con estos valores se puede tomar la medida la resultante "V" en potencial y la resistividad del concreto, para asegurar el contacto de los electrodos estos deben humedecerse, de lo contrario los electrodos no pueden realizar la medición ya que no hacen parte del montaje. Con este método, ha de suponer que los electrodos están dentro del concreto y esto hace que sólo tenga aplicación a probetas o estructuras de concreto sin sometimiento a fallas, las especificaciones acerca de este ensayo se encuentran en la norma UNE 83988-1 de 2008.



Fotografía 6. Medición de la resistividad eléctrica del concreto por el método directo. 27 de febrero de 2015.

Método de las cuatro puntas

Para medir la resistividad de estructuras existentes, es común emplear la sonda de cuatro puntas de Wenner²⁶. Se colocan los electrodos en línea separados una distancia “a” (inferior al espesor de recubrimiento) entre sí, se aplica una corriente alterna a través de los electrodos de los extremos (corriente alterna con una frecuencia entre 50 y 1000 Hz, normalmente sinusoidal) y la caída de potencial resultante se mide con los electrodos intermedios. La resistividad es:

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (4)$$

Figura 7. Medición de la resistividad eléctrica del concreto por el método de las cuatro puntas. (a) Montaje, (b) Resistivímetro de cuatro puntas.



(a)



(b)

Fuente: <http://goo.gl/fGR4Zk>

6.1.4.3 Interpretación y utilidad de la resistividad eléctrica del concreto

Durante el periodo de iniciación de la corrosión, la resistividad del hormigón se relaciona con la penetración de iones cloruro y del CO₂ del ambiente; en el periodo de propagación, se correlaciona con la velocidad de corrosión²⁷.

Dentro de una estructura, los puntos de baja resistividad indican dónde será más rápida la penetración de cloruros. Los mapas de resistividad no muestran si el acero del hormigón se está corroyendo; esta información se obtendrá con otros métodos: análisis de cloruros, profundidad de carbonatación, mapas de potencial, resistencia

²⁶ POLDER, R; Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. Recommendation of RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion. Materials and Structures, Vol.33, December 2000, 603-611.

²⁷ CASTELLOTE, M. Andrade, C. and Alonso, M.C; Standardization, to a reference of 25°, of Electrical Resistivity for Mortars and Concretes in Saturated or Isolated Conditions. ACI Materials Journal, Vol.99 N°2, March-April 2002, 119-128.

de polarización e inspección visual del acero. Si el acero se está corroyendo, los mapas de resistividad indicarán en qué zonas la corrosión será mayor²⁸.

Por lo tanto, las medidas de resistividad pueden ser útiles para los siguientes objetivos:

- Obtener una evaluación del valor (o rango de valores) de la resistividad eléctrica del concreto de una estructura, para tener en cuenta el riesgo de corrosión de la estructura.
- Obtener la localización de las zonas más permeables de la estructura de concreto para la definición de otras investigaciones o medidas de protección.
- Localización de los puntos con mayor exposición al agua y a agentes agresivos disueltos.
- Obtener la ayuda para diseñar sistemas de protección catódica y otros tratamientos electroquímicos.
- Control de calidad del concreto en la fase de producción.

Otras fuentes indican que la resistividad eléctrica del hormigón ha demostrado ser un parámetro efectivo para evaluar el riesgo de corrosión de la armadura, independientemente del tipo de mezcla y de las condiciones de exposición. Las barras parecen alcanzar un estado activo de corrosión cuando la resistividad es menor que 10 (kΩcm), y un comportamiento pasivo cuando la resistividad es mayor que 30 (kΩcm)²⁹.

²⁸Ibid. P. 611.

²⁹MORRIS, W., VICO, A., VÁSQUEZ, M. y DE SÁNCHEZ, S; Corrosion of rein forcing steele valuated by means of concrete resistivity measurements. Corrosion Science, Vol. 44 (2002), 81-99.

Tabla 3. Criterios para interpretar las medidas de resistividad

Fuente	Resistividad	Clasificación de la corrosión
Vassie	> 12 kΩcm 5 a 12 kΩcm < 5 kΩcm	Corrosión poco probable Corrosión probable Corrosión casi segura
Polder	> 100 kΩcm 50 a 100 kΩcm 10 a 50 kΩcm < 10 kΩcm	Riesgo de corrosión despreciable Riesgo de corrosión bajo Riesgo de corrosión moderado Riesgo de corrosión alto
Rodriguez et al	> 100 kΩcm 50 a 100 kΩcm 10 a 50 kΩcm < 10 kΩcm	Velocidad de corrosión muy lenta incluso con hormigón carbonatado o contaminado por cloruros Velocidad de corrosión lenta Corrosión de moderada a alta cuando el acero este activo La resistividad no controla la velocidad de corrosión
Schiessel and Raupach	> 20 kΩcm 10 a 20 kΩcm 5 a 10 kΩcm < 5 kΩcm	Velocidad de corrosión lenta Velocidad de corrosión moderada/lenta Velocidad de corrosión alta Velocidad de corrosión muy alta
CEB-192	> 20 kΩcm 10 a 20 kΩcm 5 a 10 kΩcm < 5 kΩcm	Velocidad de corrosión despreciable Velocidad de corrosión bajo Velocidad de corrosión alto Velocidad de corrosión muy alto

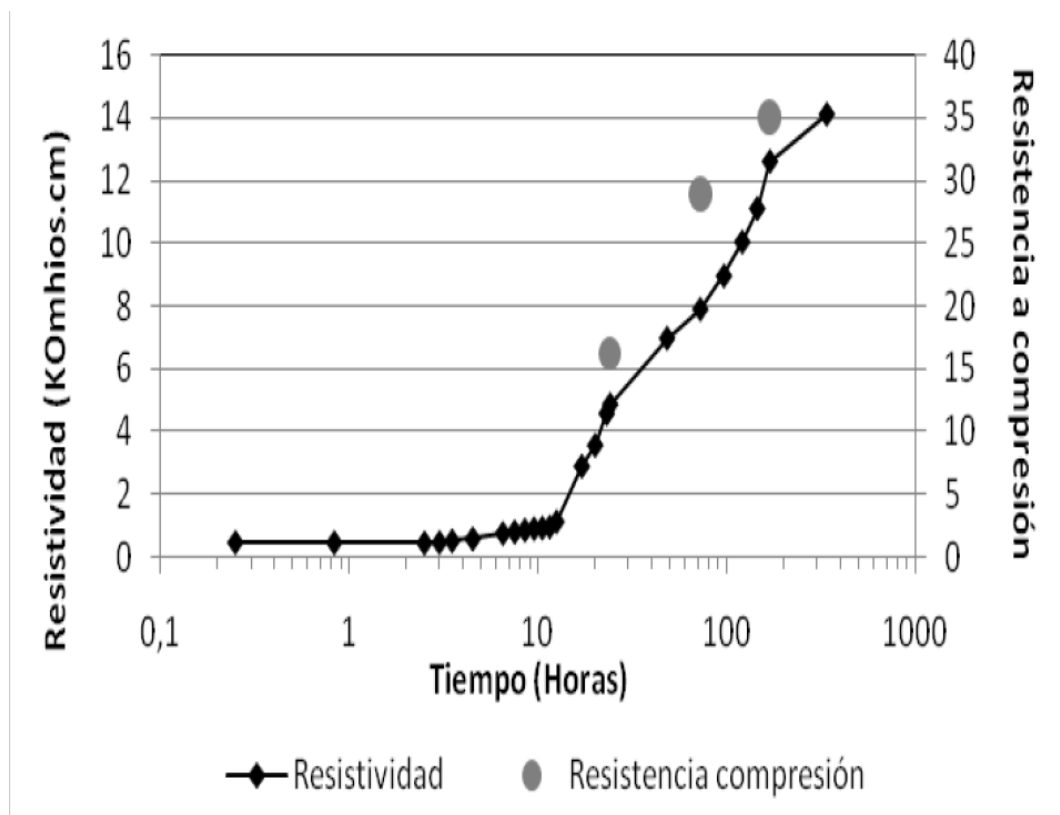
Fuente: GONZÁLEZ SERSEN, Álvaro Mauricio; Estudio experimental de la relación entre la resistividad eléctrica del hormigón y su resistencia a la penetración de iones cloruro; Santiago, Chile, 2011; memoria para optar el título de ingeniero civil; Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas; p. 61.

6.1.4.4 Relación entre la resistividad del concreto y el desarrollo de sus propiedades

La resistividad del concreto es un reflejo de las propiedades que desarrolla él en relación a la porosidad, pues a medida que aumenta el tiempo endurecido del concreto, la porosidad tendera a ser menor y por lo tanto la resistividad mayor, como ya se había mencionado anteriormente. Por lo tanto, ésta relación entre la resistividad y la porosidad también afecta a otras como por ejemplo: si la resistividad es mayor, quiere decir que la permeabilidad necesariamente debe ser menor, es decir que el material debe ser más impermeable (pues la porosidad es muy pequeña); si la permeabilidad es menor, quiere decir que la resistencia a la carbonatación y al agrietamiento, deberán ser mayores, pues como se explicó con anterioridad estos parámetros se encuentran relacionados.

Un comportamiento muy similar al de la porosidad se da con la resistencia a la compresión del concreto, cuando el periodo de endurecimiento del concreto es mayor, su resistencia a la compresión aumenta y cuando este parámetro es confrontado ante la resistividad que desarrolló el material, se encuentra que presenta un crecimiento de tendencia paralela, de tal manera que aumenta la resistencia del concreto, también los hace la resistividad eléctrica. A continuación se muestra en la figura 6, la relación entre resistividad y resistencia a la compresión explicada anteriormente: donde se evidencia como a mayores tiempos de endurecimiento, ambos valores son altos, en cambio en las primeras horas de endurecimiento ambos valores son muy bajos para la resistividad y nulos para la resistencia a compresión, lo que se debe a que en estas primeras horas, el concreto todavía no ha desarrollado una resistencia significativa y la muestra es muy húmeda por lo que es muy buen conductor, es decir, presenta poca resistividad.

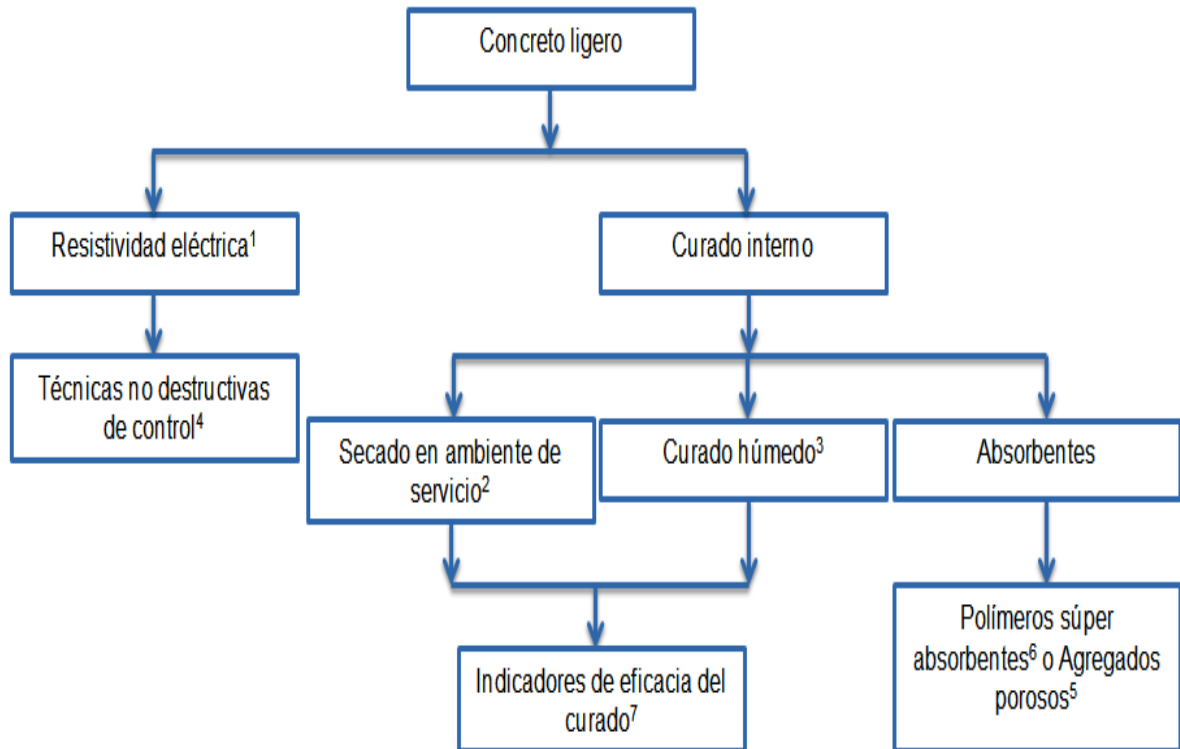
Gráfica 1. Desarrollo de la resistividad y la resistencia a la compresión durante el tiempo de endurecimiento del concreto.



Fuente: ANDRADE, C; R.D, Andrea; la resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. En: revista ALCONPAT. Vol 1. No. 2(Mayo-Agosto, 2011).pág. 93-101. P.96.

6.2 MAPA CONCEPTUAL

¿Cuál es la influencia del curado interno en la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica de un concreto ligero usando como agregado grueso piedra pómez?



1. R.D. La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. En: revista ALCONPAT. Nº 2 (agosto, 2011). Página. 93-101.
2. TAPIA, Patricio; VIDELA, Carlos, Efectos de secado en ambiente de servicio en la evolución de las propiedades mecánicas de hormigones estructurales livianos. En: revista ingeniería de construcción Vol. 22. Nº 2 (agosto, 2007).
3. MORENO, Eric; SERRANO ZEBADURA, Carlos; SOLIS – CARCAÑO, Romel G, Influencia del tiempo de curado húmedo en la resistencia y durabilidad del concreto en clima tropical. En: revista investigación y desarrollo Vol. 4 Nº 2 (enero – junio, 2013). Página 15-25.
4. FERNÁNDEZ LUCO, L., Valoración de las técnicas no destructivas para el control de la eficiencia de curado del hormigón. San Vicente del Raspeig, España, 2008 Tesis doctoral. Universidad de Alicante.
5. ROZAS CÁRDENAS, Roberto Eduardo. Permeabilidad de medios porosos. Experimentos numéricos y teoría. Tesis para optar por el grado de mágister (Ciencias de la ingeniería con mención en ingeniería química). Universidad de Concepción, Chile, septiembre 2012.
6. LÓPEZ, Mauricio. Curado interno en hormigones de alto desempeño – Un nuevo paradigma. En: revista ingeniería de construcción. Nº 20. (agosto, 2005). Página 117-126.
7. LUCO FERNÁNDEZ, Luis. Propuesta de indicadores del curado en obra. En: revista investigación y desarrollo. Nº 2. (junio, 2010). Página 17-30.

6.3 MARCO LEGAL

La norma ACI (American Concrete Institute), es la principal norma técnica internacional para regular todos aquellos factores necesarios para la producción del concreto, como por ejemplo: los agregados, características del cemento, los procesos de curado y demás; por lo tanto, para cualquier trabajo de investigación que involucre la producción de concreto es necesario seguir las normas dictadas por la ACI; para este caso, las normas ACI de principal interés son la ACI 213R y la ACI 308.

Como primera norma, se encuentra la ACI 213R-2003, en la cual se habla sobre el concreto, específicamente de los agregados (normal y ligero), definiendo al concreto ligero en términos de densidad (máxima de 1850 kg/m³) y resistencia a la compresión (f'_c no menor a 17Mpa). La norma ACI también abarca entre muchas otras la definición y proceso de curado para el concreto (ACI 308-92), que es fundamental para la elaboración de este y lo define como el proceso por el cual se busca mantener el concreto en condición saturada de modo tal que se permita el desarrollo de las propiedades de la matriz cementante³⁰.

El método de control por medio de la resistividad eléctrica del concreto, debido a que es un método reciente de control (no destructivo) no se encuentra normalizado por las normas nacionales, NTC, por lo tanto; la guía para realizar este tipo de ensayo se encuentra en la norma española UNE en la cual se establece el método de Wenner o de las cuatro puntas para determinar la resistividad eléctrica del concreto (UNE 83988).

Al igual que la ACI, la NTC que es la norma técnica colombiana establecida por el ICONTEC haciendo una adaptación de la ASTM, contempla también todos los factores necesarios para la producción de concreto requeridos para la realización de este trabajo.

Dentro de la Norma Técnica Colombiana (NTC) que es una adaptación de la American Society for Testing and Materials (ASTM), se destacan 3 reglamentos básicos para el concreto liviano, estas son la NTC 396, sobre la cual se establece el método para determinar el asentamiento del concreto y también se dan los parámetros de asentamiento para el concreto ligero, que es un reglamento básico, ya que la calidad del concreto depende de su fluidez y por lo tanto de los asentamientos; sin embargo, no es el único parámetro clave en la calidad del concreto, por eso también es necesario el seguimiento de la NTC 673 (ASTM C39) que trata sobre los ensayos de resistencia a compresión para concretos (indicador clave de la calidad del concreto) e indica los parámetros para realizar el ensayo;

³⁰ AMERICAN INSTITUTE OF CONCRETE. Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete. ACI COMMITTEE. Estados Unidos de América: ACI COMMITTEE, 2003, 38h: il.(ACI 213R).

finalmente la NTC 1926 (ASTM C138/138M-13a) la cual abarca la determinación de la masa unitaria y el contenido de aire por gravimetría del concreto. Esta norma es esencial debido a que la característica principal del concreto ligero es precisamente su baja densidad y por lo tanto es necesario su determinación como forma de control para la elaboración.

Para los agregados, específicamente para los agregados ligeros para concreto estructural se encuentra la NTC 4045 (ASTM C330) en donde se dan las composición química, características generales y propiedades físicas de los agregados ligeros que se pueden utilizar para la elaboración de concreto ligero, por medio de esta norma es que se hace posible el uso de la piedra pómez (que es uno de los agregados ligeros más comunes) que es el medio principal para desarrollar esta investigación.

De forma general todos los parámetros para la elaboración de concreto se encuentran estipulados en la NSR-10 título C-concreto estructural; sin embargo, ésta norma solo servirá para tener una noción de los requisitos fundamentales para la producción del concreto, claro está teniendo en cuenta la normativas mencionadas con anterioridad, la causa de que precisamente este título de la norma sismo resistente colombiana trata sobre el concreto estructural, que es el concreto aplicado a las construcciones, a diferencia del usado en la investigación que solo consiste en probetas de concreto para realizar los ensayos de resistividad eléctrica y resistencia a la compresión.

7. DISEÑO METODOLÓGICO

7.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se realizará desde un enfoque cuantitativo³¹, debido a que el objetivo de esta es medir las propiedades del concreto ligero tales como la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica, pero adicional a esto también tendrá un enfoque cualitativo ya que se realizará un análisis de su desarrollo conforme a las distintas condiciones de curado a las que expone cada muestra, comparándolas entre sí.

7.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Al tener la investigación un enfoque cuantitativo y cualitativo, lo que se busca es medir de las propiedades antes mencionadas en diferentes condiciones de curado y compararlas entre sí a través de gráficas y tablas de datos, es decir que a las edades de 14, 28 y 60 días se hará una comparación de la resistividad eléctrica y resistencia a la compresión que se obtuvo en esas edades para evaluar su comportamiento y su desarrollo con el transcurso del tiempo.

La investigación corresponde al tipo experimental³², pues por este medio es posible la obtención de datos en las diferentes condiciones de curado a las que se expone el material (concreto ligero).

7.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

De forma general se pretende desarrollar la investigación por medio de la observación estructurada, análisis de datos e interpretación de gráficas, ya que específicamente durante la experimentación se desean analizar las propiedades de resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica que va a desarrollar el material a diferentes edades en distintas condiciones de curado.

Todo esto con el fin de determinar en qué condición de curado a la que fue expuesto el concreto ligero se obtuvieron mejores resultados de resistencia a la compresión

³¹ SAMPIERI HERNÁNDEZ, Roberto. Metodología de la investigación. 4 ed. México: Mc Graw Hill, 2006. 850 p. Metodología de la investigación ISBN 970-10-5753-8. P. 5

³² TAMAYO Y TAMAYO, Mario. Aprender a investigar modulo dos: la investigación. 4 ed. Colombia: ICFES, 140 p. Aprender a investigar. ISBN 958-9279-13-9. P. 45

y resistividad eléctrica, argumentando porque se obtuvieron esos resultados y llegando a una determinada conclusión.

7.3.1 Población y muestra

Cada condición de curado se analizará usando 5 probetas, es decir se tendrán 5 probetas para curado convencional, 5 probetas para curado interno (bajo techo) y 5 probetas para curado interno expuestas al ambiente, para cada condición de tiempo establecida para aplicar las pruebas resistencia a compresión, ya que los tiempos propuestos serán a la edad de 14, 28 y 60 días, se fallarán un total de 45 probetas durante toda la fase experimental de la investigación.

Las mezclas de concreto se realizarán usando los siguientes materiales:

- Piedra pómez.
- Cemento Portland Tipo I.
- Arena.
- Agua.

Para la elaboración del concreto se usará una dosificación de 1:2.5:1.5 con una relación W/c igual a 0.43 para las muestras con piedra pómez saturada y una relación de 0.8 para las muestras con piedra pómez sin saturar.

7.3.2 Constantes de la investigación

- **Piedra pómez:** en las mezclas de concreto se usarán para todos los casos un 100% de agregado grueso consistente en piedra pómez.
- **Relación agua cemento:** las muestras que tengan la piedra pómez saturada independientemente de la condición de curado, se realizarán con una W/C de 0.43, con el propósito de que se haga necesario efectuar el curado interno cuando corresponda y relación de 0.8 en el caso en el que se curara convencionalmente las probetas de concreto.

7.3.3 Variables de la investigación

- **Curado:** proceso por el cual se mantienen las condiciones de hidratación en la matriz cementante para el desarrollo de las propiedades del concreto.
- **Resistencia a la compresión:** corresponde al máximo esfuerzo que puede soportar el concreto bajo la acción de cargas de compresión hasta la falla.

- **Resistividad eléctrica:** es la resistencia que presenta un cuerpo al paso de la corriente eléctrica.

7.3.4 Operación de las variables

- **Curado:** la muestra de probetas se expondrá a dos condiciones de curado, una muestra se expondrá a curado convencional, y la otra estará bajo la influencia del curado interno.
- **Curado convencional:** las probetas se encontrarán en inmersión total hasta el día de la prueba de compresión o en su defecto el paso de los 28 días.
- **Curado interno:** la probetas estarán expuestas al ambiente, de tal forma que la cantidad de agua absorbida por la piedra pómez durante su periodo de saturación sea la utilizada para continuar con el proceso de hidratación.
- **Resistencia a la compresión:** se obtendrá usando la máquina de compresión universal, la cual aplicará la carga en KN, a una sección transversal medida en m^2 , de tal forma que la resistencia a la compresión se obtendrá en MPa.
- **Resistividad eléctrica:** para esta variable se usará el método directo de medición según UNE 83988-1 de 2008, en la cual se obtendrá la resistencia el concreto en $M\Omega$ utilizando un multímetro, aplicando la ecuación (2), se obtendrá la resistividad eléctrica del material en $K\Omega m$.

7.3.5 Procedimiento experimental

A continuación se especificarán el proceso para la elaboración de las probetas de concreto:

- Para la producción del concreto, se va a utilizar como medida principal una relación W/C del 0.43, esto con el fin de lograr la necesidad de desarrollar un curado interno en el proceso de formación del concreto.
- El agregado ligero a utilizar es la piedra pómez con un tamaño máximo nominal de 3/4" y el agregado fino será arena de río.
- Se utilizará cemento portland tipo 1.
- La dosificación del cemento será de 1: 2.5: 1.5 con una relación W/c de 0.43 para efectuar curado interno y de 0.80 para el caso de las probetas sometidas a curado convencional.
- Para la elaboración de las probetas de concreto liviano además de seguir los ítems mencionados anteriormente, se debe tener en cuenta la saturación de la piedra pómez para los casos en los cuales se quiera desarrollar el proceso

de curado interno; es decir, para la muestra de referencia el agregado liviano se agregará en estado seco, de tal manera que no exista la posibilidad de un curado interno en el proceso de formación del concreto, mientras que para las muestras en donde se requiera del curado interno (las demás probetas de ensayo), la piedra pómez deberá agregarse en estado saturado.

El proceso experimental se llevará a cabo de la siguiente manera:

- Saturación del agregado ligero (piedra pómez), con el propósito de que este absorba agua durante un periodo de 48 horas para que se pueda efectuar el curado.
- Elaboración de las probetas de concreto de referencia con agregado seco, siguiendo las especificaciones sobre la elaboración del concreto mencionadas con anterioridad.
- Elaboración de las probetas para análisis de curado interno con agregado ligero saturado.
- Para las probetas de referencia se les realizará el proceso de curado durante 28 días, a excepción de la primera muestra a la cual se le realizará la prueba de compresión a los 14 días.
- Las probetas para analizar el curado interno (utilizando el agregado en condición saturada), se expondrán a las siguientes condiciones: una muestra estará en condición bajo techo (condiciones controladas); la otra muestra estará en el exterior (expuesta al ambiente).
- Las pruebas destructivas para medir la resistencia última a la compresión del concreto se realizarán a las edades de 14, 28 y 60 días.
- La prueba no destructiva, es decir la medición de la resistividad, se realizará a las edades de 3, 7, 14, 21, 28 y de ahí en adelante se medirá cada 7 días hasta llegar a los 60 días de edad, en la cual se realizará la última prueba destructiva.

7.4 FASES DE LA INVESTIGACIÓN

Tabla 4. Fases de la investigación.

F A S E	TÍTULO	DESCRIPCIÓN
1	<p>Efecto del curado interno sobre la resistencia a la compresión</p>	<p>En esta fase se recolectarán los datos obtenidos de resistencia a la compresión para cada ensayo, teniendo en cuenta que este se reunirán los datos únicamente de la misma edad a la que se falló el concreto, es decir se tendrá un grupo de resistencia para la edad de 14 días, otro para la de 28 y un tercero para la edad de 60 días.</p> <p>Cada grupo de resistencias a la compresión obtenido se divide a su vez en tres subgrupos, uno correspondiente a la prueba patrón (curada convencionalmente); un segundo subgrupo en el cual se registrarán los datos de la muestra expuesta a curado interno bajo techo y el tercero que corresponderá a las muestra expuesta a curado interno al medio ambiente. En la tabla 4, se encuentra el esquema para el registro de datos.</p> <p>Con los datos obtenidos se realizarán gráficas y luego se compararán las resistencias obtenidas para cada condición de curado, con el fin de obtener la condición más favorable de curado para la resistencia a la compresión.</p>
2	<p>Efecto del curado interno en la resistividad eléctrica</p>	<p>En esta fase se llevará a cabo la recolección de datos obtenidos de resistividad eléctrica del concreto ligero, el registro se llevará a cabo de forma similar a la anterior fase; sin embargo, los periodos en los cuales se medirá la resistividad será a las edades de 3, 7, 14, 21, 28 y cada 7 días después de esta última edad hasta llegar a 60 días.</p> <p>Al igual que en la fase anterior, se encontrará la tendencia que mejor se adapte a los datos obtenidos y se compararán dichos datos entre las condiciones de curado, para determinar la condición más favorable.</p>

F A S E	TITULO	DESCRIPCIÓN
3	Relación entre resistencia a la compresión y resistividad eléctrica	<p>En esta fase se compararán las gráficas obtenidas de resistencia a la compresión y resistividad eléctrica para los mismos subgrupos utilizados en las dos fases anteriores; sin embargo, se tendrán en cuenta los datos obtenidos para todas las edades a las cuales se realizó medición, es decir, se evaluará para cada subgrupo, pero se tendrán los valores de resistencia a la compresión de los 14, 28 y 60 días en una sola gráfica.</p> <p>Finalmente con las tres gráficas obtenidas en las cuales se compararán los valores de resistencia a la compresión y resistividad eléctrica para las respectivas edades, se podrá establecer la influencia que tiene el curado interno en las propiedades anteriormente mencionadas.</p>

Tabla 5. Formato para registro de datos de resistencia a la compresión.

Resistencia a la compresión a los 28 días						
No. Probeta	Diámetro (m)	Área (m ²)	Fuerza (KN)	Esfuerzo (KN/m ²)	Esfuerzo (Mpa)	Condición de curado
1						Curado convencional
2						
3						
4						
5						
1						Curado interno bajo techo
2						
3						
4						
5						
1						Curado interno expuesto al ambiente
2						
3						
4						
5						

Tabla 6. Formato para registro de datos de resistividad eléctrica.

Resistividad Eléctrica a los 3 días (prueba de resist. A compresión a los 60 días)						
Probeta No.	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Longitud (cm)	Resistencia (MΩ)	Resistividad Eléctrica (MΩcm)	Condición de curado
1						Curado convencional
2						
3						
4						
5						
1						Curado interno bajo techo
2						
3						
4						
5						
1						Curado interno expuesto al ambiente
2						
3						
4						
5						

8. DESARROLLO DE FASES DE LA INVESTIGACIÓN

8.1 ELABORACIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO

Las probetas de concreto se hicieron con una dosificación de 1:2.5:1.5 con una relación de agua cemento (W/c) de 0.43 para los probetas que se sometieron a curado interno y de 0.80 para los probetas que se expusieron a curado convencional.

Teniendo en cuenta que cada grupo de prueba consta de cinco probetas, a continuación se muestra en la tabla 7 los valores en peso para la fabricación de las cinco probetas de concreto.

Tabla 7. Cantidad en gramos para elaboración de 5 probetas de concreto.

Material	Cantidad (g)
Cemento	3830
Arena	9580
Piedra Pómez	5750
Agua (w/c=0.43)	1640
Agua (w/c=0.80)	3064

Las probetas tienen dimensiones tal que se cumpla la relación 1:2 que se establece en la NTC 673, por lo que tienen 10 cm de diámetro y 20 cm de altura.

El agregado grueso tuvo un tamaño máximo nominal de 3/4" con una distribución granulométrica que se muestra en los anexos; la densidad de la piedra pómez es de 0.99 g/cm³ y la capacidad de absorción es de 3.15% cuyos cálculos y procedimiento de laboratorio también se mostrará en los anexos.

Se utilizó cemento marca Cemex tipo I y arena de río.

Las probetas que se sometieron a curado interno, independiente de la condición, es decir, si es bajo techo o expuesto al ambiente se realizaron con la relación W/c 0.43 ya que al estar el agregado en condición saturada la relación debería ser baja; de lo contrario, el concreto sería demasiado fluido. De forma contraria, cuando el agregado usado se usó en condición seca, la relación W/c debió aumentarse hasta 0.80, pues de lo contrario el concreto quedaría totalmente seco.

Finalmente para asegurar que se trabajó con un concreto ligero, la densidad aparente que se obtuvo fue de 1582.47 kg/m³ y se encuentra resumida en tabla 8, que se muestra a continuación:

Tabla 8. Densidad aparente del concreto ligero

VARIABLE	CANTIDAD
Volumen (m ³)	1.6 x 10 ⁻³
Masa (kg) (promedio)	2.4857
Densidad aparente (kg/m ³)	1582.47

8.1.1 Registro fotográfico de elaboración de probetas de concreto



Fotografía 7. Trituración de agregado grueso. Tomada 25 de Febrero de 2015



Fotografía 8. Pesaje de muestra triturada para tamizar. Tomada 25 de febrero de 2015.



Fotografía 9. Tamizado de muestra de material triturado. Tomado 25 de Febrero de 2015.



Fotografía 10. Saturación de muestras de piedra pómez para probetas sometidas ha curado interno. Tomado 25 de febrero de 2015.



Fotografía 11. Cantidades de piedra pómez saturada y cemento para 5 cilindros. Tomado 27 de Febrero de 2015.



Fotografía 12. Mezcladora de concreto. Tomado 27 de Febrero de 2015.



Fotografía 13. Preparación de mezcla en el trompo. Tomado 27 de Febrero de 2015.



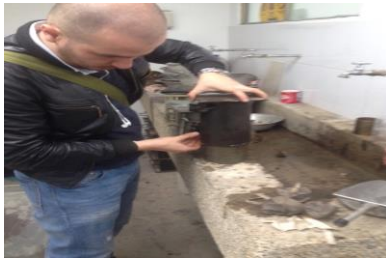
Fotografía 14. Mezcla de concreto con piedra pómez saturada. Tomado 27 de febrero de 2015.



Fotografía 15. Realización de cilindros de concreto con piedra pómez saturada. Tomado 27 de Febrero de 2015.



Fotografía 16. Probetas de concreto encofradas. Tomado 27 de febrero de 2015.



Fotografía 17. Desencofrado de cilindros de concreto. Tomado 28 de Febrero de 2015.



Fotografía 18. Marcación de cilindros de concreto. Tomado 28 de febrero de 2015.



Fotografía 19. Grupos de probetas en sus diferentes condiciones de curado; curado convencional (lado izq.); curado interno bajo techo (centro) y curado interno expuesto al ambiente (lado der.). Tomada 28 de febrero de 2015.

8.2 EFECTOS DE CURADO INTERNO

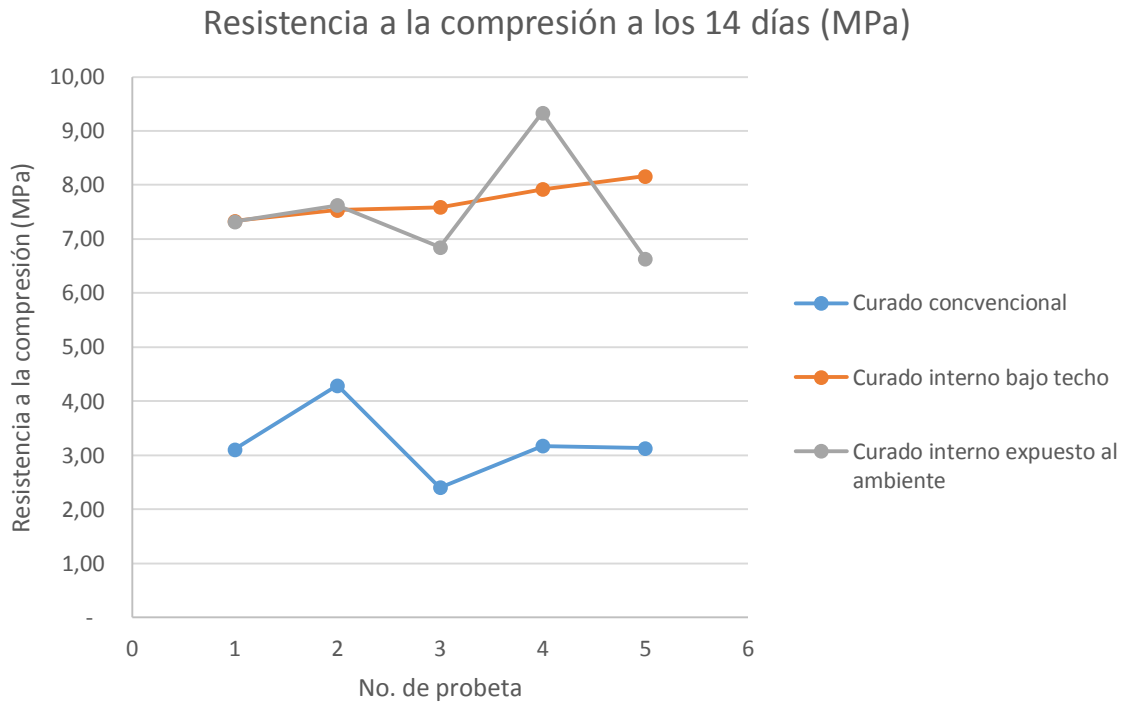
8.2.1 Fase 1: efecto del curado interno en la resistencia a la compresión

En esta fase se realizaron las pruebas de resistencia a la compresión para cada probeta en las edades de 14, 28 y 60 días. A continuación se presentan los resultados obtenidos para la edad de 14 días:

Tabla 9. Valores de resistencia a la compresión obtenidos en cada condición de curado a la edad de 14 días.

Resistencia a la compresión a los 14 días						
No. Probeta	Diámetro (m)	Área (m ²)	Fuerza (KN)	Esfuerzo (KN/m ²)	Esfuerzo (Mpa)	Condición de curado
1	0.10	0.01	24.40	3,106.70	3.11	Curado convencional
2	0.10	0.01	33.70	4,290.82	4.29	
3	0.10	0.01	18.90	2,406.42	2.41	
4	0.10	0.01	24.90	3,170.37	3.17	
5	0.10	0.01	24.60	3,132.17	3.13	
1	0.10	0.01	57.60	7,333.86	7.33	Curado interno bajo techo
2	0.10	0.01	59.20	7,537.58	7.54	
3	0.10	0.01	59.60	7,588.51	7.59	
4	0.10	0.01	62.20	7,919.55	7.92	
5	0.10	0.01	64.10	8,161.47	8.16	
1	0.10	0.01	57.50	7,321.13	7.32	Curado interno expuesto al ambiente
2	0.10	0.01	59.90	7,626.70	7.63	
3	0.10	0.01	53.80	6,850.03	6.85	
4	0.10	0.01	73.30	9,332.85	9.33	
5	0.10	0.01	52.10	6,633.58	6.63	

Grafica 2. Valores de resistencia a la compresión obtenidos en cada condición de curado a la edad de 14 días, para cada probeta.

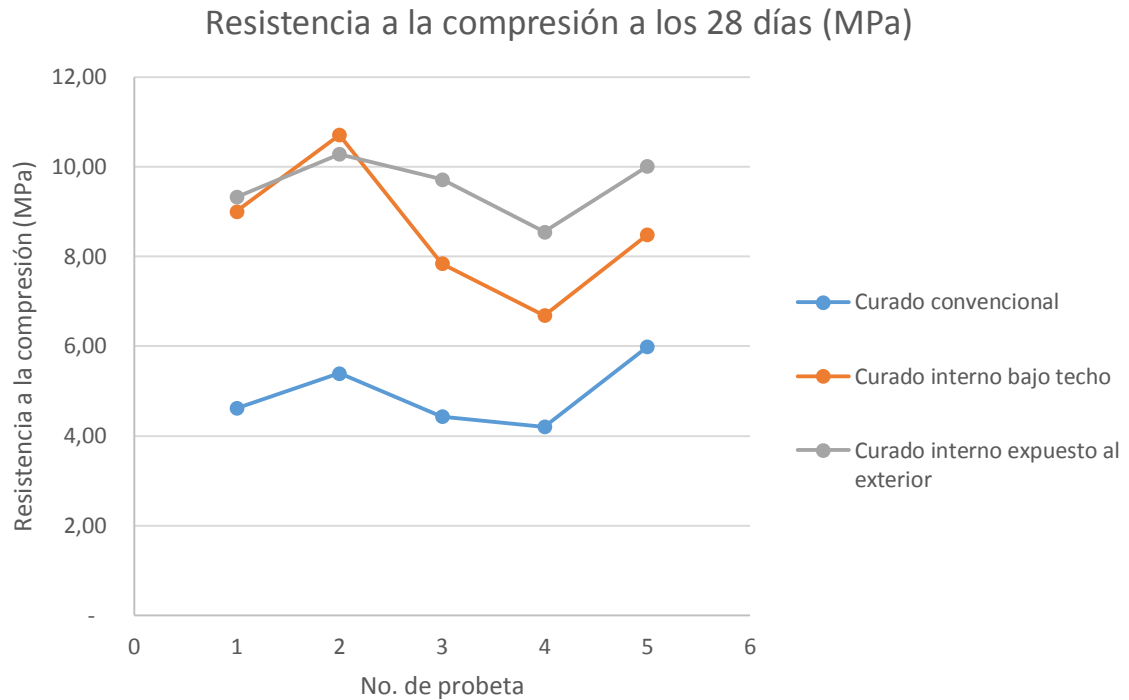


En la tabla 10, se muestran los valores obtenidos de resistencia a la compresión a los 28 días de edad:

Tabla 10. Valores de resistencia a la compresión obtenidos en cada condición de curado a la edad de 28 días.

Resistencia a la compresión a los 28 días						
No. Probeta	Díámetro (m)	Área (m ²)	Fuerza (KN)	Esfuerzo (KN/m ²)	Esfuerzo (Mpa)	Condición de curado
1	0.10	0.01	36.30	4,621.86	4.62	Curado convencional
2	0.10	0.01	42.40	5,398.54	5.40	
3	0.10	0.01	34.80	4,430.87	4.43	
4	0.10	0.01	33.00	4,201.69	4.20	
5	0.10	0.01	47.00	5,984.23	5.98	
1	0.10	0.01	70.70	9,001.80	9.00	Curado interno bajo techo
2	0.10	0.01	84.10	10,707.94	10.71	
3	0.10	0.01	61.60	7,843.16	7.84	
4	0.10	0.01	52.50	6,684.51	6.68	
5	0.10	0.01	66.60	8,479.78	8.48	
1	0.10	0.01	73.20	9,320.11	9.32	Curado interno expuesto al ambiente
2	0.10	0.01	80.70	10,275.04	10.28	
3	0.10	0.01	76.30	9,714.82	9.71	
4	0.10	0.01	67.10	8,543.44	8.54	
5	0.10	0.01	78.60	10,007.66	10.01	

Grafica 3. Valores de resistencia a la compresión obtenidos en cada condición de curado a la edad de 28 días, para cada probeta.

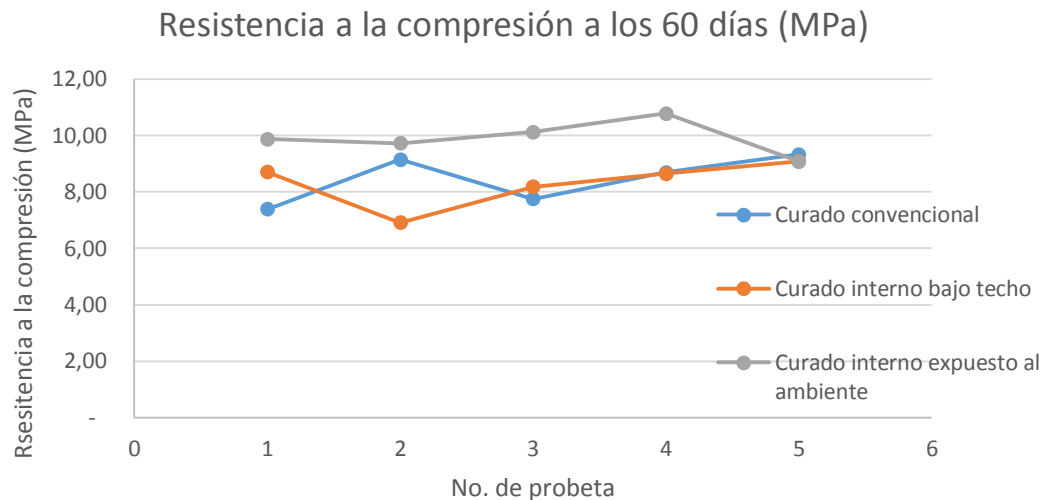


En la tabla 11 se presentan los valores de resistencia a la compresión obtenidos a los 60 días de edad; es decir, a la última edad de medición y vida del concreto.

Tabla 11. Resistencia a la compresión a los 60 días de edad.

Resistencia a la compresión a los 60 días						
No. Probeta	Diámetro (m)	Área (m ²)	Fuerza (KN)	Esfuerzo (KN/m ²)	Esfuerzo (Mpa)	Condición de curado
1	0,10	0,01	58,00	7.384,79	7,38	Curado convencional
2	0,10	0,01	71,90	9.154,59	9,15	
3	0,10	0,01	60,90	7.754,03	7,75	
4	0,10	0,01	68,30	8.696,23	8,70	
5	0,10	0,01	73,30	9.332,85	9,33	
1	0,10	0,01	68,40	8.708,96	8,71	Curado interno bajo techo
2	0,10	0,01	54,30	6.913,69	6,91	
3	0,10	0,01	64,30	8.186,93	8,19	
4	0,10	0,01	67,90	8.645,30	8,65	
5	0,10	0,01	71,40	9.090,93	9,09	
1	0,10	0,01	77,60	9.880,34	9,88	Curado interno expuesto al ambiente
2	0,10	0,01	76,40	9.727,55	9,73	
3	0,10	0,01	79,50	10.122,25	10,12	
4	0,10	0,01	84,70	10.784,34	10,78	
5	0,10	0,01	71,30	9.078,20	9,08	

Gráfica 4. Valores de resistencia a la compresión obtenidos en cada condición de curado a la edad de 60 días, para cada probeta.



Con los resultados obtenidos a lo largo de los 60 días de edad de concreto, se elaboró la tabla 12, en donde se presenta un resumen con los datos de resistencia obtenidos por cada probeta en la condición de curado a la que fue expuesta. De la tabla anterior se desprende la tabla 13, en donde se halla el valor de la resistencia a la compresión promedio de las cinco probetas en los días correspondientes días de este ensayo.

En la gráfica 5, se muestra el comportamiento que tuvo la resistencia a la compresión durante los 60 días de vida del concreto en cada condición de curado; finalmente, en las tablas siguientes a la gráfica, se encuentran los porcentajes de ganancias de resistencia entre las condiciones de curado interno respecto del curado convencional y también se encuentran la ganancia obtenida entre las misma condición, respecto de la edad anterior de realización del ensayo.

Tabla 12. Resumen de valores de resistencia a la compresión obtenidos hasta los 60 días de edad.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN POR CONDICIÓN DE CURADO Y POR DÍAS (Mpa)									
No. Probeta	CONDICIÓN DE CURADO								
	Curado convencional			Curado interno bajo techo			Curado interno expuesto al ambiente		
	14 días	28 días	60 días	14 días	28 días	60 días	14 días	28 días	60 días
1	3,11	4,62	7,38	7,33	9,00	8,71	7,32	9,32	9,88
2	4,29	5,40	9,15	7,54	10,71	6,91	7,63	10,28	9,73
3	2,41	4,43	7,75	7,59	7,84	8,19	6,85	9,71	10,12
4	3,17	4,20	8,70	7,92	6,68	8,65	9,33	8,54	10,78
5	3,13	5,98	9,33	8,16	8,48	9,09	6,63	10,01	9,08
PROMEDIO	3,22	4,93	8,46	7,71	8,54	8,31	7,55	9,57	9,92

Tabla 13. Resistencia a la compresión promedio a los 14, 28 y 60 días de edad en cada condición de curado.

CONDICIÓN DE CURADO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)		
	14 días	28 días	60 días
Curado convencional	3,22	4,93	8,46
Curado interno bajo techo	7,71	8,54	8,31
Curado interno al exterior	7,55	9,57	9,92

Grafica 5. Comportamiento de la resistencia a la compresión hasta los 60 días de edad en cada condición de curado.

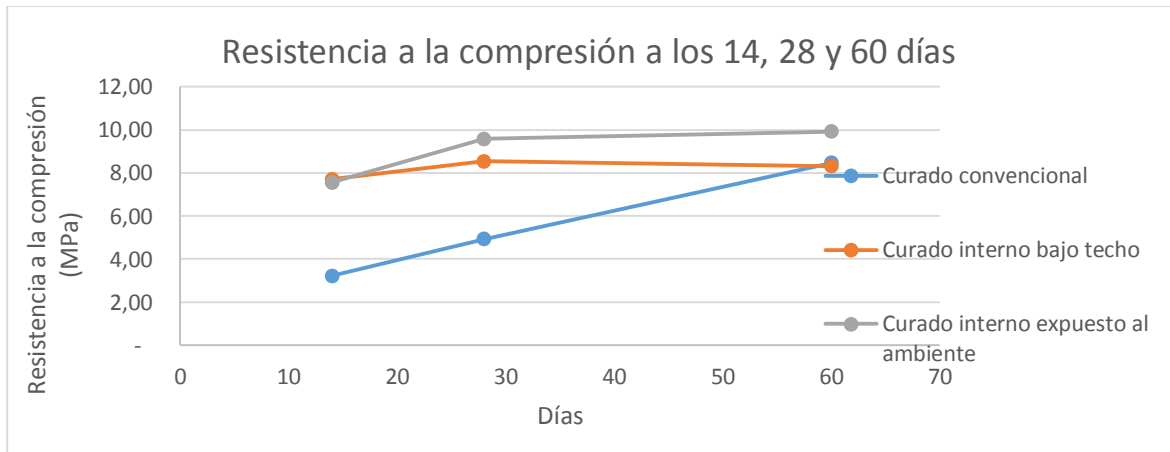


Tabla 14. Porcentaje de ganancia de resistencia a la compresión del grupo sometido a las condiciones de curado interno respecto del grupo sometido a la condición de curado convencional.

Diferencia de resistencia respecto al curado convencional (%)			
CONDICIÓN DE CURADO	14 días	28 días	60 días
Curado interno bajo techo	139%	73%	-2%
Curado interno al exterior	134%	94%	17%

Tabla 15. Porcentaje de ganancia de resistencia a la compresión respecto de la edad anterior de medición en cada condición de curado.

Condición de curado	Porcentaje de ganancia	
	28 días	60 días
Curado convencional	53%	72%
Curado interno bajo techo	11%	-3%
Curado interno expuesto al ambiente	27%	4%

8.2.2 Fase 2: Efecto del curado interno en la resistividad eléctrica

Esta segunda fase de la investigación se desarrolló simultáneamente con los periodos de falla de los cilindros, pues como se mostrará más adelante los datos obtenidos de resistencia a la compresión (mostrados en la fase 1) van acompañados de una serie de datos de resistividad eléctrica.

Los valores de resistividad se midieron en fechas específicas, las cuales se encuentran registradas en el formato mostrado con anterioridad (tabla 5) y teniendo en cuenta que los periodos de fallas son a los 14, 28 y 60 días de edad, para estas dos primeras edades se tendrán tres grandes grupos (45 probetas) con valores de resistividad eléctrica hasta la edad de 14 días, 30 probetas con valores de resistividad eléctrica hasta los 28 días de edad y finalmente 15 probetas con valores de resistividad eléctrica hasta le edad de 60 días.

La forma en que se realizó la medición de la resistividad eléctrica fue por medio del método directo (norma UNE 83988), que consiste en la medición de la resistencia de la probeta de concreto para inmediatamente aplicar la ecuación (3) presentada en la sección 6.1.4.1.

El equipo utilizado para medir la resistencia fue un multímetro marca TMC-80, el proceso fue el siguiente:

- Humedecimiento de los electrodos con agua.
- Poner cada electrodo a un extremo de la probeta (con el multímetro previamente calibrado en resistencia) y esperar a la estabilización del multímetro tomando el dato arrojado por este, el valor de resistencia daba en mega ohmios (M Ω).

A continuación en la fotografía 20 se muestra el esquema para la medición de la resistencia eléctrica, para el posterior cálculo de la resistividad eléctrica de la probeta.

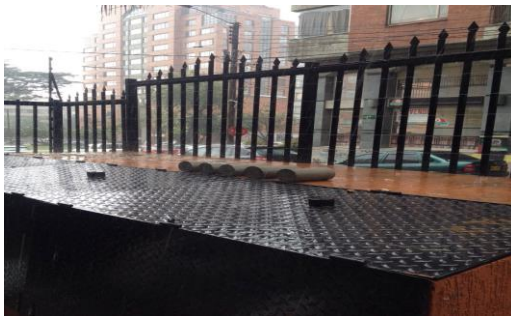


Fotografía 20. Medición de resistencia con multímetro marca TMC-80. Tomada 3 de Marzo de 2015.

Para la medición de la resistividad eléctrica cabe destacar que el contenido de humedad en los cilindros era un factor muy influyente a la hora de hacer la medición, ya que era mucho más fácil hacer la medición cuando los cilindros no estaban tan húmedos superficialmente que cuando si lo estaban; es decir, el multímetro logra una mayor estabilidad cuando no estaba tan húmedo el cilindro de concreto.

Otro factor influyente es que tan compactado estuviera el cilindro de concreto, ya que a menor cantidad de vacíos presentes en este el valor de resistencia sería alto, por lo contrario si en el cilindro quedaron varios vacíos esto se verá reflejado en un valor bajo de resistencia.

Para tener una idea más específica de las condiciones climáticas a las cuales fueron expuestos los 15 cilindros al ambiente, se tomó un registro climático desde el primer día en el que fueron expuestos hasta el último, que es el día en el que se fallarán a compresión. Estos datos se mostrarán en un anexo al final del proyecto.



Fotografía 21. Muestras de 60 días expuestas a la lluvia. Tomada 6 de Marzo de 2015.



Fotografía 22. Muestras de 60 días expuestas al sol. Tomada 14 de Marzo de 2015.

8.2.2.1 Resistividad eléctrica hasta 14 días (primera edad de medición de resistencia a la compresión)

Teniendo en cuenta que para esta edad del concreto se obtuvieron 45 valores de resistividad cada uno perteneciente a una condición de curado específica y para una edad de medida de resistencia a la compresión específica, en este primer grupo de edades puede calcularse un valor promedio y adicional a esto puede verificarse y/o aumentarse el nivel de confianza de los resultados.

En primer lugar se presentan los resultados obtenidos para los tres días de edad del concreto. En la Tabla 16 se encuentran registrados los valores de resistividad eléctrica para las probetas cuya prueba de resistencia a la compresión se realizará a los 60 días de edad, en las tablas 17 y 18 se presentarán los valores de resistividad eléctrica para las probetas cuyos edades para ensayo de resistencia a la compresión corresponden a los 28 y 14 días respectivamente.

Durante estos tres días primeros días, los cilindros con condición de curado interno expuesto al ambiente, estuvieron sometidos a temperaturas máximas de 21°C y mínimas de 8°C con precipitaciones de 3mm.

Tabla 16. Resistividad eléctrica a los 3 días de edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días.

Resistividad Eléctrica a los 3 días (prueba de resist. A compresión a los 60 días)						
Probeta No.	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Longitud (cm)	Resistencia (M Ω)	Resistividad Eléctrica (M Ω cm)	Condición de curado
1	10.00	78.54	20.00	1.95	7.66	Curado convencional
2	10.00	78.54	20.00	1.18	4.63	
3	10.00	78.54	20.00	1.42	5.58	
4	10.00	78.54	20.00	1.83	7.19	
5	10.00	78.54	20.00	1.25	4.91	
1	10.00	78.54	20.00	1.98	7.78	Curado interno bajo techo
2	10.00	78.54	20.00	2.05	8.05	
3	10.00	78.54	20.00	1.78	6.99	
4	10.00	78.54	20.00	2.09	8.21	
5	10.00	78.54	20.00	1.95	7.66	
1	10.00	78.54	20.00	6.56	25.76	Curado interno expuesto al ambiente
2	10.00	78.54	20.00	6.72	26.39	
3	10.00	78.54	20.00	6.32	24.82	
4	10.00	78.54	20.00	6.62	26.00	
5	10.00	78.54	20.00	6.54	25.68	

Grafica 6. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 3 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días.

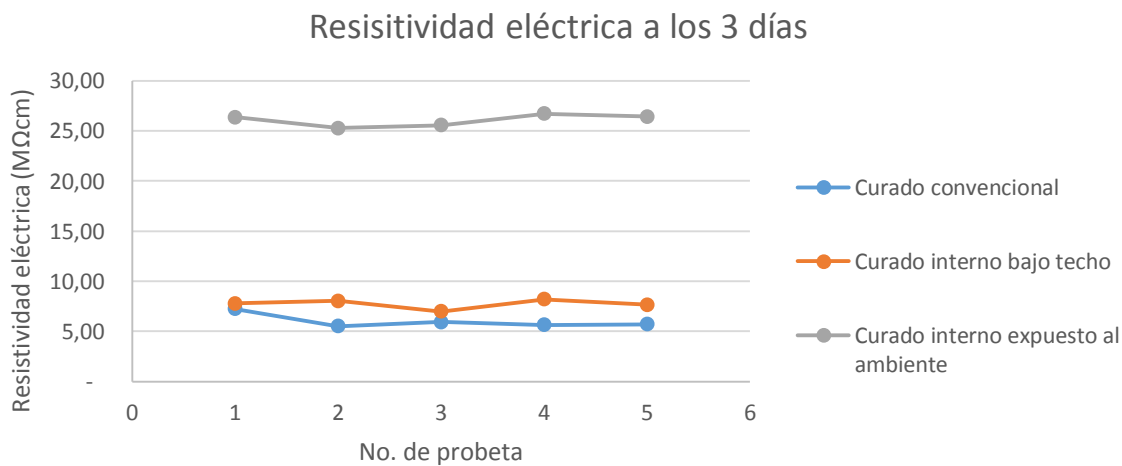


Tabla 17. Resistividad eléctrica a los 3 días de edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días.

Resistividad Eléctrica a los 3 días (prueba de resist. A compresión a los 28 días)						
Probeta No.	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Longitud (cm)	Resistencia (M Ω)	Resistividad Eléctrica (M Ω cm)	Condición de curado
1	10.00	78.54	20.00	1.60	6.28	Curado convencional
2	10.00	78.54	20.00	1.81	7.11	
3	10.00	78.54	20.00	2.28	8.95	
4	10.00	78.54	20.00	1.79	7.03	
5	10.00	78.54	20.00	2.00	7.85	
1	10.00	78.54	20.00	2.02	7.93	Curado interno bajo techo
2	10.00	78.54	20.00	1.72	6.75	
3	10.00	78.54	20.00	1.88	7.38	
4	10.00	78.54	20.00	2.25	8.84	
5	10.00	78.54	20.00	2.31	9.07	
1	10.00	78.54	20.00	6.86	26.94	Curado interno expuesto al ambiente
2	10.00	78.54	20.00	6.25	24.54	
3	10.00	78.54	20.00	6.82	26.78	
4	10.00	78.54	20.00	7.23	28.39	
5	10.00	78.54	20.00	6.45	25.33	

Gráfica 7. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 3 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días.

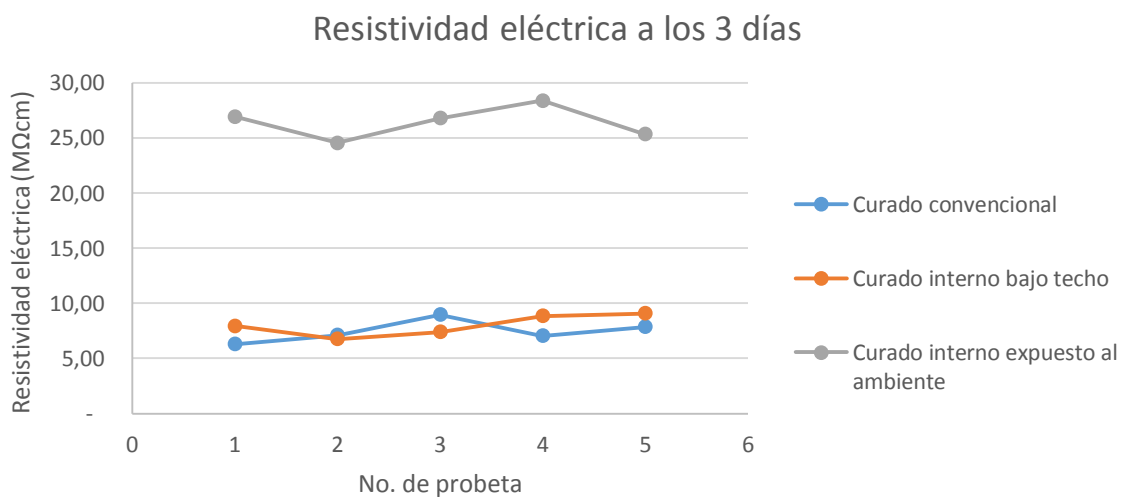
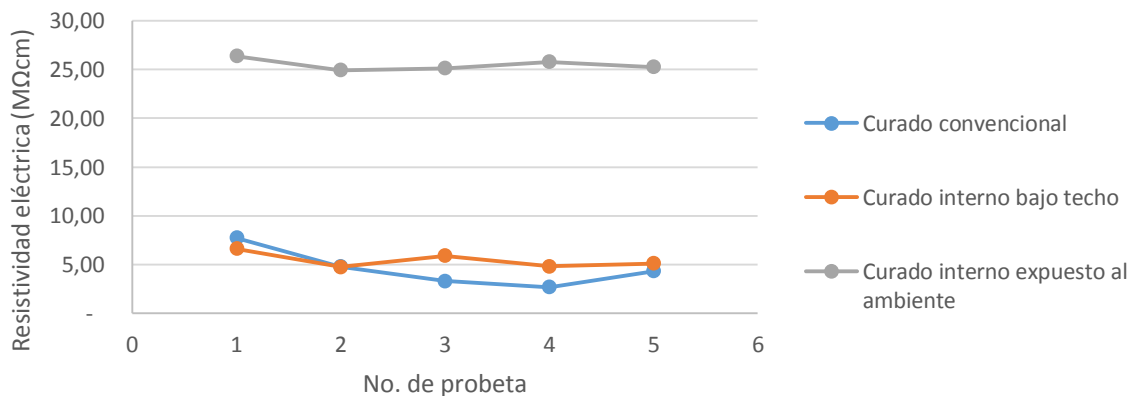


Tabla 18. Resistividad eléctrica a los 3 días edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 14 días.

Resistividad Eléctrica a los 3 días (prueba de resist. A compresión a los 14 días)						
Probeta No.	Díámetro (cm)	Área (cm ²)	Longitud (cm)	Resistencia (MΩ)	Resistividad Eléctrica (MΩcm)	Condición de curado
1	10.00	78.54	20.00	1.97	7.74	Curado convencional
2	10.00	78.54	20.00	1.22	4.79	
3	10.00	78.54	20.00	0.84	3.30	
4	10.00	78.54	20.00	0.68	2.67	
5	10.00	78.54	20.00	1.10	4.32	
1	10.00	78.54	20.00	1.69	6.64	Curado interno bajo techo
2	10.00	78.54	20.00	1.21	4.75	
3	10.00	78.54	20.00	1.50	5.89	
4	10.00	78.54	20.00	1.23	4.83	
5	10.00	78.54	20.00	1.30	5.11	
1	10.00	78.54	20.00	6.71	26.35	Curado interno expuesto al ambiente
2	10.00	78.54	20.00	6.35	24.94	
3	10.00	78.54	20.00	6.40	25.13	
4	10.00	78.54	20.00	6.56	25.76	
5	10.00	78.54	20.00	6.43	25.25	

Gráfica 8. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 3 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 14 días.

Resistividad eléctrica a los 3 días



Para los 7 días de edad las probetas se encontraron expuestas a temperaturas máximas de 22°C y mínimas de 7°C con niveles de precipitación hasta de 21 mm. A continuación se presentarán las tablas y gráficas con la correspondiente información:

Tabla 19. Resistividad eléctrica a los 7 días edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días.

Resistividad Eléctrica a los 7 días (prueba de resist. A compresión a los 60 días)						
Probeta No.	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Longitud (cm)	Resistencia (MΩ)	Resistividad Eléctrica (MΩcm)	Condición de curado
1	10.00	78.54	20.00	3.66	14.37	Curado convencional
2	10.00	78.54	20.00	3.05	11.98	
3	10.00	78.54	20.00	3.45	13.55	
4	10.00	78.54	20.00	3.63	14.25	
5	10.00	78.54	20.00	3.22	12.64	
1	10.00	78.54	20.00	6.58	25.84	Curado interno bajo techo
2	10.00	78.54	20.00	7.68	30.16	
3	10.00	78.54	20.00	7.25	28.47	
4	10.00	78.54	20.00	6.75	26.51	
5	10.00	78.54	20.00	7.42	29.14	
1	10.00	78.54	20.00	8.62	33.85	Curado interno expuesto al ambiente
2	10.00	78.54	20.00	8.80	34.56	
3	10.00	78.54	20.00	9.62	37.78	
4	10.00	78.54	20.00	9.89	38.84	
5	10.00	78.54	20.00	8.93	35.07	

Gráfica 9. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 7 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días.

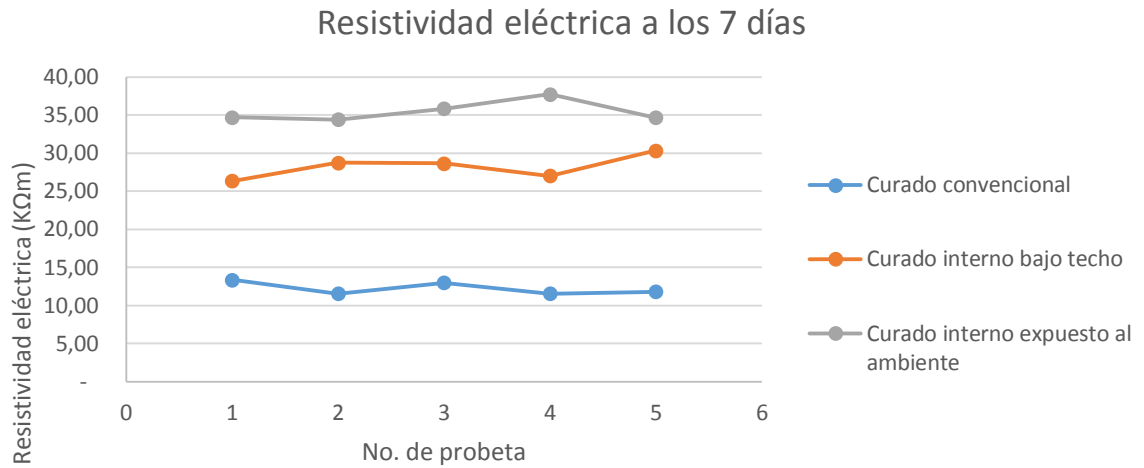


Tabla 20. Resistividad eléctrica a los 7 días de edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días.

Resistividad Eléctrica a los 7 días (prueba de resist. A compresión a los 28 días)						
Probeta No.	Díámetro (cm)	Área (cm ²)	Longitud (cm)	Resistencia (MΩ)	Resistividad Eléctrica (MΩcm)	Condición de curado
1	10.00	78.54	20.00	3.88	15.24	Curado convencional
2	10.00	78.54	20.00	3.01	11.82	
3	10.00	78.54	20.00	3.95	15.51	
4	10.00	78.54	20.00	3.53	13.86	
5	10.00	78.54	20.00	3.42	13.43	
1	10.00	78.54	20.00	7.25	28.47	Curado interno bajo techo
2	10.00	78.54	20.00	7.85	30.83	
3	10.00	78.54	20.00	8.58	33.69	
4	10.00	78.54	20.00	7.32	28.75	
5	10.00	78.54	20.00	8.94	35.11	
1	10.00	78.54	20.00	8.38	32.91	Curado interno expuesto al ambiente
2	10.00	78.54	20.00	7.76	30.47	
3	10.00	78.54	20.00	7.98	31.34	
4	10.00	78.54	20.00	9.35	36.72	
5	10.00	78.54	20.00	8.14	31.97	

Gráfica 10. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 7 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días.

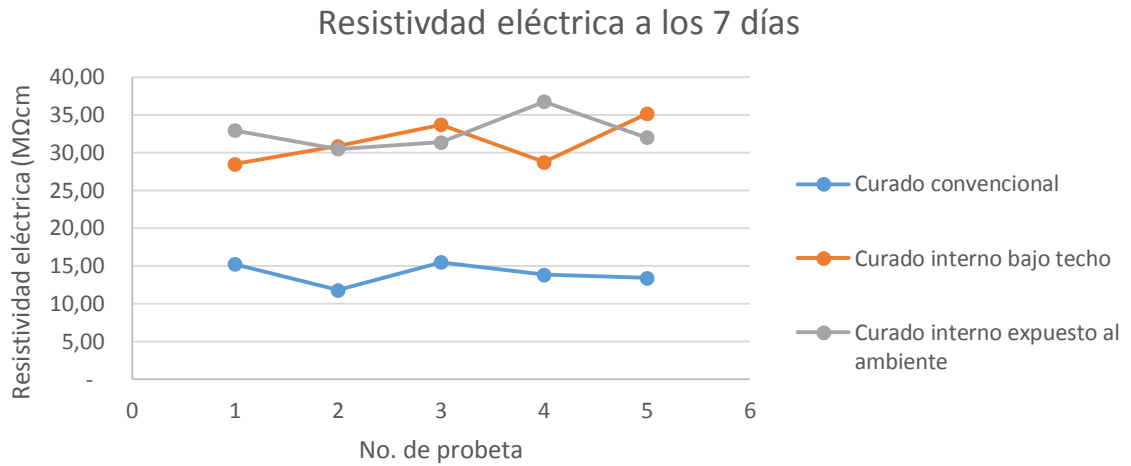
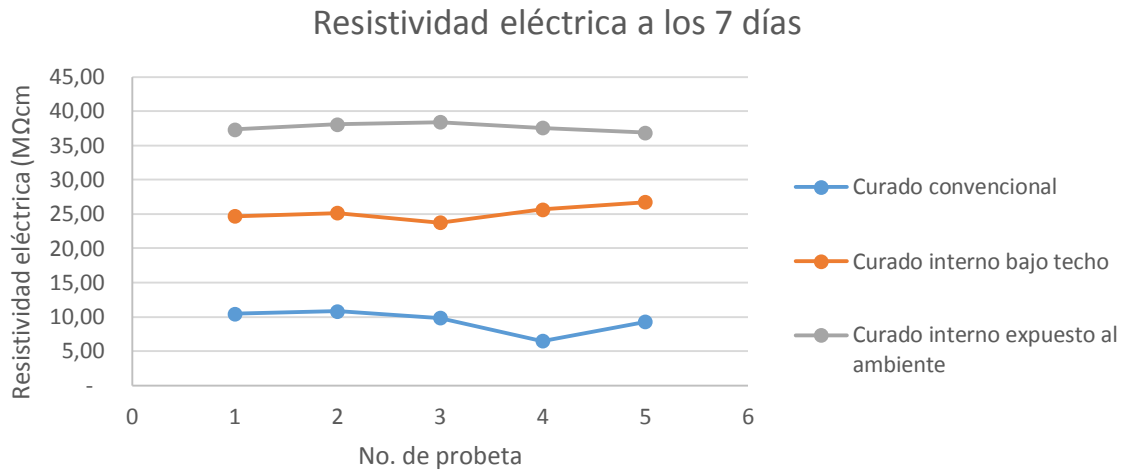


Tabla 21. Resistividad eléctrica a los 7 días de edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 14 días.

Resistividad Eléctrica a los 7 días (prueba de resist. A compresión a los 14 días)						
Probeta No.	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Longitud (cm)	Resistencia (MΩ)	Resistividad Eléctrica (MΩcm)	Condición de curado
1	10.00	78.54	20.00	2.66	10.45	Curado convencional
2	10.00	78.54	20.00	2.76	10.84	
3	10.00	78.54	20.00	2.51	9.86	
4	10.00	78.54	20.00	1.65	6.48	
5	10.00	78.54	20.00	2.37	9.31	
1	10.00	78.54	20.00	6.28	24.66	Curado interno bajo techo
2	10.00	78.54	20.00	6.41	25.17	
3	10.00	78.54	20.00	6.05	23.76	
4	10.00	78.54	20.00	6.54	25.68	
5	10.00	78.54	20.00	6.81	26.74	
1	10.00	78.54	20.00	9.51	37.35	Curado interno expuesto al ambiente
2	10.00	78.54	20.00	9.70	38.09	
3	10.00	78.54	20.00	9.78	38.41	
4	10.00	78.54	20.00	9.56	37.54	
5	10.00	78.54	20.00	9.39	36.87	

Gráfica 11. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 7 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 14 días.



En el caso de la prueba de resistividad para los 14 días de edad las temperaturas y precipitaciones a las que estuvieron expuestas las probetas en dicha condición de curado, coinciden con las del caso anterior ya que como no fueron realizadas en la misma fecha, los tiempo de exposición no son precisamente los mismos; sin embargo, el dato proporcionado de temperatura y precipitación de cada día para cada probeta puede consultarse en el registro de temperaturas presentado en los anexos.

A continuación se presentan las tablas y graficas con los datos de resistividad eléctrica para los 14 días de edad:

Tabla 22. Resistividad eléctrica a los 14 días de edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días.

Resistividad Eléctrica a los 14 días (prueba de resist. A compresión a los 60 días)						
Probeta No.	Díámetro (cm)	Área (cm ²)	Longitud (cm)	Resistencia (MΩ)	Resistividad Eléctrica (MΩcm)	Condición de curado
1	10.00	78.54	20.00	4.70	18.46	Curado convencional
2	10.00	78.54	20.00	4.71	18.50	
3	10.00	78.54	20.00	4.06	15.94	
4	10.00	78.54	20.00	4.45	17.48	
5	10.00	78.54	20.00	4.08	16.02	
1	10.00	78.54	20.00	10.34	40.61	Curado interno bajo techo
2	10.00	78.54	20.00	10.05	39.47	
3	10.00	78.54	20.00	10.85	42.61	
4	10.00	78.54	20.00	11.51	45.20	
5	10.00	78.54	20.00	10.25	40.25	
1	10.00	78.54	20.00	10.34	40.61	Curado interno expuesto al ambiente
2	10.00	78.54	20.00	10.11	39.70	
3	10.00	78.54	20.00	10.85	42.61	
4	10.00	78.54	20.00	10.54	41.39	
5	10.00	78.54	20.00	11.01	43.24	

Gráfica 12. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 14 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días.

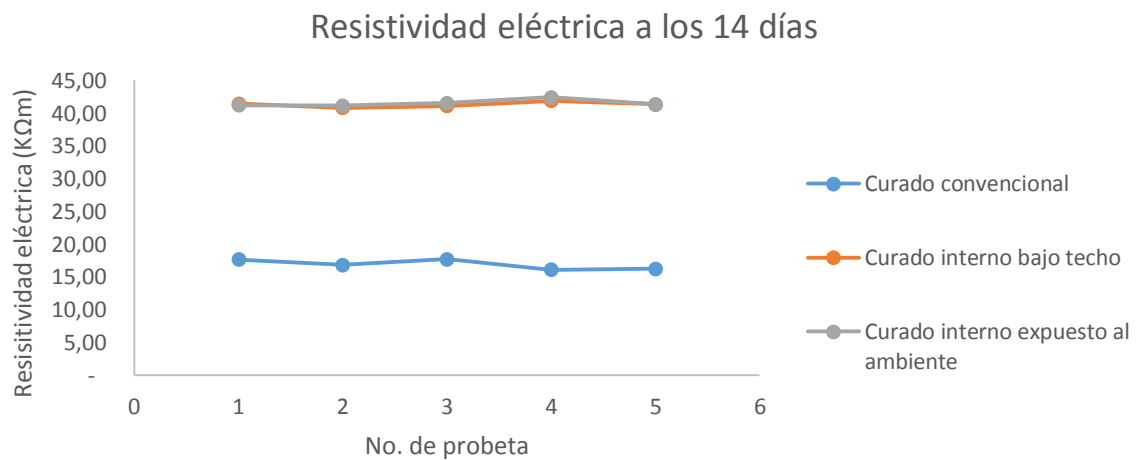


Tabla 23. Resistividad eléctrica a los 14 días de edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días.

Resistividad Eléctrica a los 14 días (prueba de resist. A compresión a los 28 días)						
Probeta No.	Díámetro (cm)	Área (cm ²)	Longitud (cm)	Resistencia (MΩ)	Resistividad Eléctrica (MΩcm)	Condición de curado
1	10.00	78.54	20.00	4.11	16.14	Curado convencional
2	10.00	78.54	20.00	4.36	17.12	
3	10.00	78.54	20.00	4.50	17.67	
4	10.00	78.54	20.00	4.05	15.90	
5	10.00	78.54	20.00	4.41	17.32	
1	10.00	78.54	20.00	10.61	41.67	Curado interno bajo techo
2	10.00	78.54	20.00	10.56	41.47	
3	10.00	78.54	20.00	10.19	40.02	
4	10.00	78.54	20.00	10.06	39.51	
5	10.00	78.54	20.00	10.96	43.04	
1	10.00	78.54	20.00	10.74	42.18	Curado interno expuesto al ambiente
2	10.00	78.54	20.00	10.56	41.47	
3	10.00	78.54	20.00	10.32	40.53	
4	10.00	78.54	20.00	10.98	43.12	
5	10.00	78.54	20.00	10.02	39.35	

Gráfica 13. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 14 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días.

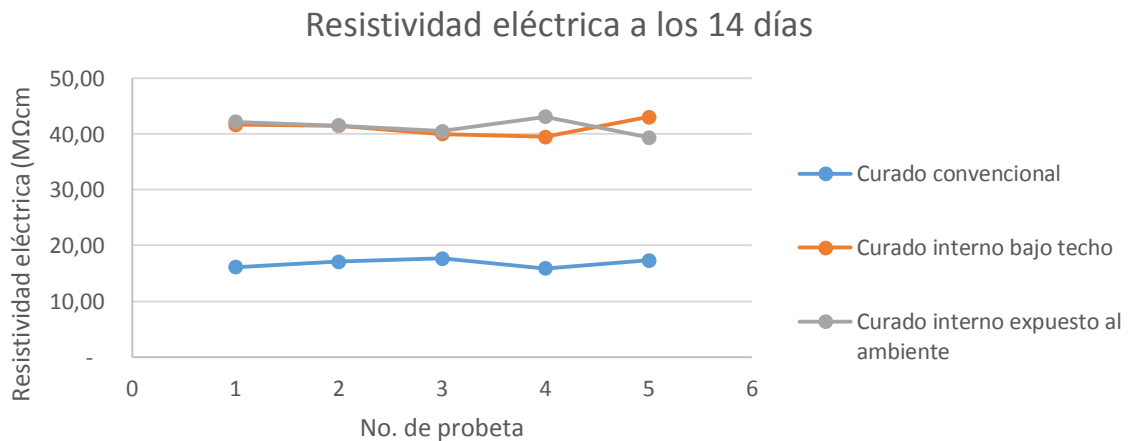
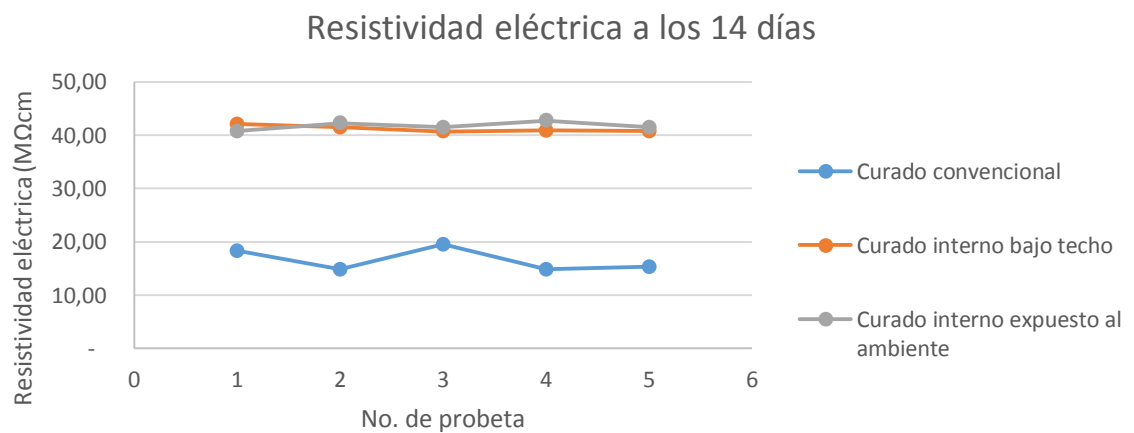


Tabla 24. Resistividad eléctrica a los 14 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a la misma edad.

Resistividad Eléctrica a los 14 días (prueba de resist. A compresión a los 14 días)						
Probeta No.	Díámetro (cm)	Área (cm ²)	Longitud (cm)	Resistencia (MΩ)	Resistividad Eléctrica (MΩcm)	Condición de curado
1	10.00	78.54	20.00	4.66	18.30	Curado convencional
2	10.00	78.54	20.00	3.78	14.84	
3	10.00	78.54	20.00	4.96	19.48	
4	10.00	78.54	20.00	3.78	14.84	
5	10.00	78.54	20.00	3.89	15.28	
1	10.00	78.54	20.00	10.71	42.06	Curado interno bajo techo
2	10.00	78.54	20.00	10.56	41.47	
3	10.00	78.54	20.00	10.36	40.68	
4	10.00	78.54	20.00	10.41	40.88	
5	10.00	78.54	20.00	10.38	40.76	
1	10.00	78.54	20.00	10.37	40.72	Curado interno expuesto al ambiente
2	10.00	78.54	20.00	10.75	42.22	
3	10.00	78.54	20.00	10.55	41.43	
4	10.00	78.54	20.00	10.88	42.73	
5	10.00	78.54	20.00	10.56	41.47	

Gráfica 14. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 14 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a la misma edad.



8.2.2.2 Resistividad eléctrica hasta 28 días (segunda edad de medición de resistencia a la compresión)

En este caso se obtuvieron 30 valores de resistividad eléctrica, ya que para la prueba de compresión a los 14 días se fallaron 15 probetas de la población de análisis; sin embargo, el análisis realizado es el mismo que en el caso anterior, solo que para promediar el valor obtenido solo se tenían dos valores a diferencia del anterior en donde se tenían tres valores.

Las probetas en condición de curado interno expuesto al ambiente se sometieron a temperaturas máximas de 22°C y mínimas de 5°C con niveles de precipitación hasta de 29 mm.

A continuación se presentan las tablas y graficas con los valores de resistividad obtenidos:

Tabla 25. Resistividad eléctrica a los 21 días de edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días.

Resistividad Eléctrica a los 21 días (prueba de resist. A compresión a los 60 días)						
Probeta No.	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Longitud (cm)	Resistencia (MΩ)	Resistividad Eléctrica (MΩcm)	Condición de curado
1	10.00	78.54	20.00	5.55	21.79	Curado convencional
2	10.00	78.54	20.00	5.86	23.01	
3	10.00	78.54	20.00	5.46	21.44	
4	10.00	78.54	20.00	5.56	21.83	
5	10.00	78.54	20.00	5.71	22.42	
1	10.00	78.54	20.00	11.10	43.59	Curado interno bajo techo
2	10.00	78.54	20.00	11.80	46.34	
3	10.00	78.54	20.00	11.65	45.75	
4	10.00	78.54	20.00	11.89	46.69	
5	10.00	78.54	20.00	11.72	46.02	
1	10.00	78.54	20.00	11.40	44.77	Curado interno expuesto al ambiente
2	10.00	78.54	20.00	11.71	45.99	
3	10.00	78.54	20.00	11.54	45.32	
4	10.00	78.54	20.00	11.69	45.91	
5	10.00	78.54	20.00	11.15	43.79	

Gráfica 15. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 21 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días.

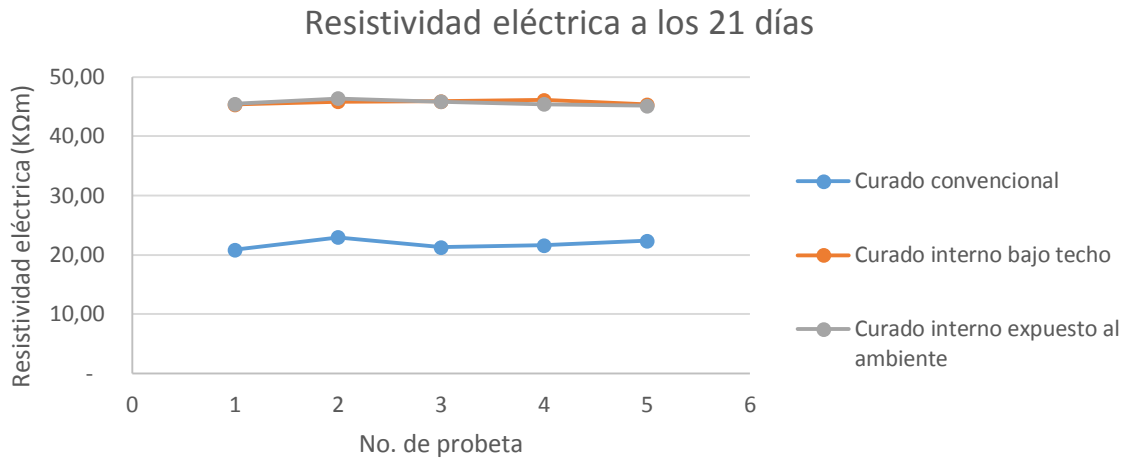


Tabla 26. Resistividad eléctrica a los 21 días de edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días.

Resistividad Eléctrica a los 21 días (prueba de resist. A compresión a los 28 días)						
Probeta No.	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Longitud (cm)	Resistencia (MΩ)	Resistividad Eléctrica (MΩcm)	Condición de curado
1	10.00	78.54	20.00	5.06	19.87	Curado convencional
2	10.00	78.54	20.00	5.84	22.93	
3	10.00	78.54	20.00	5.38	21.13	
4	10.00	78.54	20.00	5.44	21.36	
5	10.00	78.54	20.00	5.69	22.34	
1	10.00	78.54	20.00	11.98	47.05	Curado interno bajo techo
2	10.00	78.54	20.00	11.55	45.36	
3	10.00	78.54	20.00	11.71	45.99	
4	10.00	78.54	20.00	11.58	45.47	
5	10.00	78.54	20.00	11.36	44.61	
1	10.00	78.54	20.00	11.75	46.14	Curado interno expuesto al ambiente
2	10.00	78.54	20.00	11.89	46.69	
3	10.00	78.54	20.00	11.81	46.38	
4	10.00	78.54	20.00	11.44	44.92	
5	10.00	78.54	20.00	11.84	46.50	

Gráfica 16. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 21 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días.

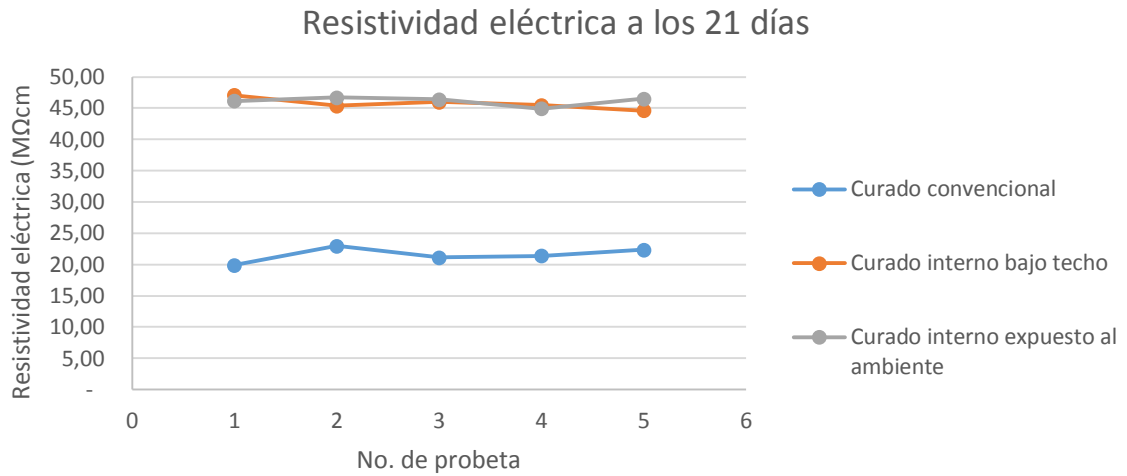


Tabla 27. Resistividad eléctrica a los 28 días de edad para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días.

Resistividad Eléctrica a los 28 días (prueba de resist. A compresión a los 60 días)						
Probeta No.	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Longitud (cm)	Resistencia (MΩ)	Resistividad Eléctrica (MΩcm)	Condición de curado
1	10.00	78.54	20.00	6.28	24.66	Curado convencional
2	10.00	78.54	20.00	6.00	23.56	
3	10.00	78.54	20.00	6.04	23.72	
4	10.00	78.54	20.00	6.89	27.06	
5	10.00	78.54	20.00	6.01	23.60	
1	10.00	78.54	20.00	12.15	47.71	Curado interno bajo techo
2	10.00	78.54	20.00	12.73	49.99	
3	10.00	78.54	20.00	11.89	46.69	
4	10.00	78.54	20.00	12.07	47.40	
5	10.00	78.54	20.00	12.17	47.79	
1	10.00	78.54	20.00	12.82	50.34	Curado interno expuesto al ambiente
2	10.00	78.54	20.00	12.69	49.83	
3	10.00	78.54	20.00	12.92	50.74	
4	10.00	78.54	20.00	12.65	49.68	
5	10.00	78.54	20.00	12.68	49.79	

Gráfica 17. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 28 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a los 60 días.

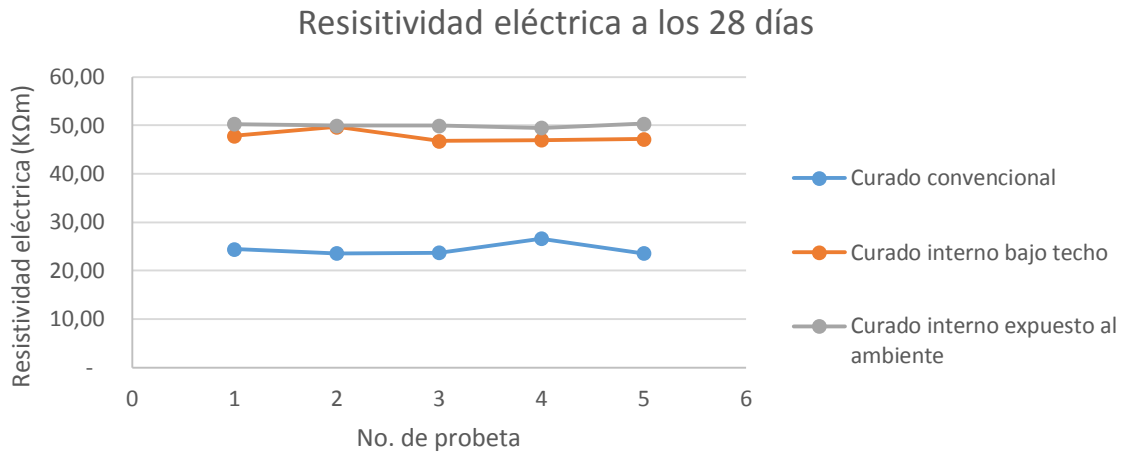
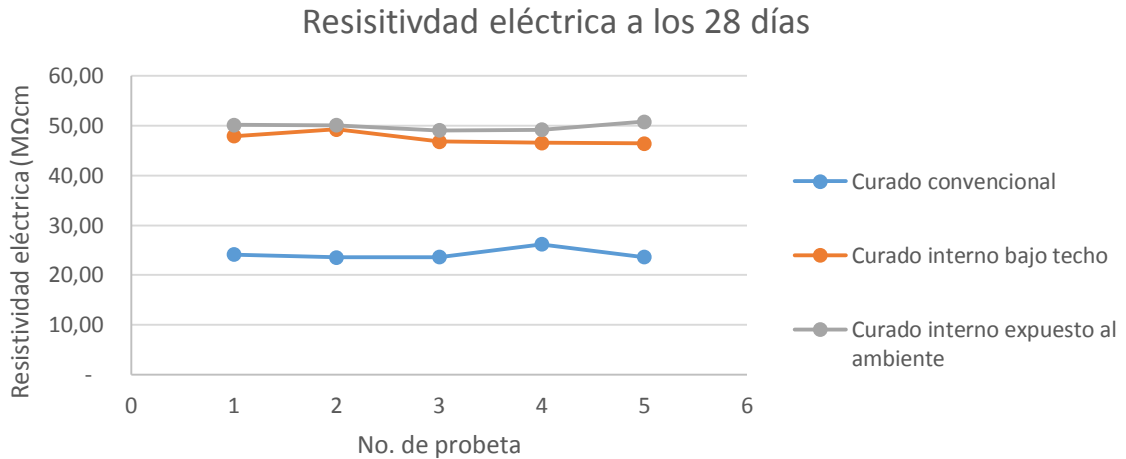


Tabla 28. Resistividad eléctrica a los 28 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a la misma edad.

Resistividad Eléctrica a los 28 días (prueba de resist. A compresión a los 28 días)						
Probeta No.	Diámetro (cm)	Área (cm²)	Longitud (cm)	Resistencia (MΩ)	Resistividad Eléctrica (MΩcm)	Condición de curado
1	10.00	78.54	20.00	6.15	24.15	Curado convencional
2	10.00	78.54	20.00	6.00	23.56	
3	10.00	78.54	20.00	6.02	23.64	
4	10.00	78.54	20.00	6.67	26.19	
5	10.00	78.54	20.00	6.01	23.60	
1	10.00	78.54	20.00	12.20	47.91	Curado interno bajo techo
2	10.00	78.54	20.00	12.55	49.28	
3	10.00	78.54	20.00	11.92	46.81	
4	10.00	78.54	20.00	11.85	46.53	
5	10.00	78.54	20.00	11.83	46.46	
1	10.00	78.54	20.00	12.78	50.19	Curado interno expuesto al ambiente
2	10.00	78.54	20.00	12.75	50.07	
3	10.00	78.54	20.00	12.50	49.09	
4	10.00	78.54	20.00	12.53	49.21	
5	10.00	78.54	20.00	12.94	50.82	

Gráfica 18. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 28 días de edad, para el grupo al cual se le realizará el ensayo de resistencia a la compresión a la misma edad.



8.2.2.3 Resistividad eléctrica hasta 60 días (última edad de medición de resistencia a la compresión)

Para estas edades se muestran los valores de resistividad eléctrica logrados por las probetas que se someterán a proceso de falla (ensayo de resistencia a la compresión) a la edad de 60 días, por lo cual la muestra de ensayo corresponde a las 15 probetas restantes de la población inicial de 45 (las 30 probetas faltantes fueron las falladas a las edades de 14 y 28 días).

La primer medición propia de este grupo, se hace a los 35 días de edad según corresponde con las edades de ensayos mostradas en la metodología y para esta edad es necesario recordar que todos los grupos de probetas se encuentran en las mismas condiciones, es decir todas se encuentran expuestas al ambiente, ya que para esta edad, las probetas cuya condición de curado fue convencional ya pasaron por los 28 días de duración de este proceso.

A partir de esta edad de medición en adelante, que se llevó a cabo durante todo el mes de abril, el grupo de probetas estuvo sometido a condiciones de temperatura muy similares a lo largo de todo el mes, en donde se obtuvieron temperaturas máximas de 20°C y mínimas de 9°C con bastantes días lluviosos cuyo máximo nivel de precipitación fue de 47 mm.

A continuación se presentará en las siguientes tablas los valores de resistividad obtenidos con una gráfica a continuación de cada una en donde se muestra el comportamiento de cada grupo de probetas ensayado para la respectiva edad.

Tabla 29. Resistividad eléctrica a los 35 días de edad.

Resistividad Eléctrica a los 35 días (prueba de resist. A compresión a los 60 días)						
Probeta No.	Diámetro (Cm)	Área (Cm ²)	Longitud (Cm)	Resistencia (MΩ)	Resistividad Eléctrica (MΩcm)	Condición de curado
1	10.00	78.54	20.00	6.53	25.64	Curado convencional
2	10.00	78.54	20.00	6.23	24.47	
3	10.00	78.54	20.00	6.66	26.15	
4	10.00	78.54	20.00	7.14	28.04	
5	10.00	78.54	20.00	6.18	24.27	
1	10.00	78.54	20.00	12.57	49.36	Curado interno bajo techo
2	10.00	78.54	20.00	12.90	50.66	
3	10.00	78.54	20.00	13.40	52.62	
4	10.00	78.54	20.00	13.06	51.29	
5	10.00	78.54	20.00	12.98	50.97	
1	10.00	78.54	20.00	12.98	50.97	Curado interno expuesto al ambiente
2	10.00	78.54	20.00	13.19	51.80	
3	10.00	78.54	20.00	13.70	53.80	
4	10.00	78.54	20.00	13.27	52.11	
5	10.00	78.54	20.00	13.41	52.66	

Gráfica 19. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 35 días de edad.

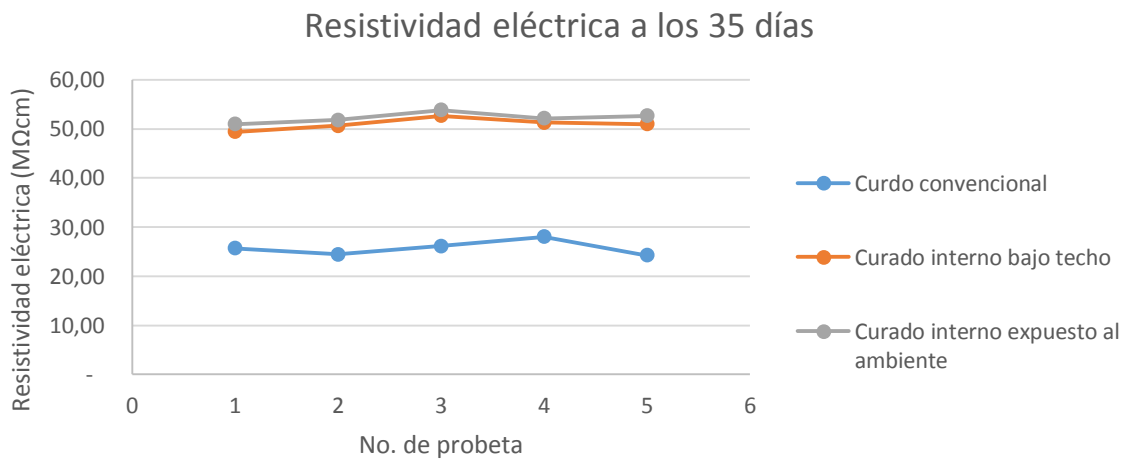


Tabla 30. Resistividad eléctrica a los 42 días de edad.

Resistividad Eléctrica a los 42 días (prueba de resist. A compresión a los 60 días)						
Probeta No.	Diámetro (Cm)	Área (Cm ²)	Longitud (Cm)	Resistencia (MΩ)	Resistividad Eléctrica (MΩcm)	Condición de curado
1	10.00	78.54	20.00	7.40	29.06	Curado convencional
2	10.00	78.54	20.00	6.96	27.33	
3	10.00	78.54	20.00	7.52	29.53	
4	10.00	78.54	20.00	7.62	29.92	
5	10.00	78.54	20.00	6.67	26.19	
1	10.00	78.54	20.00	13.39	52.58	Curado interno bajo techo
2	10.00	78.54	20.00	13.48	52.94	
3	10.00	78.54	20.00	13.50	53.01	
4	10.00	78.54	20.00	13.55	53.21	
5	10.00	78.54	20.00	13.61	53.45	
1	10.00	78.54	20.00	13.46	52.86	Curado interno expuesto al ambiente
2	10.00	78.54	20.00	13.38	52.54	
3	10.00	78.54	20.00	13.98	54.90	
4	10.00	78.54	20.00	13.84	54.35	
5	10.00	78.54	20.00	13.88	54.51	

Gráfica 20. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 42 días de edad.

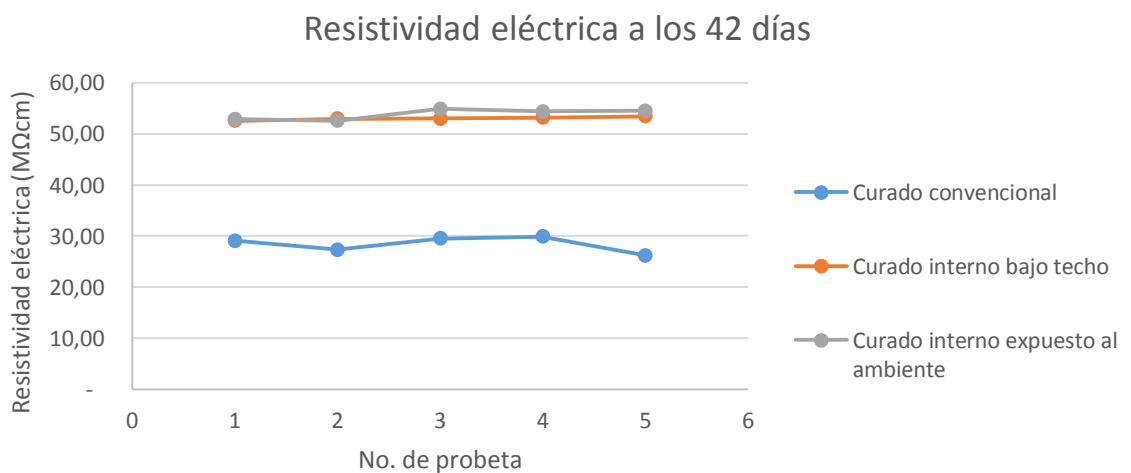


Tabla 31. Resistividad eléctrica a los 49 días de edad.

Resistividad Eléctrica a los 49 días (prueba de resist. A compresión a los 60 días)						
Probeta No.	Diámetro (Cm)	Área (Cm ²)	Longitud (Cm)	Resistencia (MΩ)	Resistividad Eléctrica (MΩCm)	Condición de curado
1	10.00	78.54	20.00	7.89	30.98	Curado convencional
2	10.00	78.54	20.00	7.36	28.90	
3	10.00	78.54	20.00	7.89	30.98	
4	10.00	78.54	20.00	8.12	31.89	
5	10.00	78.54	20.00	6.81	26.74	
1	10.00	78.54	20.00	13.72	53.88	Curado interno bajo techo
2	10.00	78.54	20.00	13.93	54.70	
3	10.00	78.54	20.00	14.01	55.02	
4	10.00	78.54	20.00	13.99	54.94	
5	10.00	78.54	20.00	13.85	54.39	
1	10.00	78.54	20.00	13.85	54.39	Curado interno expuesto al ambiente
2	10.00	78.54	20.00	13.62	53.49	
3	10.00	78.54	20.00	14.35	56.35	
4	10.00	78.54	20.00	14.20	55.76	
5	10.00	78.54	20.00	14.22	55.84	

Gráfica 21. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 49 días de edad.

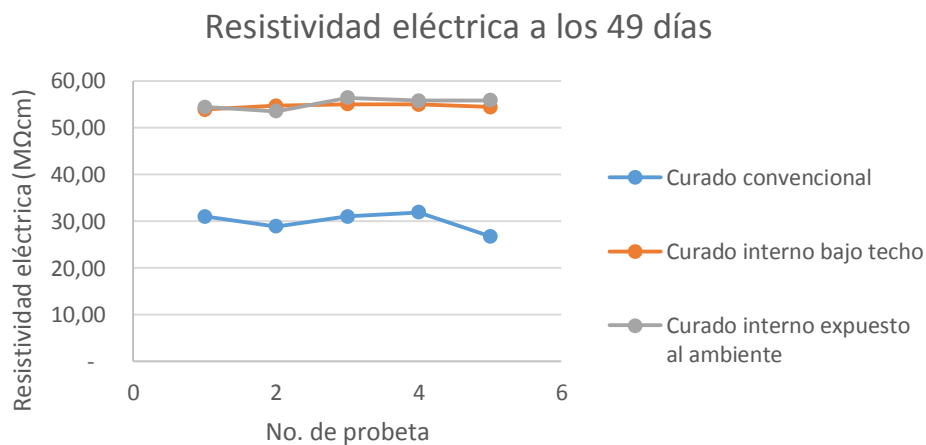


Tabla 32. Resistividad eléctrica a los 56 días de edad.

Resistividad Eléctrica a los 56 días (prueba de resist. A compresión a los 60 días)						
Probeta No.	Diámetro (Cm)	Área (Cm ²)	Longitud (Cm)	Resistencia (MΩ)	Resistividad Eléctrica (MΩCm)	Condición de curado
1	10.00	78.54	20.00	8.30	32.59	Curado convencional
2	10.00	78.54	20.00	8.23	32.32	
3	10.00	78.54	20.00	8.33	32.71	
4	10.00	78.54	20.00	8.24	32.36	
5	10.00	78.54	20.00	7.79	30.59	
1	10.00	78.54	20.00	14.12	55.45	Curado interno bajo techo
2	10.00	78.54	20.00	14.15	55.57	
3	10.00	78.54	20.00	14.34	56.31	
4	10.00	78.54	20.00	14.08	55.29	
5	10.00	78.54	20.00	14.30	56.16	
1	10.00	78.54	20.00	14.27	56.04	Curado interno expuesto al ambiente
2	10.00	78.54	20.00	14.20	55.76	
3	10.00	78.54	20.00	14.35	56.35	
4	10.00	78.54	20.00	14.44	56.71	
5	10.00	78.54	20.00	14.50	56.94	

Gráfica 22. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 56 días de edad.

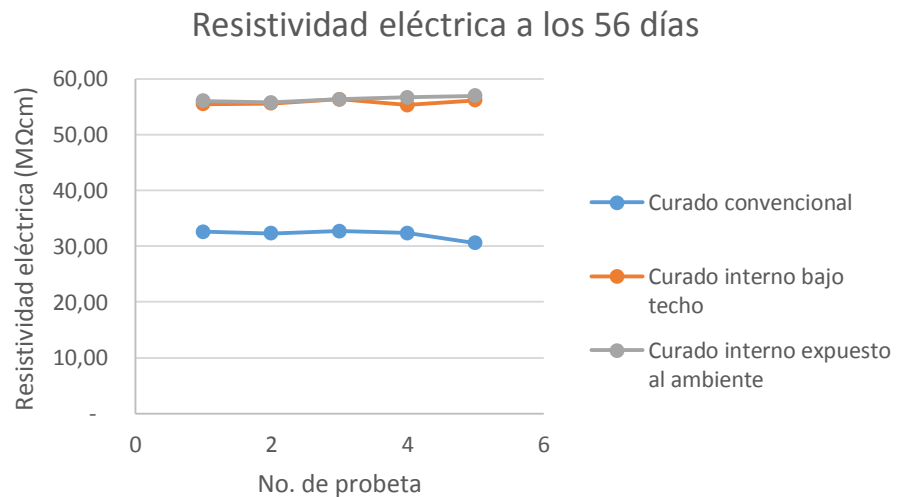
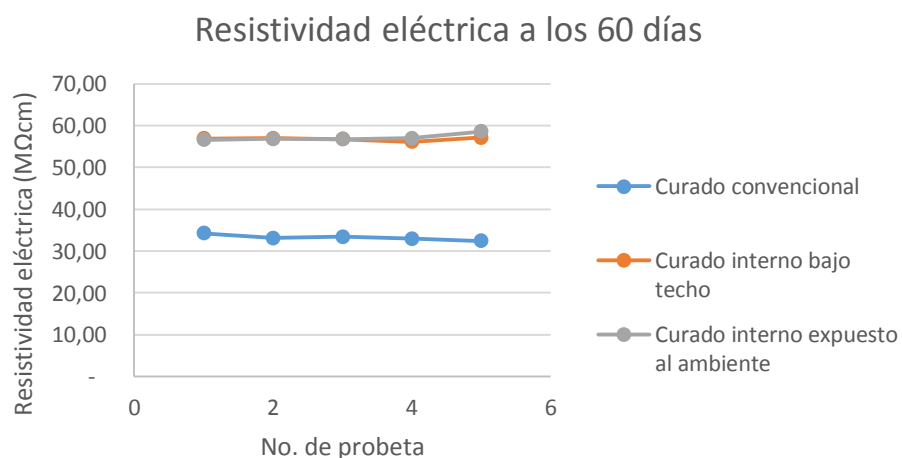


Tabla 33. Resistividad eléctrica a los 60 días de edad.

Resistividad Eléctrica a los 60 días (prueba de resist. A compresión a los 60 días)						
Probeta No.	Diámetro (Cm)	Área (Cm ²)	Longitud (Cm)	Resistencia (MΩ)	Resistividad Eléctrica (MΩCm)	Condición de curado
1	10.00	78.54	20.00	8.73	34.28	Curado convencional
2	10.00	78.54	20.00	8.43	33.10	
3	10.00	78.54	20.00	8.52	33.46	
4	10.00	78.54	20.00	8.39	32.95	
5	10.00	78.54	20.00	8.26	32.44	
1	10.00	78.54	20.00	14.50	56.94	Curado interno bajo techo
2	10.00	78.54	20.00	14.51	56.98	
3	10.00	78.54	20.00	14.46	56.78	
4	10.00	78.54	20.00	14.30	56.16	
5	10.00	78.54	20.00	14.56	57.18	
1	10.00	78.54	20.00	14.41	56.59	Curado interno expuesto al ambiente
2	10.00	78.54	20.00	14.48	56.86	
3	10.00	78.54	20.00	14.45	56.75	
4	10.00	78.54	20.00	14.52	57.02	
5	10.00	78.54	20.00	14.92	58.59	

Gráfica 23. Resistividad eléctrica para cada probeta en cada condición de curado a los 60 días de edad.



8.2.2.4 Resultados generales sobre resistividad eléctrica.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos por la población de probetas ensayada a lo largo de toda la fase experimental. En la tabla 34 se encuentra el resumen con cada valor de resistividad eléctrica obtenida a lo largo de su periodo de vida, seguida de esta se encuentra una gráfica en donde se refleja el comportamiento de la resistividad eléctrica a lo largo de cada día hasta la última edad de falla, es decir, hasta los 60 días de edad.

Para la consolidación de datos se utilizó el valor promedio entre cada condición de curado para cada edad; es decir, que se obtuvo un valor único para determinada edad de ensayo basado en los valores de las cinco probetas analizadas por cada grupo.

En las tablas finales presentadas en esta sección se encuentran los porcentajes que representan las ganancias de resistividad eléctrica en primera instancia respecto del curado interno y en segunda medida entre cada edad de medición en la correspondiente condición de curado, resultados que se interpretarán en la sección de análisis de resultados.

Tabla 34. Resumen de valores de resistividad eléctrica de cada grupo sometido a las tres condiciones de curado hasta la edad de 60 días.

Resistividad Eléctrica (MΩcm)	Probeta No.	Curado interno al ambiente		Curado interno bajo techo		Curado convencional										
						Edad del concreto (días)										
		1	2	1	2	3	7	14	21	28	35	42	49	56	60	
	5	26.44	34.64	41.35	45.14	50.30	52.66	54.51	55.84	56.94	58.59					
	4	26.72	37.70	42.41	45.42	49.44	52.11	54.35	55.76	56.71	57.02					
	3	25.58	35.84	41.52	45.85	49.91	53.80	54.90	56.35	56.35	56.75					
	2	25.29	34.37	41.13	46.34	49.95	51.80	52.54	53.49	55.76	56.86					
	1	26.35	34.70	41.17	45.45	50.27	50.97	52.86	54.39	56.04	56.59					
	5	7.28	30.33	41.35	45.32	47.12	50.97	53.45	54.39	56.16	57.18					
	4	7.29	26.98	41.86	46.08	46.97	51.29	53.21	54.94	55.29	56.16					
	3	6.75	28.64	41.10	45.87	46.75	52.62	53.01	55.02	56.31	56.78					
	2	6.52	28.72	40.80	45.85	49.64	50.66	52.94	54.70	55.57	56.98					
	1	7.45	26.32	41.44	45.32	47.81	49.36	52.58	53.88	55.45	56.94					
	5	5.69	11.79	16.21	22.38	23.60	24.27	26.19	26.74	30.59	32.44					
	4	5.63	11.53	16.07	21.60	26.62	28.04	29.92	31.89	32.36	32.95					
	3	5.94	12.97	17.70	21.28	23.68	26.15	29.53	30.98	32.71	33.46					
	2	5.51	11.55	16.82	22.97	23.56	24.47	27.33	28.90	32.32	33.10					
	1	7.23	13.35	17.63	20.83	24.41	25.64	29.06	30.98	32.59	34.28					

Tabla 35. Valores promedio de resistividad eléctrica hasta la edad de 60 días.

EDAD DEL CONCRET O (días)	RESISTIVIDAD ELECTRICA (MΩcm)		
	Curado convencional	Curado interno bajo techo	Curado interno al ambiente
3	6.00	7.06	26.08
7	12.24	28.20	35.45
14	16.89	41.31	41.52
21	21.81	45.69	45.64
28	24.37	47.66	49.97
35	25.71	50.98	52.27
42	28.41	53.04	53.83
49	29.90	54.59	55.17
56	32.11	55.76	56.36
60	33.25	56.81	57.16

Gráfica 24. Comportamiento de la resistividad eléctrica del concreto ligero para cada condición de curado hasta los 60 días de edad.

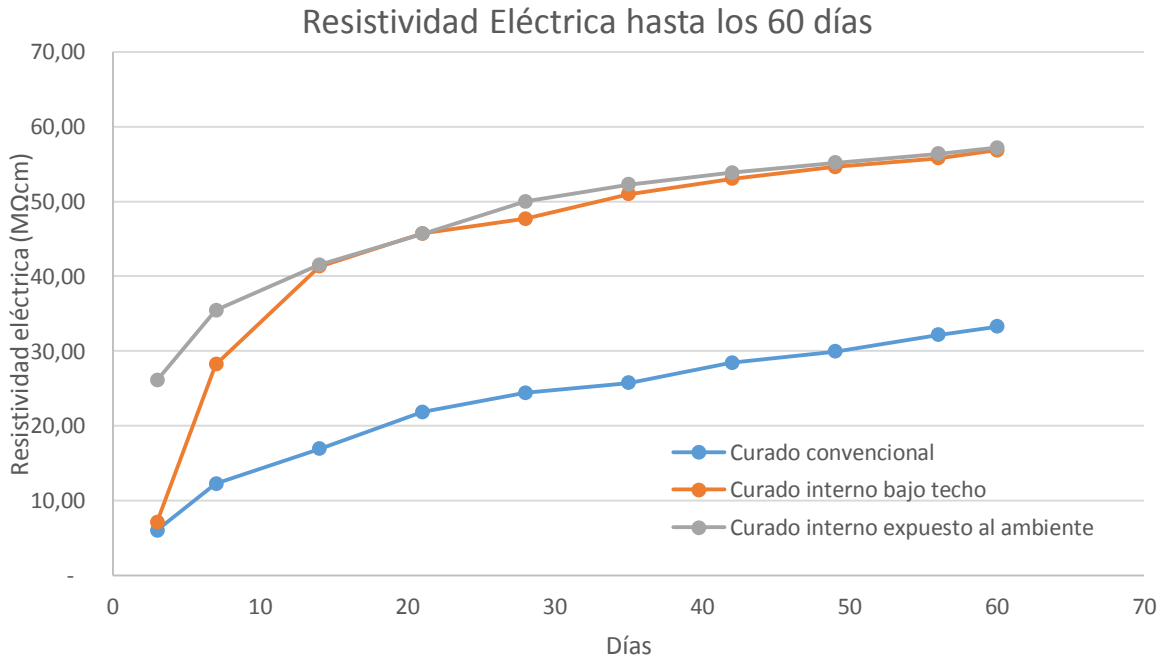


Tabla 36. Porcentajes de ganancia de resistividad eléctrica por parte de los grupos sometidos a curado interno respecto del grupo sometido a curado convencional.

EDAD DEL CONCRETO (días)	Diferencia de Resistividad eléctrica respecto al curado convencional (%)	
	Curado interno bajo techo	Curado interno al ambiente
3	18%	335%
7	130%	190%
14	145%	146%
21	109%	109%
28	96%	105%
35	98%	103%
42	87%	89%
49	83%	85%
56	74%	75%
60	71%	72%

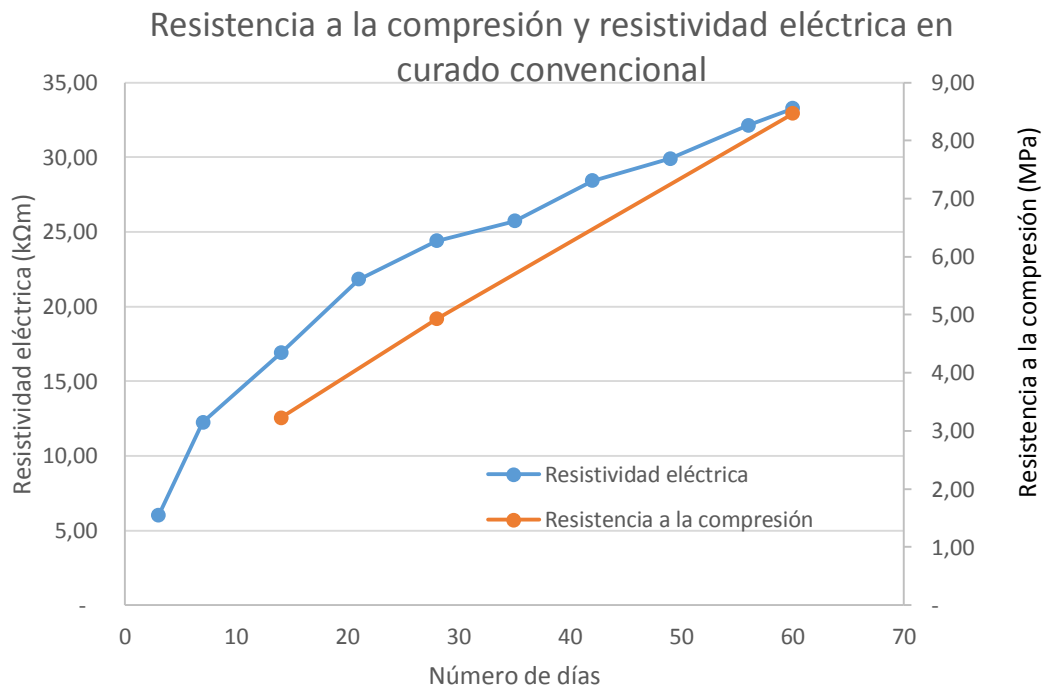
Tabla 37. Porcentaje de ganancia de resistividad eléctrica para cada edad de ensayo entre la misma condición de curado.

Edad del concreto (días)	Ganancia de resistividad entre condiciones de curado		
	Bajo techo	Al ambiente	convencional
3			
7	300%	36%	104%
14	47%	17%	38%
21	11%	10%	29%
28	4%	9%	12%
35	7%	5%	5%
42	4%	3%	10%
49	3%	2%	5%
56	2%	2%	7%
60	2%	1%	4%

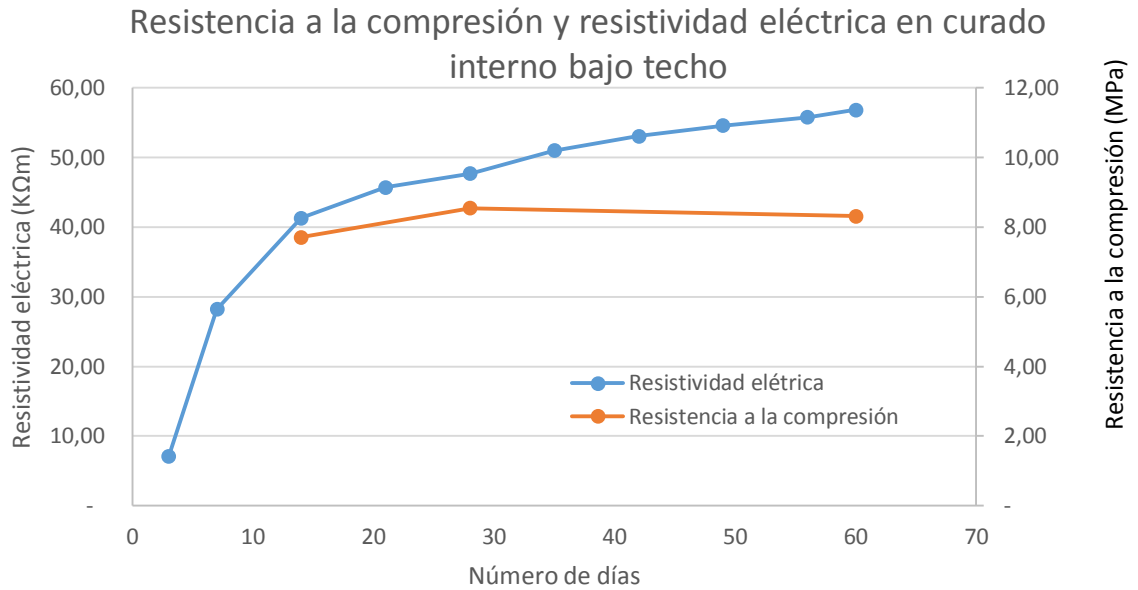
8.2.3 Fase 3: relación entre la resistencia a la compresión y resistividad eléctrica

En esta sección se incluyen los resultados obtenidos de resistencia a la compresión como los de resistividad eléctrica, los cuales se comparan en cada una de las condiciones de curado; los resultados se muestran a continuación en las siguientes gráficas en donde se puede observar el comportamiento de la resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión para cada condición de curado.

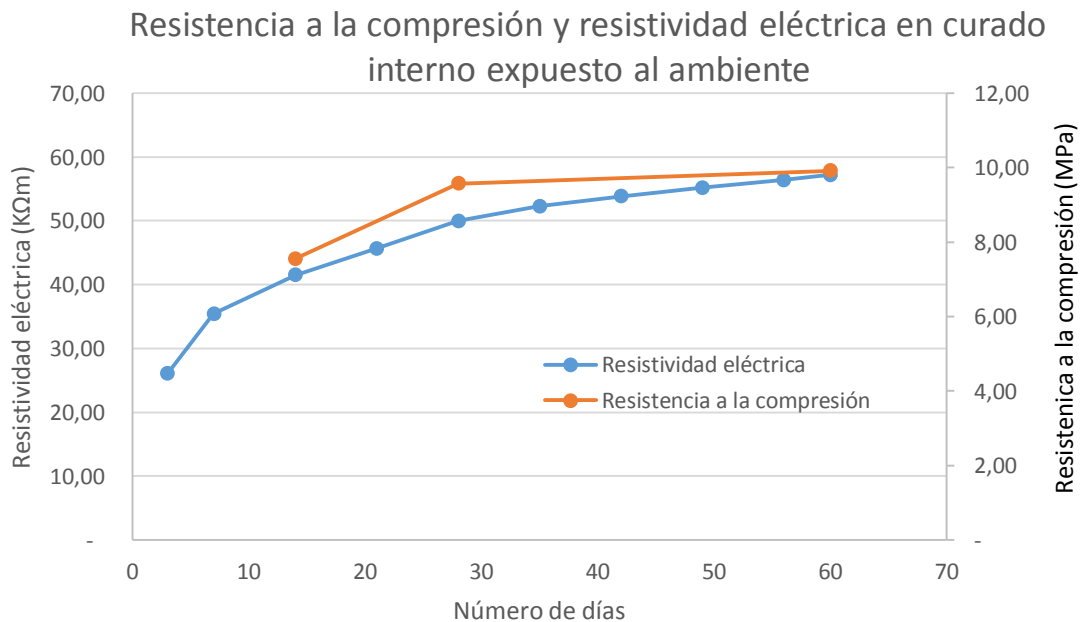
Gráfica 25. Resistividad eléctrica y resistencia a la compresión desde los 3 hasta los 60 días, en condición de curado convencional.



Gráfica 26. Resistividad eléctrica y resistencia a la compresión desde los 3 hasta los 60 días, en condición de curado interno bajo techo.



Gráfica 27. Resistividad eléctrica y resistencia a la compresión desde los 3 días hasta los 60 días, en condición de curado interno expuesto al ambiente.



9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

9.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

9.1.1 Resistencia a la compresión a los 14 días

Como se observó en los resultados, las probetas que se sometieron a curado interno obtuvieron valores de resistencia a la compresión muy superiores a los obtenidos en la condición de curado convencional; sin embargo, ésta diferencia no se debe únicamente al curado.

Las probetas sometidas a curado convencional, es decir, en las que la mezcla fue hecha con el agregado grueso (piedra pómez) en condición seca, presentaron inconvenientes a la hora de realizar la mezcla ya que debido a su capacidad de absorción el agua adicionada a la mezcla, era tomada en su mayor parte por la piedra y por tal motivo era necesario poner las probetas realizadas en estas condiciones en estado de sumersión rápidamente; de lo contrario, dicha probeta se secaría rápidamente e iniciaría el proceso de fractura por deshidratación del concreto.

A pesar de que las probetas en condición de curado convencional se sometieron a sumersión en un lapso de tiempo poco inferior al normal, y que por ende fueron las probetas con mayor disposición de agua durante todo su proceso de formación hasta la edad de falla, fueron las probetas con menores valores de resistencia logrados. A continuación en la tabla 38 se muestran los valores promedio obtenidos de resistencia a la compresión con base en la tabla 9, presentada en la sección anterior.

Tabla 38. Valores de resistencia a la compresión a la edad de 14 días.

CONDICIÓN DE CURADO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 14 DÍAS (MPa)
Curado convencional	3.22
Curado interno bajo techo	7.71
Curado interno al exterior	7.55

Como se observó de la tabla anterior los valores más bajos de resistencia a la compresión los obtuvieron las probetas cuya condición de curado fue convencional, teniendo que las probetas en condición de curado interno llegaron a duplicar el valor de resistencia obtenido por las demás probetas.

Respecto a la condición de curado interno bajo techo se obtuvo un aumento de resistencia equivalente al 139%, mientras que en la condición expuesta al ambiente fue del 134% y entre las probetas sometidas a curado interno las que estuvieron en condición bajo techo mostraron una ganancia del 5% de la resistencia a la compresión.

9.1.2 Resistencia a la compresión a los 28 días

Para esta edad se observó como el crecimiento en la resistencia a la compresión fue bastante pequeño con respecto del valor obtenido para la edad de 14 días; sin embargo, aún se hace evidente la superioridad que tienen las probetas en condición de curado interno sobre las probetas cuya condición de curado fue convencional.

Para esta edad las diferencias en los valores obtenidos de resistencia a la compresión llegan a ser de 73% y de 94% para las condiciones de curado interno bajo techo y expuesto al ambiente respectivamente, en comparación a la resistencia obtenida para la condición de curado convencional; sin embargo, y a pesar de que la diferencia en resistencia es aun grande, en comparación a la edad anterior de falla (14 días), el decrecimiento en ganancia fue como mínimo del 40% (en condición expuesta al ambiente); no obstante dicha disminución en la ganancia de resistencia, también se debe a que el mayor aumento en ganancia propio se obtuvo en la condición de curado convencional la cual fue de 53%, mientras que para curado interno bajo techo fue del 11% y en la condición expuesta al ambiente fue de 27%, lo cual indica que para las dos condiciones de curado interno, se obtuvo un crecimiento rápido de resistencia pero que para esta edad parece estabilizarse, de igual forma que como se mostrará más adelante ocurre con las resistividad eléctrica del material.

Comparando las dos condiciones de curado interno, se observa un comportamiento similar en la resistencia a la compresión con una diferencia de 21% en favor de la condición expuesta al ambiente; sin embargo, para la edad de 14 días, la diferencia correspondía a un 5% en favor de la condición de curado bajo techo, es decir que para los 28 días las probetas de condición expuesta al ambiente empezaron a obtener un incremento superior en la resistencia a la compresión, esto se evidencia en el párrafo anterior en la cual la ganancia respecto del curado convencional fue del 27%.

Teniendo en cuenta que en todas las condiciones hubo un aumento de resistencia y que no presentan crecimientos estables de resistencia parece que en ninguna condición se ha alcanzado el $f'c$, por lo que es necesario esperar hasta la edad de

60 días en donde se realizará el último ensayo de resistencia a la compresión, para poder obtener la máxima resistencia alcanzada para cada condición de curado.

9.1.3 Resistencia a la compresión a los 60 días

Para la última edad de ensayo de resistencia a la compresión del concreto, tal y como se esperaba, en la condición de curado interno el crecimiento en resistencia fue mínimo, para la condición de curado expuesta al ambiente la ganancia fue del 4% (ver tabla 15) y para la condición bajo techo por el contrario no se presentó una ganancia, sino una pérdida del 3%, lo cual indica que para la edad de 28 días en ambas condiciones se logró alcanzar el $f'c$ que es aproximadamente de 9 MPa.

Para el caso del curado convencional, se obtuvo un crecimiento del 72% respecto a la edad anterior de falla (28 días), teniendo en cuenta que para esta edad el concreto lleva 32 días de finalizado su proceso de curado, es claro que la condición de curado en sumersión del material, retiene el proceso de formación del concreto en cuanto al desarrollo de su resistencia y por lo tanto, cuando el grupo expuesto en esta condición de curado entro en contacto con el ambiente; es decir, en proceso de secado, logró desarrollar eficientemente su propiedad mecánica de la resistencia, de tal modo que para esta edad la ganancia por parte del curado interno fue del 17% para la condición de curado interno expuesto al ambiente y para esta ocasión, por única vez durante todo el proceso experimental, la condición de curado convencional logró superar el valor obtenido de resistencia a la compresión en un 2% al valor obtenido por parte de la condición de curado interno bajo techo (ver tabla 14), obteniendo un valor de 8.46MPa contra un 8.31MPa en la segunda condición de curado nombrada.

En general, para el caso de la resistencia a la compresión se puede observar que si bien no se logra una superioridad significativa de este parámetro en ninguna de las condiciones de curado analizadas, pues tal y como lo indica la tabla 13, los valores de resistencia son similares y no se presentan ganancias significativas por parte de la condición de curado interno expuesta al ambiente, tal y como puede observarse en la tabla 14. Sin embargo, a lo largo de todo el proceso se evidenció que el curado interno proporciona un crecimiento acelerado en la resistencia a la compresión pues a la edad de 14 días se logró el 76% de la resistencia lograda a los 60 días de edad, a diferencia de la condición de curado convencional en donde para la misma edad de 14 días a únicamente se logró el 38% de la resistencia obtenida a los 60 días.

9.2 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

9.2.1 Resistividad eléctrica hasta la edad de 14 días

En el caso de la resistividad eléctrica, se observó que en forma similar las probetas que se sometieron a curado interno bajo techo y curado interno en ambiente mostraron valores muchos más elevados que los obtenidos en la condición de curado convencional.

9.2.1.1 Resistividad eléctrica a los 3 días

La primera gran diferencia se muestra a los tres días de edad del concreto, específicamente entre las condiciones de curado convencional y curado interno expuesto al ambiente en donde se alcanzaron una diferencia de 335%, diferencia que se puede observar en las gráficas 6, 7 y 8 mostradas en la sección de resultados de resistividad eléctrica obtenida hasta los 14 días de edad.

En la condición de curado interno bajo techo hubo una diferencia de resistividad eléctrica respecto al curado convencional del 18%; sin embargo, y como se muestra en las gráficas de 7 y 14 días esta diferencia aumenta notoriamente, prácticamente hasta alcanzar los valores de resistividad eléctrica obtenidos en la condición expuesta al ambiente, es decir, que a partir de los tres días, las probetas expuestas a condición de curado interno bajo techo logran una ganancia rápida de resistencia al paso de la corriente.

Para la medición de la resistividad eléctrica a los 3 días de edad las probetas que se encontraban en el exterior presentaban un aspecto seco en su superficie; es necesario recordar que se expusieron a temperaturas hasta de 21°C sin ningún tipo de protección, por lo cual se hace evidente la diferencia obtenida en los valores de resistividad eléctrica; a diferencia de las probetas sometidas a curado interno bajo techo, que aún después de los tres días se siguieron conservando con un aspecto húmedo; con lo cual se explica por qué a esta primera edad de medición los valores de resistividad obtenidos entre las condiciones de curado convencional y curado interno bajo techo fueron similares con una diferencia de ganancia relativamente pequeña en comparación a las expuestas al ambiente.

9.2.1.2 Resistividad eléctrica a los 7 días

Para esta edad las probetas sometidas a curado interno bajo techo obtuvieron una ganancia rápida de resistividad, de tal forma que la diferencia entre las resistividades obtenidas entre ambas condiciones de curado interno fue de 59% a

favor de la condición expuesta al ambiente, y con respecto al curado convencional, ésta condición de curado obtuvo una ganancia del 130%.

Para esta edad las probetas que se encontraban en condición bajo techo ya presentaban un aspecto mucho más seco que en la edad de medición anterior, es decir, que la resistividad también es un reflejo de la humedad del material, pues para las probetas cuya condición de curado fue en sumersión dichos valores seguían siendo relativamente bajos respecto de las probetas sometidas a curado interno.

Para esta edad independientemente de la condición de curado, todas las probetas en referencia a la tabla 3 en donde se muestran los criterios para interpretar las medidas de resistividad eléctrica, según Polder, el riesgo de corrosión es despreciable y según Rodríguez la velocidad de corrosión es muy lenta incluso con concreto carbonatado o contaminado por cloruros; es decir, que para esta edad con una medida de resistividad mínima obtenida de 6.48 MΩcm (ver tabla 14), todas las probetas se pueden considerar con una buena durabilidad y por ende resistentes a la corrosión.

9.2.1.3 Resistividad eléctrica a los 14 días

En esta edad las probetas en condición de curado interno se encuentran prácticamente bajo el mismo rango de valores con una diferencia mínima del 1% a favor de la condición de curado expuesta al ambiente, pero en comparación con el curado convencional las diferencias siguen siendo exageradas, pues respecto al curado interno bajo techo la diferencia es de 145%, y respecto del curado interno expuesto al ambiente es de 146%.

Si bien, los valores de resistividad obtenidos en las condiciones de curado interno siguen siendo elevados respecto de los obtenidos de las probetas en estado de sumersión, para esta edad se observa como la diferencia entre resistividades obtenidas entre la condición expuesta al ambiente y la condición convencional de curado disminuye considerablemente, pues se pasó de una primer diferencia a los tres días de 335% a un 146% a los 14 días de edad, es decir que el crecimiento de resistividad elevado que mostró esta condición de curado ha empezado a estabilizarse.

Caso contrario al anterior ocurre con las probetas en condición de curado interno bajo techo, ya que estas han ido aumentando la diferencia entre resistividades respecto del curado convencional, pues en este caso se empezó con una diferencia del 18% y para esta edad la diferencia va en 145% de ganancia de la condición bajo techo respecto de la convencional, es decir que mientras en el caso anterior, la resistencia al paso de la corriente de las probetas expuestas al ambiente se empieza

a estabilizar, en la condición de curado interno bajo techo continúa con su crecimiento acelerado.

9.2.2 Resistividad eléctrica hasta la edad de 28 días

9.2.2.1 Resistividad eléctrica a los 21 días

Para esta edad los valores de resistividad eléctrica en las condiciones de curado interno por primera vez durante su proceso de formación alcanzan una diferencia entre resultados del 0% y respecto del curado convencional es del 109% en favor del primero.

Para la edad de 21 días las probetas cuya condición de curado corresponde a curado interno bajo techo, lograron alcanzar en promedio el valor de resistividad eléctrica de las probetas en la segunda condición de curado, en las cuales el crecimiento de este valor se ha reducido considerablemente respecto de las ganancias de resistividad iniciales y que tal como se había mencionado en el segmento anterior dicho valor a empezado a estabilizarse.

Para esta edad el valor de resistividad alcanzado en la condición de curado interno se encuentra por el orden de los 45.6 MΩcm y para la condición de curado convencional este valor se encuentra en 21.81 MΩcm, es decir, que a pesar de que ambas condiciones reflejan una resistencia a la corrosión bastante elevada, el curado interno brinda una ganancia rápida de resistividad independiente de su exposición al ambiente o no, que incluso con el paso del tiempo (periodo de formación del concreto) siguen siendo muy superior a las condiciones de curado convencional.

9.2.2.2 Resistividad eléctrica a los 28 días

En esta edad del concreto en la cual también se realiza prueba de compresión, se observa como la diferencia entre condición de curado interno y curado convencional comienza a disminuir su desarrollo total, diferencia que se vuelve cada vez menor con el paso de los días como se observa con los resultados obtenidos a partir de esta edad.

Adicional a las disminución en la ganancia de resistencia al paso de corriente eléctrica, también se suma la disminución propia en las dos condiciones de curado interno sobre el aumento en la resistividad eléctrica, pues para esta edad el aumento de resistividad fue del 4% para la condición bajo techo y del 9% para la condición expuesta al ambiente, cuando para la edad de 7 días la ganancia fue del 300% para

la primer condición de curado interno mencionada anteriormente y de 36% para la segunda.

Sin embargo y sin importar la disminución en ganancia de resistividad eléctrica mencionada en el párrafo anterior, para la edad de 28 días, las probetas en condición de curado convencional presentan un valor de resistividad equivalente al obtenido por las probetas expuestas al ambiente a la edad de 3 días y que las probetas en condición bajo techo presentaron a los 7 días de edad; es decir, que el proceso de formación de una probeta de concreto en condición de curado convencional a los 28 días de edad, es equivalente al obtenido y con un poco de inferioridad al obtenido en un periodo de 7 días de una probeta de concreto expuesta a curado interno.

9.2.3 Resistividad eléctrica hasta la edad de 60 días

9.2.3.1 Resistividad eléctrica a los 35 días de edad

Para la medición de la resistividad eléctrica a esta edad, se evidencia lo que se mencionada en párrafos anteriores y es que en las condiciones de curado interno este valor obtiene ganancias mínimas de resistencia al paso de corriente eléctrica pues el crecimiento fue del 7% y del 5% para la condición bajo techo y expuesta al ambiente respectivamente.

Para la condición de curado convencional, en la cual las probetas ya se encontraban en condición expuesta al ambiente, pues el periodo de curado solo se realiza hasta los 28 días de edad, al igual que en el caso del curado interno presentan ganancias muy pequeñas de resistividad eléctrica, pues a pesar de que pasaron 7 días en los cuales las probetas dejaron de entrar en contacto con agua y por lo tanto como se puede apreciar visualmente ya presentan un aspecto seco, esto no se refleja en una ganancia de resistividad eléctrica pues al igual que en la condición de curado interno parece que dicho valor empieza a estabilizarse.

Debido a la estabilización en el crecimiento de la resistividad eléctrica, se conservan las ganancias de resistividad de las condiciones de curado interno pues para esta edad la ganancias van en 98% y 103% para curado bajo techo y expuesto al ambiente respectivamente en comparación al curado convencional; sin embargo, y como lo viene indicando la tendencia en las últimas edades de ensayo de resistividad eléctrica esta ganancia cada vez se vuelve más pequeña.

9.2.3.2 Resistividad eléctrica a los 42 días de edad

Como era de esperarse para esta edad de medición se obtuvieron ganancias de resistencia al paso de corriente eléctrica más pequeñas que las que se obtuvieron en la edad anterior, siendo las ganancias de 4% y 3% para el curado interno bajo techo y el curado interno expuesto al ambiente respectivamente. Como se ha venido observando en el progreso de la ganancia de resistencia al paso de la corriente eléctrica ha disminuido notablemente en comparación a las primeras edades de medición, por lo tanto no demora en que este valor ya no siga aumentando y se quede estable.

Los valores de las ganancias de resistividad que han tenido las condiciones de curado bajo techo y expuesto al ambiente en comparación al curado convencional son del 87% y 89% respectivamente. Estos valores como los del párrafo anterior van disminuyendo con el paso del tiempo y son menores con respecto a la edad anterior de medición de resistividad eléctrica.

En el caso del curado convencional ya lleva 15 días desde que todos los cilindros están expuestos al ambiente; sin embargo, su ganancia de resistencia no ha sido muy notoria, para esta condición de curado también no demora en estabilizarse este valor, pero lo que sí es muy evidente es la diferencia de ganancia de resistencia que tiene esta condición de curado con respecto a las otras 2 condiciones.

9.2.3.3 Resistividad eléctrica a los 49 días de edad

Para esta edad de medición se hace notorio que las ganancias de resistividad eléctrica son mínimas, pues basados en la tabla 30 estos valores son de 5%, 3% y 2% de ganancia respecto de la edad anterior (42 días) para las condiciones de curado convencional, interno bajo techo e interno expuesto al ambiente.

Para esta edad las probetas en condiciones de curado convencional llevan 21 días expuestas al ambiente, y a diferencia de las probetas expuesta inicialmente a dicha condición, este grupo no presenta una ganancia significativa de resistividad eléctrica y por el contrario presentan un aspecto bastante seco y una textura áspera que en ningún momento presentaron las probetas sometidos a curado interno, que si bien, en sus edades iniciales presentaba un aspecto seco y textura suave, a continuación se presenta la fotografía 16 en donde se encuentran un comparativo entre una probeta sometida a curado convencional y dos en cada condición de curado interno.



Fotografía 23. Probetas a la edad de 49 días de edad, expuesta a curado convencional (izquierda), curado interno bajo techo (centro) y curado interno expuesto al ambiente (derecha). Tomada 16 de Abril de 2014.

Finalmente en comparación a la condición de curado convencional, las condiciones de curado interno bajo techo y expuesto al ambiente obtuvieron una ganancia de 83% y 85% respectivamente y una diferencia entre condiciones de curado interno del 2% a favor de la condición expuesta al ambiente.

9.2.3.4 Resistividad eléctrica a los 56 días de edad

Para esta edad se presentan las mismas condiciones expuestas en la sección de resistividad eléctrica a los 49 días; es decir, que las probetas expuestas a condición de curado convencional continúan con la apariencia seca y textura áspera, por otra parte, las ganancias de resistencia entre edades son mínimas pues para las condiciones de curado interno es del 2% y en la condición de curado convencional fue del 7%, lo que se refleja en la gráfica 24 en donde el crecimiento comienza estabilizarse, es decir a convertirse en una recta horizontal en las condiciones de curado interno; sin embargo, y a pesar de que es con una pendiente pequeña, las probetas en condición de curado convencional aún presentan un crecimiento lineal.

Finalmente las ganancias en resistividad eléctrica para esta edad son de 74% y 75% para la condición de curado interno bajo techo y convencional respectivamente en comparación al curado convencional.

9.2.3.5 Resistividad eléctrica a los 60 días de edad

Para esta edad final de realización de ensayos, todos los grupos sometidos a sus respectivas condiciones de curado presentaron un crecimiento no mayor al 5%, en donde la condición convencional de curado fue del 4%, para la condición bajo techo fue nuevamente del 2% y para la condición de curado final fue del 1%. La diferencia en resistividad eléctrica respecto a la condición de curado convencional por parte de las condiciones de curado interno fue del 71% y 72% para la condición bajo techo y expuesta al ambiente respectivamente.

9.2.3.6 Comportamiento de la resistividad eléctrica durante la formación del concreto en cada condición de curado

En forma general las resistividad eléctrica presenta un comportamiento ascendente a lo largo de todo el proceso de formación del concreto y se asemeja a una regresión logarítmica independiente de su condición de curado; sin embargo, para la condición de curado interno los valores de este comportamiento son en su mayoría casi del doble de los valores obtenidos en la condición de curado convencional.

Para la primera edad (3 días) la diferencia entre las condiciones de curado convencional e interno bajo techo fue mínima, tal y como se observa en la tabla 36 la ganancia apenas fue del 18%; sin embargo, esta situación solo se presentó para esta edad, ya que para los siete días de edad esta condición se encuentra en un valor intermedio entre las condiciones de curado interno expuesto al ambiente y curado convencional, tal y como puede observarse en las gráficas 9, 10 y 11 presentadas en la sección de resistividad eléctrica hasta los 14 días de edad en los resultados y a partir de esta edad, el comportamiento de la resistividad eléctrica alcanza al comportamiento mostrado por la condición expuesta al ambiente, tal y como se observa en las gráficas siguientes a la número 11 y en general en la gráfica 24, en donde a partir de los 14 días ambas tendencias prácticamente se entrelazan.

Las condiciones de curado interno fueron a lo largo de los 60 días de ensayos muy superiores a la condición de curado convencional, la diferencia entre resistividades obtenidas es tan notoria que a la edad de 42 días las probetas sometidas a curado convencional, apenas lograron el valor de resistividad eléctrica obtenida por la condición de curado interno bajo techo a los 7 días y a los tres días por parte de la condición expuesta al ambiente, dicho valor fue de 28.41 MΩcm según la tabla 35, lo cual ratifica que la diferencia entre resistividades eléctricas entre las condiciones de curado interno y el curado convencional fue para la edad de 60 días superior al 70% (ver tabla 36), y que a pesar de los valores de resistividad a partir de los 28

días de edad comenzaron a estabilizarse en la condición de curado interno, los valores logrados fueron tal altos que aún a esta última edad de ensayo el grupo sometido al curado convencional (que aún presentan un crecimiento bajo de resistividad eléctrica) apenas logró alcanzar el 50% del valor obtenido en el grupo del curado interno.

Se hace notorio que el curado interno permite, en primera medida un crecimiento significativo de la resistividad eléctrica durante los primeros días de formación del concreto y que se estabiliza a partir de los 28 días de edad, en donde los crecimientos de este parámetro empiezan a ser mínimos. Por otra parte, en esta condición se obtuvo la mejor apariencia del concreto, es decir que su aspecto y textura demuestran que el concreto ha logrado desarrollarse de forma óptima, pues a diferencia del grupo de curado convencional, cuyo aspecto para los días finales de ensayos era el de un concreto seco bastante rugoso, las probetas sometidas a la condición de estudio aun mostraban aspecto húmedo y una textura aparentemente suave que demuestra un grado de hidratación bastante bueno.

Finalmente en la condición de curado interno, se obtuvieron los valores de resistividad eléctrica más elevados a lo largo de los 60 días de formación, los cuales indican que las probetas de concreto sometidas a esta condición de curado son menos porosas, más impermeables, con una resistencia a la corrosión que hace prácticamente despreciable este parámetro, según la tabla 3 presentada en el marco referencial, aunque si bien con los valores obtenidos en la condición de curado convencional también se logra, es mucho más lenta su obtención y bastante inferior el resultado.

9.3 Resistencia a la compresión y resistividad eléctrica

En este caso las condiciones de curado interno expuesto al ambiente y el curado convencional, se presenta una relación entre el aumento de la resistividad eléctrica y el aumento de la resistencia a la compresión, lo cual no sucede con la condición de curado interno bajo techo, en donde las ganancias de resistencia para esta condición fueron mínimas a lo largo de los 60 días y por lo cual la tendencia que se observa en la gráfica 26 para la resistencia a la compresión se asemeja a una horizontal que indica que sin importar el aumento de la resistividad eléctrica su influencia en dicho parámetro es mínima.

Dentro de las condiciones de curado, la que mejor presentó una relación entre el desarrollo de ambas propiedades analizadas en este trabajo, es la condición de curado interno expuesto al ambiente, en donde los valores de resistencia presentan una tendencia similar a la que presentan los valores de resistividad eléctrica (ver

gráfica 27), éste comportamiento se asemeja al mostrado en la gráfica 1, presentada en el marco referencial en donde se muestra el desarrollo de la resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión durante el tiempo de endurecimiento del concreto en donde a medida que la resistividad aumenta; también lo hace la resistencia a la compresión siguiendo una tendencia similar a la tomada por el primer parámetro.

A diferencia de la condición de curado expuesta al ambiente, la condición bajo techo no muestra la misma relación entre el desarrollo de las dos propiedades analizadas, y aunque, si bien en el análisis por separado de ambos parámetros estos mostraron un desarrollo de sus propiedades similar al obtenido por la segunda condición de curado interno, en cuanto a un crecimiento rápido de ambas propiedades el poco crecimiento de la resistencia a partir de los 14 días de edad hace que este comportamiento creciente entre ambos parámetros no sea notorio.

En la condición de curado convencional que también refleja un comportamiento ascendente de los dos parámetros, en éste caso no son crecimientos de una tendencia similar a diferencia del que se muestra en la gráfica 27 (condición expuesta al ambiente), pues en este caso el crecimiento que muestra la resistencia a la compresión es lineal mientras que el de la resistividad eléctrica se ajusta a un crecimiento polinómico.

La resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión son parámetros que claramente se relacionan en su crecimiento, tal y como se ha mostrado en las gráficas de la sección de relación entre ambos parámetros; sin embargo, la relación más clara la mostró la condición de curado interno expuesta al ambiente, que no solo representa la mejor relación como se mencionó anteriormente, si no que obtuvo los mejores valores de los parámetros evaluados, lo cual indica que este tipo de curado resulta efectivo para el desarrollo de estas propiedades en el concreto y adicional a esto, logra una disminución significativa en los tiempos de formación del concreto tal y como se ha mencionado a lo largo de los análisis de resultados mostrados párrafos atrás.

10. CONCLUSIONES

A lo largo de éste trabajo, se evaluó la influencia que tiene la condición de curado del concreto, específicamente el curado interno en la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica de un concreto ligero usando como agregado grueso piedra pómez, para evaluar dichos parámetros y determinar la influencia de la condición de curado se establecieron tres condiciones de curado: la primera en la cual el material se encontraba en estado de sumersión (curado convencional); la segunda condición corresponde a un estado en donde se obliga al material a ejercer para su hidratación un curado interno, aprovechando la capacidad de absorción de la piedra pómez para almacenar agua, que fuera útil a la hora de ejercer dicha condición de curado; sin embargo, este tipo de curado se mantuvo en condiciones climáticas controladas (bajo techo); finalmente la tercera condición de curado fue similar a la anterior, pero en esta ocasión las probetas de concreto se dejaron expuestas al ambiente, de tal forma que estuvieron expuestas a altas temperaturas (superiores a 21°C) y niveles de precipitación de 47mm sin ningún tipo de protección.

Se hizo evidente que la condición de curado tiene una influencia directa sobre el desarrollo de la resistividad eléctrica, pues en el caso del curado convencional, en donde el concreto (que se mezcló usando piedra pómez sin saturar) tuvo disposición de agua en todo momento, pero solo en el exterior, es decir, que internamente poseía reservas de agua baja; mostró un desarrollo bastante lento que se vio reflejado en los bajos valores obtenidos de resistividad eléctrica. De forma contraria al caso anterior, cuando la probeta de concreto poseía reservas de agua interna, en donde su hidratación podía continuarse fácilmente, se obtuvo un desarrollo bastante bueno, que se vio reflejado en el parámetro evaluado con valores superiores a los obtenidos en la condición de curado convencional.

Los grupos sometidos a curado interno, presentaron una ganancia rápida de resistividad eléctrica desde los primeros días de formación, a excepción de la condición de curado interno bajo techo a los tres días de edad, en donde el valor alcanzado fue similar al obtenido en la condición convencional, recordando que la ganancia fue del 18% según se registró en la tabla 36, sin embargo para la edad de 7 días este valor subió rápidamente hasta que para la edad de 14 días esta ganancia fue de 145%, con una diferencia entre valores obtenidos por ambas condiciones de curado interno del 1% en favor de la condición expuesta al ambiente. Por lo tanto, se hace notorio que el curado interno permite una formación de la matriz cementante más rápida y eficiente como se mencionará en el siguiente párrafo.

A lo largo de las edades de medición de la resistividad eléctrica, la formación de curado interno se mantuvo como la condición que arrojó los valores más altos de este parámetro, mostrando por lo general valores con una ganancia del 100% y

terminando a la edad de 60 días con una diferencia en porcentaje del 75% sobre la condición de curado convencional; sin embargo, esta diferencia se debe en gran medida a que el desarrollo de esta propiedad bajo esta condición de curado, es demasiado acelerado con respecto a las demás condiciones, pues para los 3 días de edad, ya se había logrado un valor de resistividad que en la condición de curado convencional se logró a partir de los 35 días de edad; sin embargo, este crecimiento solo se presentó hasta la edad de 21 días, pues a partir de este punto las ganancias de resistividad eléctrica fueron disminuyendo considerablemente estando por debajo del 10%, mientras que la condición de curado convencional aún lograba ganancias del 12% e inclusive más, ya que a la edad de 21 días la ganancia fue del 29%.

El curado interno permite una formación del concreto eficiente, bastante rápida y por lo tanto satisfactoria, pues para el grupo que se sometió a esta condición de curado, no solo obtuvo los mejores resultados en cuanto a la cuantificación de la resistividad eléctrica, sino que también logró la mejor apariencia del concreto, pues este grupo poseía un aspecto húmedo, incluso a los 60 días de edad, además de una textura suave en comparación del grupo que se sometió a curado convencional, quienes presentaron un aspecto a los 60 días de edad bastante seco y con una textura áspera, tal y como puede evidenciarse en la fotografía en donde se muestra un comparativo entre la apariencia de las tres condiciones de curado para la edad de 42 días.

A pesar de que la condición de curado interno bajo techo se encontraba en condiciones climáticas controladas (de ahí su nombre), no presentó mejores valores de resistividad eléctrica lo que en principio se suponía, ya que éste grupo no se iba a encontrar en contacto directo con el sol ni el viento, que tenderían a secar las probetas de concreto que se expusieron a tales condiciones, sin embargo esta suposición fue errónea, ya que el grupo que se sometió a tales condiciones obtuvo los mejores resultados, esto se debe a que si bien estaban expuestas a las altas temperaturas, también lo estaban a las precipitaciones que en su momento tuvieron lugar sobre la muestra, lo cual ayudó a proporcionar una fuente de agua adicional a la proporcionada en el momento de la mezcla y que favoreció a la evolución de la resistividad eléctrica a lo largo de los 60 días de estudio del grupo.

El otro parámetro evaluado fue el de la resistencia a la compresión, en este caso, no se obtuvo mayor diferencia entre los resultados finales obtenidos a los 60 días de edad entre las tres condiciones de curado, sin embargo lo que si se presentó fue un crecimiento acelerado de este parámetro en las condiciones de curado interno, de tal forma que para la edad de 14 días se había logrado el 76% de la resistencia total obtenida a los 60 días.

Es necesario aclarar que con la dosificación utilizada para realizar la mezcla no se buscó una resistencia a la compresión determinada, ni se buscaba lograr un concreto de fines estructurales, lo que se quería analizar era la sensibilidad de éste parámetro ante una condición de curado interno, es decir que tanto podría aumentar o disminuir el valor de la resistencia cuando se cambia de una condición de curado convencional a una interna, verificando una de las conclusiones obtenidas por Fernández Luco en su estudio (ver la sección de los antecedentes), en el cual concluye que la resistencia a la compresión no es un parámetro totalmente dependiente de la condición de curado, pues tal como se evidenció en éste trabajo al final, es decir, en la última edad de ensayo, la diferencia entre resistencias obtenidas en la condición expuesta al ambiente y la condición convencional solo fue de un 17% mayor a favor de la primera.

A diferencia del parámetro anterior, en donde la condición de curado afectó claramente el desarrollo de esta propiedad a lo largo de los 60 días, en la resistencia a la compresión lo único que se obtuvo fue una aceleración del proceso sin que esto incurriera en la obtención de valores bastante superiores, pues al final de los 60 días las diferencias de resistencia a la compresión obtenidas fueron mínimas.

En la gráfica 1, presentada en el marco referencial, en donde se muestra que el valor de la resistencia a la compresión lograda va de la mano con el valor de resistividad eléctrica obtenido, este comportamiento se verificó por medio de las gráficas 25, 26 y 27 en donde la forma en que se presenta el crecimiento de la resistencia a la compresión es similar a la forma en que se presenta el crecimiento de la resistividad eléctrica.

La condición de curado en donde se ve la mayor relación entre la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica, es en la condición expuesta al ambiente en donde ambos parámetros parecen tener la misma tendencia de crecimiento a lo largo de los 60 días de vida de las muestras de concreto.

Cabe resaltar que un factor importante para la ejecución de un buen curado interno en las condiciones en que se ejerció, es el tamaño del agregado (1 pulgada), pues la granulometría de éste permitiría en primera medida una buena compactación de la mezcla y en segundo lugar una buena reserva de agua almacenada para llevar a cabo el proceso de curado. Si los tamaños del agregado hubieran sido muy grandes, el nivel de compactación de la mezcla sería deficiente, en el caso contrario, en donde los tamaños del agregado fueran demasiado pequeños, la piedra pómez no lograría absorber la cantidad de agua necesaria para llevar a cabo el proceso de curado interno.

Recordando una de las problemáticas mostradas en la justificación del proyecto, en la cual se establecía que en obra cuando el control de curado no se realizaba de forma adecuada, el concreto no lograba desarrollar sus propiedades

adecuadamente, con los resultados de este experimento, se demostró que por medio del curado interno no es necesario llevar a cabo este tipo de control en obra y que los resultados son en su mayoría mejores a los obtenidos en un método de curado convencional.

Finalmente el curado interno acelera los tiempos de formación y/o desarrollo de las matriz cementante, obteniendo como reflejo de las altas resistividades eléctricas obtenidas un concreto menos poroso y por lo tanto más resistente a la corrosión, carbonatación, etc. que no necesitan de un agente externo para ejercer el proceso de curado convencional que en algunas ocasiones no resulta efectivo y que por lo tanto pueden acelerar los procesos en obra con resultados incluso mejores que los obtenidos cuando se practican los métodos convencionales de curado, es decir que se obtienen concretos con la resistencia a la compresión necesaria para el trabajo en menor tiempo de lo normal, con características de durabilidad bastante buenas sin necesidad del uso de aditivos y en tiempos muy cortos.

11. RECOMENDACIONES

Como primera medida, es necesario recordar que el concreto analizado en éste trabajo no se diseñó para propósitos estructurales; por lo tanto, no se recomienda usar éste método de curado interno en concretos para tal fin; se recomienda por lo tanto continuar éste estudio evaluando la influencia del tipo de curado con concreto diseñados para obtener una resistencia específica, en los cuales por obvios motivos, es necesario usar agregados convencionales los cuales deben usarse en determinados porcentajes junto con la piedra pómez (que es el material que permite efectuar el curado interno), para así poder analizar dicha condición de curado.

Otras pruebas a realizar para profundizar sobre la influencia del curado interno, es la de penetración de ion cloruro y la resistencia a la carbonatación, de tal forma que se puedan confrontar los valores obtenidos de resistividad eléctrica con los arrojados por estas pruebas.

Tal y como se verificó en este proyecto, los parámetros de resistencia a la compresión y resistividad eléctrica se relacionan en la tendencia de crecimiento, por lo tanto puede estudiarse la relación clara entre estos parámetros con el propósito de encontrar una formulación que permita predecir la resistencia a la compresión basados en los valores de resistividad eléctrica.

12. PRESUPUESTO DE LA INVESTIGACIÓN

Nombre del proyecto: Influencia del curado interno en la resistencia a la compresión y resistividad eléctrica de un concreto ligero usando como agregado grueso piedra pómez.

Nombre investigadores: Alejandro Quevedo Morales, Diego Fernando Vanegas Buitrago, Gustavo Adolfo Acero Sánchez

Planeación Económica: Facultad de ingeniería civil

CONTROL PRESUPUESTAL DEL PROYECTO

FECHA DE INICIO: 23 de febrero de 2015

DURACIÓN: 3 meses

Actividad a Desarrollar	Ppto Solicitado	% Ppto Ejecutado	Ppto sin Ejecutar	% de Avance	Ppto Gastado	Observaciones
Compra de material	\$170,700		\$50,000		\$220,700	
Inicio de fundición de concreto en cada probeta	\$30,000		-		\$30,000	
Primer ensayo	\$20,000		\$5,000		\$25,000	
Segundo ensayo	\$20,000		\$5,000		\$25,000	
Tercer ensayo	\$20,000		\$5,000		\$25,000	
Total ppto solicitado	\$260,700		Total ejecutado por el proyecto		\$325,000	Diferencia \$64.300

13. CRONOGRAMA

ACTIVIDAD	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO
SATURACIÓN DE MATERIAL	23			
PREPARACIÓN DE PROBETAS	26			
MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD		5, 12, 26		
PRUEBA DE RESISTENCIA		26		
SATURACIÓN DE MATERIAL	23			
PREPARACIÓN DE PROBETAS	27			
MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD		6, 13, 27		
PRUEBA DE RESISTENCIA		27		
SATURACIÓN DE MATERIAL	23			
PREPARACIÓN DE PROBETAS	26			
MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD		5, 12, 26	2, 9, 16, 23, 30	
PRUEBA DE RESISTENCIA			30	
ANÁLISIS DE RESULTADOS				3

En el cronograma se muestran los días en los cuales se realizará la actividad mencionada correspondiente.

14. REFERENCIAS

AMERICAN INSTITUTE OF CONCRETE. "standard specification for curing concrete (ACI308.1)"; "guide to curing concrete" (ACI 308R), ACI COMMITTEE, Estados Unidos de América, 2007, 31h: il (ACI 308).

AMERICAN INSTITUTE OF CONCRETE. Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete. ACI COMMITTEE. Estados Unidos de América: ACI COMMITTEE, 2003, 38h: il.(ACI 213R).

ANDRADE, C., ALONSO, C. y CASTELLOTE, M; la dependencia umbral de cloruro de enfrentar potencial de refuerzos. *Electrochimica Acta*, vol.47 (2002), 3469-3481.

ANDRADE, C; R.D, Andrea; la resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. En: revista ALCONPAT. Vol 1. No. 2(Mayo-Agosto, 2011).pág. 93-101.

ARGOS, Concreto liviano, (en línea)<<http://www.argos.co/Media/Colombia/images/concreto+liviano-1.pdf>>.

CASTELLOTE, M. ANDRADE, C. and ALONSO, M; Standardization, to a reference of 25°, of Electrical Resistivity for Mortars and Concretes in Saturated or Solated Conditions. *ACI Materials Journal*, Vol 99, March-April 2002, 119-128.

FERNÁNDEZ LUCO, L., Valoración de las técnicas no destructivas para el control de la eficiencia de curado del hormigón. San Vicente del Raspeig, España, 2008. Tesis doctoral. Universidad de Alicante.

GONZÁLEZ SERSEN, Álvaro Mauricio; Estudio experimental de la relación entre la resistividad eléctrica del hormigón y su resistencia a la penetración de iones cloruro; Santiago, Chile, 2011; memoria para optar el título de ingeniero civil; Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

H., Paiva, L. P. Esteves, P., Cachim V. M., Ferreira; Efecto de las condiciones de curado en las propiedades mecánicas de los morteros con partículas súper absorbentes. En: revista *Materiales de construcción*. Vol. 60. No. 298 (Abril-Junio, 2010). Pág. 61-72.

HORACIO LÓPEZ, Raúl; caracterización de medios porosos y procesos percolativos y de transporte. SAN Luis, Argentina. 2002. Tesis de grado (magister en Física). Universidad Nacional de San Luis, facultad de ciencias Físico-Matemáticas y Naturales; departamento de Física. P. 38.

LÓPEZ, Mauricio. Curado interno en hormigones de alto desempeño – un nuevo paradigma. En: revista ingeniera de construcción. Vol. 20. No. 2. (Agosto, 2005).Pág. 117-126.

LÓPEZ YÉPEZ, Lucio Guillermo. Influencia del porcentaje de adición de la microsílíce y del tipo de curado en la penetración del ion cloruro en el concreto de alto desempeño. Bogotá, Colombia. 2010. Tesis para optar por el título de Maestría en estructuras. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería.

LUCO FERNÁNDEZ, Luis. Propuesta de indicadores del curado en obra. En: revista investigación y desarrollo. Vol. 1 No. 2 (Junio, 2010) pág. 17-30.

METHA, P.K, MONTEIRO, P.J; Concrete Microstructure, Properties and Materials. Edit. McGraw-Hill, United States of America, 2006.

MORENO, Éric I., SERRRANO - ZEBADUA, Carlos, SOLÍS - CARCAÑO, Rómel G.; Influencia del tiempo de curado húmedo en la resistencia y durabilidad del concreto en clima tropical. En: revista investigación y desarrollo. Vol. 4 No. 2 (Enero- Junio, 2013) pág. 15-25.

MORENO, Éric I., SOLÍS-CARCAÑO, Rómel, VÁZQUEZ-ROJAS, Cecilio; Diferencias en la resistencia de concretos sujetos a curados húmedos y al ambiente en clima cálido subhúmedo. En: revista investigación y desarrollo. Vol. 3. No. 1 (Julio-Diciembre, 2011) pág. 25-35.

MORRIS, W., VICO, A., VÁSQUEZ, M. y DE SÁNCHEZ, S; Corrosion of rein forcing steele valuated by means of concrete resistivity measurements. Corrosion Science, Vol. 44 (2002), 81-99.

NORMA SISMORESISTENTE COLOMBIANA. Titulo C concreto estructural: definiciones. Bogotá: ICONTEC, 2010. C-18: il. (NSR-10 C2.2).

NRMCA. CIP35-Prueba de Resistencia a la Compresión del Concreto. Artículo en línea <<http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP35es.pdf>>. 3p. (citado 10 de noviembre de 2014).

POLDER, R; Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. Recommendation of RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion. Materials and Structures, Vol.33, December 2002, 603-611.

REBOLLEDO RAMOS, Nuria. Aplicación de técnicas no destructivas al estudio del hormigón fresco. Madrid, España, 2010. Tesis para optar por el título de master en ingeniería de las estructuras, cimentaciones y materiales. Universidad Politécnica de Madrid.

SAMPIERI HERNÁNDEZ, Roberto. Metodología de la investigación. 4 ed. México: Mc Graw Hill, 2006. 850 p. Metodología de la investigación ISBN 970-10-5753-8.

T.C., Powers; a discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete, in Proceedings of the Highway Research Board: Washington DC. 1947.

TAMAYO Y TAMAYO, Mario. Aprender a investigar modulo dos: la investigación. 4 ed. Colombia: ICFES, 140 p. Aprender a investigar. ISBN 958-9279-13-9.

VALDEZ GUZMÁN, Luis Alberto; Hormigones livianos; Guayaquil, Ecuador, 2010; tesina de grado para optar por el título de ingeniero civil; escuela superior politécnica del litoral, facultad de ingeniería en ciencias de la tierra; p. 21.

VIDELA, Carlos, TAPIA, Patricio; Efecto del secado en ambiente de servicio en la evolución de las propiedades mecánicas de hormigones livianos estructurales. En. Revista ingeniería de construcción. Vol. 22. No. 2 (Agosto, 2007). Pág. 123-137.

15. ANEXOS

CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE PIEDRA PÓMEZ

Para conocer el porcentaje de agua que puede absorber la piedra pómez se tomaron diez piedras pómez, las cuales se colocaron en 5 recipientes respectivamente enumerados, lo que quiere decir que en cada recipiente se colocaron dos piedras pómez.

Cada recipiente se pesó y se anotó su registro, posteriormente se le agregó una cantidad considerable de agua para saturar las piedras, y se volvió a pesar cada recipiente. Las muestras saturadas se dejaron durante 48 horas para que la piedra absorbiera el agua y así saber cuál es su capacidad de absorción.

Después de haber transcurrido 48 horas se volvieron a pesar los recipientes con y sin agua tomando su respectivo registro, en este cálculo se debe tener en cuenta que en el transcurso de las 48 horas aparte de que la piedra pómez absorbió una determinada cantidad de agua, otra cierta cantidad de agua fue evaporada.



Fotografía 24. Muestras de piedra pómez.
Tomada 16 de Marzo de 2015.



Fotografía 25. Muestras de piedra pómez con agua.
Tomada 16 de Marzo de 2015.

Los cálculos que se hicieron para saber la cantidad de agua que puede absorber la piedra pómez fueron los siguientes:

$$\text{peso piedra pomez} = Pp = Wp - Wr \quad (5)$$

$$\text{peso piedra pomez con agua} = Ppa = Wpa - Wr \quad (6)$$

$$\text{agua agregada} = Aa = Ppa - Pp \quad (7)$$

$$\text{peso piedra pomez (48 horas)} = Pp48 = Wp48 - Wr \quad (8)$$

$$\text{peso piedra pomez con agua (48 horas)} = Ppa48 = Wpa48 - Wr \quad (9)$$

$$\text{agua agregada (48horas)} = Aa48 = Ppa48 - Pp48 \quad (10)$$

$$\text{agua evaporada} = Ae = Ppa - Ppa48 \quad (11)$$

$$\text{agua retenida} = Ar = Pp - Pp48 \quad (12)$$

$$\text{agua total agregada (48horas)} = AT = Aa48 + Ae + Ar = Aa \quad (13)$$

$$\% \text{ de agua retenida} = \%Ar = \frac{Ar * 100}{AT} \quad (14)$$

Dónde:

Wp = peso recipiente más piedra pómez (g).

Wr = peso recipiente (g).

Wpa = peso de recipiente más piedra pómez con agua (g).

Wp48 = peso de recipiente más piedra pómez (48 horas) (g).

Wpa48 = peso de recipiente más piedra pómez con agua (48 horas) (g).

A los resultados de agua retenida, agua evaporada y % de agua retenida se realizó un promedio de las 5 muestras, los resultados de estos cálculos se muestran en las siguientes tablas:

Tabla A1. Datos iniciales para medición de capacidad de absorción de piedra pómez.

muestra	peso recipiente (g)	peso recipiente más piedra pómez (g)	peso de recipiente más piedra pómez con agua (g)	peso de recipiente más piedra pómez con agua (48 horas) (g)	peso recipiente más piedra pómez (48 horas) (g)
1	41	80	285	258,5	91,9
2	37,3	67,4	208,8	182	77,4
3	36,5	59,7	237,3	210,3	70,8
4	33,9	62,4	226,1	200,1	73,4
5	40,5	70,9	276,4	250,3	82,5

Tabla A2. Cálculo de porcentaje de absorción de piedra Pómez.

Muestra	Piedra pómez (g)	Piedra pómez con agua (g)	Agua agregada (g)	Piedra pómez con agua (48 horas) (g)	Piedra pómez (48 horas) (g)	agua agregada (48 horas) (g)	Agua reten. (g)	Agua evaporada (g)	Agua total agregada (g)	% de agua retenida
1	39	244	205	217,5	50,9	166,6	11,9	26,5	205	5,80
2	30,1	171,5	141,4	144,7	40,1	104,6	10	26,8	141,4	7,07
3	23,2	200,8	177,6	173,8	34,3	139,5	11,1	27	177,6	6,25
4	28,5	192,2	163,7	166,2	39,5	126,7	11	26	163,7	6,72
5	30,4	235,9	205,5	209,8	42	167,8	11,6	26,1	205,5	5,64
Promedio							11,12	26,48		6,30

Como se puede observar el agua que se evaporó en el transcurso de las 48 horas fue de 26.48 g aproximadamente, debido a que las muestras estuvieron expuestas al ambiente.

El agua que pudo retener la piedra pómez fue de aproximadamente 11.12 g, es decir, un 6.30% del total de agua agregada inicialmente, pero como en cada recipiente se agregaron de a dos piedras pómez quiere decir que aproximadamente cada piedra pómez tiene la capacidad de absorber y retener 5.56 g de agua o 3.15% de agua.



Fotografía 26. Muestras de piedra pómez seca. Tomada 16 de Marzo de 2015.

GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO

Peso material (g) 2790

Tabla A3. Granulometría del agregado grueso (piedra pómez).

Tamiz	Peso retenido	Peso que pasa	% pasa	% retenido
3/4"	130	2655.5	95%	5%
1/2"	1419	1236.5	44%	56%
3/8"	617.5	619	22%	78%
No 4	333	286	10%	90%
No 10	286	0	0%	100%

2785.5

Error (%) 0.002

DENSIDAD DEL CONCRETO LIGERO

Teniendo en cuenta que se trabajó con un concreto ligero, es necesario el cálculo de su densidad relativa ya que tal y como lo exige la ACI 213R-2003 ésta no debe superar los 1850Kg/m³.

Para determinar la densidad se siguió el proceso dictado en la NTC 1926; pesando las probetas de concreto y dividiendo por su respectivo volumen (1.6 x 10⁻³ m³) (ecuación 15). Los resultados se muestran a continuación en la tabla A4.

$$Densidad \left(\frac{Kg}{m^3} \right) = \frac{Masa}{Vol} \quad (15)$$

Tabla A4. Cálculo de la densidad relativa del concreto.

Probeta	condición de curado	Días para ensayo de compresión	Diámetro (m)	Long. (m)	Volumen (m ³)	Masa (Kg)	Densidad (Kg/m ³)
1	Convencional	60	0.1	0.2	0.0016	2.57	1,636.11
2	Convencional	60	0.1	0.2	0.0016	2.67	1,697.86
3	Convencional	60	0.1	0.2	0.0016	2.55	1,622.74
4	Convencional	60	0.1	0.2	0.0016	2.60	1,653.94
5	Convencional	60	0.1	0.2	0.0016	2.73	1,739.25
1	Bajo techo	60	0.1	0.2	0.0016	2.35	1,496.06
2	Bajo techo	60	0.1	0.2	0.0016	2.31	1,471.23
3	Bajo techo	60	0.1	0.2	0.0016	2.36	1,504.33
4	Bajo techo	60	0.1	0.2	0.0016	2.27	1,447.04
5	Bajo techo	60	0.1	0.2	0.0016	2.32	1,474.41
1	Expuesto al ambiente	60	0.1	0.2	0.0016	2.44	1,553.99
2	Expuesto al ambiente	60	0.1	0.2	0.0016	2.41	1,532.98
3	Expuesto al ambiente	60	0.1	0.2	0.0016	2.32	1,479.50
4	Expuesto al ambiente.	60	0.1	0.2	0.0016	2.43	1,548.90
5	Expuesto al ambiente	60	0.1	0.2	0.0016	2.36	1,504.97
1	Convencional	28	0.1	0.2	0.0016	2.55	1,620.83
2	Convencional	28	0.1	0.2	0.0016	2.52	1,604.28
3	Convencional	28	0.1	0.2	0.0016	2.45	1,562.26

Probeta	condición de curado	Días para ensayo de compresión	Diámetro (m)	Long. (m)	Volumen (m ³)	Masa (Kg)	Densidad (Kg/m ³)
4	Convencional	28	0.1	0.2	0.0016	2.46	1,562.90
5	Convencional	28	0.1	0.2	0.0016	2.60	1,654.57
1	Bajo techo	28	0.1	0.2	0.0016	2.52	1,601.74
2	Bajo techo	28	0.1	0.2	0.0016	2.56	1,630.38
3	Bajo techo	28	0.1	0.2	0.0016	2.51	1,597.92
4	Bajo techo	28	0.1	0.2	0.0016	2.36	1,503.70
5	Bajo techo	28	0.1	0.2	0.0016	2.52	1,604.28
1	Expuesto al ambiente	28	0.1	0.2	0.0016	2.46	1,564.81
2	Expuesto al ambiente.	28	0.1	0.2	0.0016	2.42	1,537.44
3	Expuesto al ambiente	28	0.1	0.2	0.0016	2.54	1,615.10
4	Expuesto al ambiente	28	0.1	0.2	0.0016	2.43	1,546.99
5	Expuesto al ambiente	28	0.1	0.2	0.0016	2.47	1,571.18
1	Convencional	14	0.1	0.2	0.0016	2.57	1,636.11
2	Convencional	14	0.1	0.2	0.0016	2.56	1,630.38
3	Convencional	14	0.1	0.2	0.0016	2.43	1,546.35
4	Convencional	14	0.1	0.2	0.0016	2.46	1,564.17
5	Convencional	14	0.1	0.2	0.0016	2.46	1,567.99
1	Bajo techo	14	0.1	0.2	0.0016	2.53	1,609.37
2	Bajo techo	14	0.1	0.2	0.0016	2.56	1,627.20
3	Bajo techo	14	0.1	0.2	0.0016	2.43	1,548.26
4	Bajo techo	14	0.1	0.2	0.0016	2.55	1,623.38
5	Bajo techo	14	0.1	0.2	0.0016	2.56	1,631.02
1	Expuesto al ambiente	14	0.1	0.2	0.0016	2.49	1,582.00
2	Expuesto al ambiente	14	0.1	0.2	0.0016	2.54	1,613.83
3	Expuesto al ambiente	14	0.1	0.2	0.0016	2.56	1,629.75
4	Expuesto al ambiente	14	0.1	0.2	0.0016	2.54	1,617.01
5	Expuesto al ambiente	14	0.1	0.2	0.0016	2.58	1,642.48
Promedio					0.0016	2.4857	1,582.47
Cumple criterio de densidad de concreto ligero							

Como se logra observar, todos los cilindros que se elaboraron independientemente de los días en los que serán sometidos al ensayo de compresión son concretos ligeros, ya que no superan la densidad de 1850 kg/m^3 .

De una forma más general se puede decir que se trabajó con un concreto ligero cuya densidad promedio fue 1582.47 kg/m^3 .

REGISTRO DE TEMPERATURAS

Tabla A5. Registro climático desde febrero 1 de 2015 hasta abril 27 de 2015

	Alto	Bajo	precip.	Nieve	Previsión	Máx. media	Mín. media
dom	19°	12°	9 mm	0 cm		20°	9°
1/02/15							
lun	19°	11°	0 mm	0 cm		20°	9°
2/02/15							
mar	18°	10°	0 mm	0 cm		20°	9°
3/02/15							
mié	16°	11°	0 mm	0 cm		20°	9°
4/02/15							
jue	22°	10°	0 mm	0 cm		20°	9°
5/02/15							
vie	18°	9°	3 mm	0 cm		20°	9°
6/02/15							
sáb	18°	8°	15 mm	0 cm		20°	9°
7/02/15							
dom	17°	10°	3 mm	0 cm		20°	9°
8/02/15							
lun	18°	11°	0 mm	0 cm		20°	9°
9/02/15							
mar	17°	9°	0 mm	0 cm		20°	9°
10/02/15							
mié	19°	9°	0 mm	0 cm		20°	9°
11/02/15							
jue	18°	12°	0 mm	0 cm		20°	9°
12/02/15							
vie	20°	11°	0 mm	0 cm		20°	9°
13/02/15							
sáb	20°	10°	0 mm	0 cm		20°	9°
14/02/15							
dom	20°	9°	0 mm	0 cm		20°	9°
15/02/15							
lun	24°	5°	0 mm	0 cm		20°	10°
16/02/15							
mar	22°	3°	0 mm	0 cm		20°	10°
17/02/15							
mié	21°	7°	0 mm	0 cm		20°	10°
18/02/15							
jue	20°	7°	0 mm	0 cm		20°	10°
19/02/15							

	Alto	Bajo	precip.	Nieve	Previsión	Máx. media	Mín. media
vie	29°	8°	0 mm	0 cm		20°	10°
20/02/15							
sáb	29°	5°	0 mm	0 cm		20°	10°
21/02/15							
dom	21°	6°	0 mm	0 cm		20°	10°
22/02/15							
lun	22°	8°	0 mm	0 cm		20°	10°
23/02/15							
mar	19°	6°	0 mm	0 cm		20°	10°
24/02/15							
mié	18°	10°	0 mm	0 cm		20°	10°
25/02/15							
jue	11°	10°	0 mm	0 cm		20°	10°
26/02/15							
vie	20°	12°	0 mm	0 cm		20°	10°
27/02/15							
sáb	20°	8°	0 mm	0 cm		20°	10°
28/02/15							
dom	21°	8°	3 mm	0 cm		20°	10°
1/03/15							
lun	21°	9°	0 mm	0 cm		20°	10°
2/03/15							
mar	21°	12°	0 mm	0 cm		20°	10°
3/03/15							
mié	19°	10°	0 mm	0 cm		20°	10°
4/03/15							
jue	19°	9°	0 mm	0 cm		20°	10°
5/03/15							
vie	19°	11°	0 mm	0 cm		20°	10°
6/03/15							
sáb	20°	11°	0 mm	0 cm		20°	10°
7/03/15							
dom	20°	10°	0 mm	0 cm		20°	10°
8/03/15							
lun	18°	11°	0 mm	0 cm		20°	10°
9/03/15							
mar	19°	11°	0 mm	0 cm		20°	10°
10/03/15							
mié	19°	11°	0 mm	0 cm		20°	10°
11/03/15							
jue	22°	7°	6 mm	0 cm		20°	10°
12/03/15							

	Alto	Bajo	precip.	Nieve	Previsión	Máx. media	Mín. media
vie 13/03/15	21°	9°	0 mm	0 cm		20°	10°
sáb 14/03/15	21°	11°	4 mm	0 cm		20°	10°
dom 15/03/15	22°	8°	18 mm	0 cm		20°	10°
lun 16/03/15	22°	10°	9 mm	0 cm		19°	10°
mar 17/03/15	19°	12°	21 mm	0 cm		19°	10°
mié 18/03/15	20°	11°	0 mm	0 cm		19°	10°
jue 19/03/15	17°	11°	8 mm	0 cm		19°	10°
vie 20/03/15	18°	11°	7 mm	0 cm		19°	10°
sáb 21/03/15	17°	10°	0 mm	0 cm		19°	10°
dom 22/03/15	20°	5°	0 mm	0 cm		19°	10°
lun 23/03/15	20°	7°	0 mm	0 cm		19°	10°
mar 24/03/15	19°	10°	0 mm	0 cm		19°	10°
mié 25/03/15	20°	9°	10 mm	0 cm		19°	10°
jue 26/03/15	21°	9°	4 mm	0 cm		19°	10°
vie 27/03/15	21°	9°	0 mm	0 cm		19°	10°
sáb 28/03/15	21°	7°	2 mm	0 cm		19°	10°
dom 29/03/15	17°	10°	3 mm	0 cm		19°	10°
lun 30/03/15	20°	9°	29 mm	0 cm		19°	10°
mar 31/03/15	21°	9°	0 mm	0 cm		19°	10°
mié 1/04/15	20°	11°	0 mm	0 cm		19°	10°
jue 2/04/15	20°	10°	1 mm	0 cm		19°	10°

	Alto	Bajo	precip.	Nieve	Previsión	Máx. media	Mín. media
vie	19°	11°	6 mm	0 cm		19°	10°
3/04/15							
sáb	19°	11°	6 mm	0 cm		19°	10°
4/04/15							
dom	19°	9°	0 mm	0 cm		19°	10°
5/04/15							
lun	19°	12°	0 mm	0 cm		19°	10°
6/04/15							
mar	20°	11°	0 mm	0 cm		19°	10°
7/04/15							
mié	20°	12°	0 mm	0 cm		19°	10°
8/04/15							
jue	18°	10°	0 mm	0 cm		19°	10°
9/04/15							
vie	20°	10°	0 mm	0 cm		19°	11°
10/04/15							
sáb	19°	10°	0 mm	0 cm		19°	11°
11/04/15							
dom	19°	12°	0 mm	0 cm		19°	11°
12/04/15							
lun	19°	10°	3 mm	0 cm		19°	11°
13/04/15							
mar	20°	11°	15 mm	0 cm		19°	11°
14/04/15							
mié	19°	11°	1 mm	0 cm		19°	11°
15/04/15							
jue	19°	11°	24 mm	0 cm		19°	11°
16/04/15							
vie	16°	11°	15 mm	0 cm		19°	11°
17/04/15							
sáb	20°	11°	47 mm	0 cm		19°	11°
18/04/15							
dom	17°	12°	3 mm	0 cm		19°	11°
19/04/15							
lun	20°	11°	6 mm	0 cm		19°	11°
20/04/15							
mar	18°	12°	0 mm	0 cm		19°	11°
21/04/15							
mié	18°	9°	0 mm	0 cm		19°	11°
22/04/15							
jue	20°	10°	0 mm	0 cm		19°	11°
23/04/15							

	Alto	Bajo	precip.	Nieve	Previsión	Máx. media	Mín. media
vie	20°	9°	0 mm	0 cm		19°	11°
24/04/15							
sáb	18°	9°	1 mm	0 cm		19°	11°
25/04/15							
dom	19°	9°	5 mm	0 cm	Nublado	19°	11°
26/04/15							
lun	20°	9°	13 mm	0 cm	Algunos chubascos y tormentas	19°	11°
27/04/15							