



# UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO.



## FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL.

### “MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO PARA ESTRUCTURAS LOCALIZADAS EN SUELOS SALINOS”

#### TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS  
TERRESTRES.

PRESENTA:

**ING. JORGE ALBERTO PACHECO SEGOVIA**

ASESOR:

**M.A. WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA**

COASESORES:

**DR. ANDRÉS ANTONIO TORRES ACOSTA**

**DR. ANGÉLICA DEL VALLE MORENO**

Morelia, Michoacán, Noviembre 2018.



## RESUMEN.

---

Construir un nuevo aeropuerto en la Ciudad de México es una necesidad primordial, debido a que el actual aeropuerto “Benito Juárez” es insuficiente para el servicio que demandan los usuarios, además de la peligrosidad que representa el tener un aeropuerto tan cerca de las viviendas de la población civil.

Desde hace más de quince años el gobierno federal ha buscado la alternativa de construir un nuevo aeropuerto, más moderno, con mayor capacidad y más seguro; la zona destinada a este proyecto es en lo que fue el Lago de Texcoco, en el Estado de México. Sin embargo, esta zona presenta alta salinidad, lo que es un inconveniente para las edificaciones que ahí se construyan.

En su primera etapa, programada para concluir en el año 2020 está la construcción de una terminal de 74 hectáreas de extensión, con capacidad para atender a más de 68 millones de personas anualmente, 1500 operaciones de vuelo diariamente, una torre de control y 3 pistas. En su capacidad máxima para el año 2060 se atenderán 120 millones de personas anualmente y habrá 6 pistas.

La concentración de sales en el suelo del ex-lago de Texcoco representa uno de los parámetros principales para el diseño del concreto hidráulico a utilizar, ya que se debe de garantizar la durabilidad de tan importante proyecto por lo que no solamente se debe de diseñar la estructura por resistencia, sino también por durabilidad. Esto implica diseñar un concreto resistente al ataque de agentes agresivos (ion cloruro) con el fin de garantizar una vida útil de por los menos 100 años.

La resistencia a compresión ha sido utilizada por lo regular como un indicador de la durabilidad del concreto; sin embargo, cada día se hace más evidente que por sí misma no determina la durabilidad del concreto.

El presente trabajo muestra el desempeño en términos de durabilidad de trece mezclas de concreto elaboradas por dos cementeras (Cementera A y Cementera B), las pruebas a las que se sometieron fueron tres: resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión, las primeras dos se clasifican como pruebas no destructivas y la tercera se clasifica como prueba destructiva.

Los resultados obtenidos de estas 3 pruebas se compararon con los valores que establecen sus correspondientes normas de durabilidad, verificando de esta forma la facilidad con la que los iones despasivantes atravesarán el recubrimiento que protege al acero de refuerzo hasta alcanzar la armadura y provocar su despasivación.

Con base en los resultados de las pruebas de resistividad se elaboró un ábaco o monograma para la determinación de la vida útil (periodo de iniciación -  $T_i$ ) de las trece mezclas de concreto, el cual está en función del espesor de recubrimiento y del factor edad “ $q_b$ ”. En la deducción del monograma se consideró como agente despasivante al ion cloruro.

**Palabras clave:** Suelo salino, concreto reforzado, durabilidad, corrosión, resistividad.

---



## SUMMARY.

---

Building a new airport in Mexico city is a fundamental necessity, because the current “Benito Juárez” airport is insufficient for the service demanded by users in addition to the danger represented by having an airport so close of the civilian population. For more than fifteen years the federal goverment has sought the alternative of building a new airport more modern, with greater capacity and safer.

The area destined for this project is in what used to be Texcoco’s lake in the state of Mexico, however this area has high salinity which is a disavantage for the buildings that are built there. In its first stage schedule for completion in 2020 is the construction of a seventy-four hectares terminal with the capacity to serve more than 68,000,000 people annually, 1500 flight operations daily, a control tower and three runways; in its maximum capacity for the year 2060, 120,000,000 people will be served annually and there will be six tracks.

The concentration of salts in the soil of the ex-lake of Texcoco represents one of the main parameters for the design of the hydraulic concrete to be used since the durability of such an important project must be guaranteed so, not only must the structure be designed for resistance but also for durability. This involves designing a concrete to the attack of aggressive agents (chlorine ion) in order to guarantee a useful life of at least one-hundred years.

Compressive strength has regularly been used as an indicador of concrete durability, however it is becoming increasingly apparent that it does not by itself determine the durability of concrete.

The present work shows the performance in terms of durability of thirteen concrete mixtures produced by two cement plants (Cementera A and Cementera B), the test to which they were subjected were three: electric resistivity, ultrasonic pulse velocity and compressive strength, the first two are classified as non-destructive tests, and the third is classified as destructive test.

The results obtained from these three tests were compared with the values established by their corresponding durability standards thus verifying the ease with which the displacing ions will pass through the coating that protects the reinforcing steel until they reach the reinforcement and cause it to displace. Based on the results of the resistivity tests, an abacus or monogram was elaborated for the determination of the useful life (initiation period  $-T_i$ ) of the thirteen concrete mixtures, which depends on the coating thickness and the age factor “ $q_b$ ”. In the deduction of the monogram, the chloride ion was considered as an impassive agent.

**Key words:** Saline soil, reinforced concrete, durability, corrosion and resistivity.



## **AGRADECIMIENTOS.**

---

A mi madre, por todo su apoyo durante mi formación profesional.

A mi asesor de tesis el M.A. Wilfrido Martínez Molina, por sus enseñanzas, apoyo incondicional y consejos, por confiar en mí desde un principio y sobre todo, haberme brindado su amistad la cual valoro y aprecio.

A la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, por cada palabra de aliento, apoyo y consejo, los cuales fueron la base para querer estudiar un doctorado y convertirme en un mejor profesional.

Al Dr. Andrés Antonio Torres Acosta, por su tiempo, enseñanzas y consejos para el desarrollo y conclusión de esta investigación.

A la Dra. Angélica del Valle Moreno, por sus enseñanzas y apoyo para la realización de este trabajo.

Al Instituto Mexicano del Transporte, por haberme permitido el uso de sus instalaciones para llevar a cabo esta investigación.



## ÍNDICE DE CONTENIDO.

---

RESUMEN.....	I
SUMMARY.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	XIII
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	XIV
OBJETIVOS.....	XVII
PROBLEMÁTICA.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. Resistividad eléctrica.....	4
1.2. Medida de la resistividad.....	4
1.2.1. Método directo.....	5
1.2.2. Método de las cuatro puntas o de Wenner.....	8
1.3. Factores que influyen en la medida de la resistividad eléctrica del concreto.....	11
1.3.1. Factores ligados a las propiedades de la mezcla.....	11
1.3.1.1. Tipo de cemento.....	11
1.3.1.2. Tipo de agregados.....	12
1.3.1.3. Relación agua – cemento.....	12
1.3.1.4. La porosidad.....	12
1.3.1.5. El grado de saturación.....	13
1.3.1.6. Los iones cloruro.....	14
1.3.2. Adiciones en el concreto.....	15
1.3.3. Factores ligados al ambiente.....	15
1.3.3.1. Humedad superficial.....	15
1.3.3.2. Temperatura.....	15
1.3.4. Factores ligados al estado de la estructura.....	16
1.4. Conceptos básicos de durabilidad.....	17
1.4.1. Introducción.....	17
1.4.2. Conceptos básicos de durabilidad.....	17



1.4.2.1.	Durabilidad. ....	17
1.4.2.2.	Degradación. ....	17
1.4.2.3.	Vida útil.....	18
1.4.2.4.	Vida residual.....	18
1.4.2.5.	Estado límite de servicio (ELS).....	18
1.4.2.6.	El estado límite último (ELU). ....	18
1.4.3.	Modelos de durabilidad propuestos en la literatura. ....	20
1.4.3.1.	El modelo de Tuutti:.....	20
1.4.3.1.1.	Tiempo o periodo de iniciacion. ....	20
1.4.3.1.2.	Tiempo o periodo de propagacion. ....	21
1.4.3.2.	El modelo de Bazant.....	21
1.4.3.3.	El modelo de Browne.....	21
1.4.3.4.	El modelo de Beeby.....	21
1.4.4.	Procedimiento general para el diseño por durabilidad. ....	22
CAPITULO II. ESTADO DEL ARTE. ....		23
2.1.	Introducción. ....	23
2.2.	Fundamento del método. ....	24
2.3.	Deducción de la fórmula para el cálculo de la vida útil de estructuras de concreto a partir del valor de Resistividad.....	25
2.3.1.	Factor de retardo ( $r_b$ ). ....	28
2.3.2.	Resistividad aparente ( $\rho_{ap}$ ). ....	29
2.3.3.	Factor de exposición ambiental para el periodo de iniciación ( $F_{exp}$ ). ....	30
2.3.4.	Resistividad efectiva ( $\rho_{ef}$ ). ....	31
2.3.5.	Factor edad ( $q$ ). ....	33
CAPITULO III. CEMENTERA A. ....		35
3.1.	Introducción.....	35
3.2.	Datos de las mezclas de concreto. ....	36
3.3.	Análisis de las mezclas de concreto. ....	37
3.4.	Resistividad eléctrica húmeda. ....	40
3.4.1.	Comparativa de los resultados obtenidos con su correspondiente norma de durabilidad. ....	65
3.5.	Resistencia a la compresión. ....	66
3.5.1.	Comparativa de los resultados obtenidos con su correspondiente norma de durabilidad. ....	74



3.6. Velocidad de pulso ultrasónico. ....	75
3.6.1. Comparativa de los resultados obtenidos con su correspondiente norma de durabilidad. ....	83
CAPITULO IV. CEMENTERA B. ....	84
4.1. Introducción. ....	84
4.2. Datos de las mezclas de concreto. ....	85
4.3. Resistividad eléctrica húmeda. ....	86
4.3.1. Comparativa de los resultados obtenidos con su correspondiente norma de durabilidad. ....	110
4.4. Resistencia a la compresión. ....	111
4.4.1. Comparativa de los resultados obtenidos con su correspondiente norma de durabilidad. ....	119
4.5. Velocidad de pulso ultrasónico. ....	120
4.5.1. Comparativa de los resultados obtenidos con su correspondiente norma de durabilidad. ....	128
CAPITULO V. ELABORACIÓN DE UN MONOGRAMA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VIDA ÚTIL (TIEMPO DE INICIACIÓN) DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO A PARTIR DEL PARÁMETRO “q <sub>b</sub> ” (AGE FACTOR BEFORE 28 DAYS CURED). ....	129
5.1. Valores de “q <sub>b</sub> ” y “q <sub>a</sub> ” para las mezcla elaboradas por la Cementara A. ....	130
5.2. Valores de “q <sub>b</sub> ” y “q <sub>a</sub> ” para las mezcla elaboradas por la Cementara B. ....	134
5.3. Calculo del Porcentaje de Error para las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera A. ....	139
5.4. Calculo del Porcentaje de Error para las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera B. ....	143
5.5. Cálculo del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo para un periodo de iniciación de 100 años. ....	148
5.6. Evolución del periodo de iniciación (Ti) - Cementera A. ....	155
5.7. Evolución del periodo de iniciación (Ti) - Cementera B. ....	159
5.8. Limitaciones en el cálculo de la vida útil (periodo de iniciación). ....	163
5.9. Dedución de una formula empírica para la predicción y cálculo de la vida útil (periodo de iniciación). ....	164
5.10. Cálculo del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo a partir de la fórmula de la Doctora Andrade. ....	171
5.11. Cálculo del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo a partir de la fórmula empírica obtenida. ....	172
5.12. Elaboración de ábacos de diseño para la determinación de la vida útil (periodo de iniciación) de las mezclas de concreto. ....	178



5.13. Relación entre el parámetro “ $q_b$ ” (age factor before 28 days cured) y la composición de las mezclas de concreto. ....	186
5.14. Diseño de mezclas de concreto a partir del parámetro “ $q_b$ ” (age factor before 28 days cured). ....	190
5.15. Beneficio en el costo del diseño de la mezcla de concreto. ....	193
ANÁLISIS Y CONCLUSIONES. ....	195
BIBLIOGRAFÍA. ....	197
ANEXO A (Informativo). ....	199



## ÍNDICE DE TABLAS.

---

<b>Tabla 1.</b> Valores simplificados del factor de retardo (PNE 83994-2, 2016). .....	28
<b>Tabla 2.</b> Valores del factor de exposición ambiental en función de la clase de ambiente (PNE 83994-2, 2016). .....	31
<b>Tabla 3.</b> Composición y denominación de las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera A. ....	36
<b>Tabla 4.</b> Propiedades y denominación de las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera A. ....	36
<b>Tabla 5.</b> Composición en porcentaje y denominación de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera A. ....	36
<b>Tabla 6.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 3 días de edad – Cementera A. ....	42
<b>Tabla 7.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 7 días de edad – Cementera A. ....	43
<b>Tabla 8.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 28 días de edad – Cementera A. ....	44
<b>Tabla 9.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 56 días de edad – Cementera A. ....	46
<b>Tabla 10.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 90 días de edad – Cementera A. ....	48
<b>Tabla 11.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 120 días de edad – Cementera A. ....	50
<b>Tabla 12.</b> Valores promedios de la resistividad eléctrica húmeda a diferentes edades – Cementera A. ....	51
<b>Tabla 13.</b> Valores promedios de la conductividad a diferentes edades – Cementera A. ...	54
<b>Tabla 14.</b> Valores promedios de la conductividad obtenidos a partir de la ecuación generada del ajuste potencial. ....	58
<b>Tabla 15.</b> Valores de la conductividad a los 3 y 120 días de análisis así como su correspondiente factor edad – Cementera A. ....	61
<b>Tabla 16.</b> Propiedades y denominación de las mezclas de concreto 1 y 7- Cementera A. ....	63
<b>Tabla 17.</b> Contenido de aire y factor edad de las mezclas de concreto - Cementera A. ..	64
<b>Tabla 18.</b> Criterios de evaluación de la resistividad (DURAR, 2000). ....	65
<b>Tabla 19.</b> Riesgo de corrosión de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera A, con base en los criterios de durabilidad establecidos por el manual de la Red DURAR (2000). ....	65
<b>Tabla 20.</b> Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 3 días de edad - Cementera A. ....	67
<b>Tabla 21.</b> Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 7 días de edad - Cementera A. ....	68
<b>Tabla 22.</b> Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 28 días de edad - Cementera A. ....	69
<b>Tabla 23.</b> Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 56 días de edad - Cementera A. ....	70



<b>Tabla 24.</b> Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 90 días de edad - Cementera A.....	71
<b>Tabla 25.</b> Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 120 días de edad - Cementera A.....	72
<b>Tabla 26.</b> Valores promedios de la prueba de resistencia mecánica en compresión simple a diferentes edades – Cementera A.....	73
<b>Tabla 27.</b> Criterios de evaluación en función de la resistencia mecánica (DURAR, 2000). .....	74
<b>Tabla 28.</b> Calidad de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera A, con base en los criterios de durabilidad establecidos por el manual de la Red DURAR (2000).....	74
<b>Tabla 29.</b> Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 3 días de edad – Cementera A.....	76
<b>Tabla 30.</b> Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 7 días de edad – Cementera A.....	77
<b>Tabla 31.</b> Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días de edad – Cementera A.....	78
<b>Tabla 32.</b> Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 56 días de edad – Cementera A.....	79
<b>Tabla 33.</b> Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 90 días de edad – Cementera A.....	80
<b>Tabla 34.</b> Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 120 días de edad – Cementera A.....	81
<b>Tabla 35.</b> Valores promedios de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a diferentes edades- Cementera A. ....	82
<b>Tabla 36.</b> Criterios para la velocidad de pulso ultrasónico (DURAR, 2000). ....	83
<b>Tabla 37.</b> Calidad de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera A, con base en los criterios de durabilidad establecidos por el manual de la Red DURAR (2000).....	83
<b>Tabla 38.</b> Nomenclatura de las muestras elaboradas por la Cementera B. ....	84
<b>Tabla 39.</b> Composición y denominación de las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera B. ....	85
<b>Tabla 40.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 3 días de edad – Cementera B.....	87
<b>Tabla 41.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 7 días de edad – Cementera B.....	88
<b>Tabla 42.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 14 días de edad – Cementera B.....	89
<b>Tabla 43.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 17 días de edad – Cementera B.....	90
<b>Tabla 44.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 29 días de edad – Cementera B.....	91
<b>Tabla 45.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 51 días de edad – Cementera B.....	92
<b>Tabla 46.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 56 días de edad – Cementera B.....	93
<b>Tabla 47.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 67 días de edad – Cementera B.....	94



<b>Tabla 48.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 71 días de edad – Cementera B.....	95
<b>Tabla 49.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 80 días de edad – Cementera B.....	96
<b>Tabla 50.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 91 días de edad – Cementera B.....	97
<b>Tabla 51.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 108 días de edad – Cementera B.....	98
<b>Tabla 52.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 120 días de edad – Cementera B.....	99
<b>Tabla 53.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 139 días de edad – Cementera B.....	100
<b>Tabla 54.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 153 días de edad – Cementera B.....	101
<b>Tabla 55.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 177 días de edad – Cementera B.....	102
<b>Tabla 56.</b> Valores promedios de la resistividad eléctrica húmeda a diferentes edades - Cementera B. ....	103
<b>Tabla 57.</b> Valores promedios de la conductividad a diferentes edades – Cementera B.	105
<b>Tabla 58.</b> Criterios de evaluación de la resistividad (DURAR, 2000). ....	110
<b>Tabla 59.</b> Riesgo de corrosión de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera B, con base en los criterios de durabilidad establecidos por el manual de la Red DURAR (2000). ....	110
<b>Tabla 60.</b> Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 3 días de edad – Cementera B.....	112
<b>Tabla 61.</b> Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 7 días de edad – Cementera B.....	113
<b>Tabla 62.</b> Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 28 días de edad – Cementera B.....	114
<b>Tabla 63.</b> Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 56 días de edad – Cementera B.....	115
<b>Tabla 64.</b> Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 90 días de edad – Cementera B.....	116
<b>Tabla 65.</b> Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 120 días de edad – Cementera B.....	117
<b>Tabla 66.</b> Valores promedios de la prueba de compresión simple a diferentes edades – Cementera B. ....	117
<b>Tabla 67.</b> Criterios de evaluación en función de la resistencia mecánica (DURAR, 2000). ....	119
<b>Tabla 68.</b> Calidad de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera B, con base en los criterios de durabilidad establecidos por el manual de la Red DURAR (2000).....	119
<b>Tabla 69.</b> Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 3 días de edad – Cementera B.....	121
<b>Tabla 70.</b> Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 7 días de edad – Cementera B.....	122
<b>Tabla 71.</b> Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días de edad – Cementera B.....	123



<b>Tabla 72.</b> Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 56 días de edad – Cementera B.....	124
<b>Tabla 73.</b> Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 90 días de edad – Cementera B.....	125
<b>Tabla 74.</b> Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 120 días de edad – Cementera B.....	126
<b>Tabla 75.</b> Valores promedios de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a diferentes edades – Cementera B.....	127
<b>Tabla 76.</b> Criterios para la velocidad de pulso ultrasónico (DURAR, 2000). ....	128
<b>Tabla 77.</b> Calidad de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera B, con base en los criterios de durabilidad establecidos por el manual de la Red DURAR (2000)....	128
<b>Tabla 78.</b> Valores de "q <sub>b</sub> " y "q <sub>a</sub> " - Cementera A. ....	133
<b>Tabla 79.</b> Valores de "q <sub>b</sub> " y "q <sub>a</sub> " - Cementera B. ....	137
<b>Tabla 80.</b> Porcentaje de resistividad eléctrica húmeda obtenido a los 28 días de curado – Cementera A y B. ....	138
<b>Tabla 81.</b> Valores de resistividad eléctrica húmeda obtenidos en laboratorio – Cementera A.....	139
<b>Tabla 82.</b> Valores de Resistividad Eléctrica Húmeda obtenidos a partir de una sola Línea de Tendencia Potencial “q”- Cementera A. ....	140
<b>Tabla 83.</b> Porcentaje de error entre los valores de laboratorio y los obtenidos a partir del factor q – Cementera A.....	140
<b>Tabla 84.</b> Valores de Resistividad Eléctrica Húmeda obtenidos a partir de dos Líneas de Tendencia Potencial “q <sub>b</sub> ” y “q <sub>a</sub> ” – Cementera A.....	141
<b>Tabla 85.</b> Porcentaje de error entre los valores de laboratorio y los obtenidos a partir de los factores “q <sub>b</sub> ” y “q <sub>a</sub> ” – Cementera A.....	141
<b>Tabla 86.</b> Reducción del error de aproximación – Cementera A.....	142
<b>Tabla 87.</b> Valores de Resistividad Eléctrica Húmeda obtenidos en laboratorio – Cementera B. ....	143
<b>Tabla 88.</b> Valores de Resistividad Eléctrica Húmeda obtenidos en laboratorio – Cementera B. ....	143
<b>Tabla 89.</b> Valores de Resistividad Eléctrica Húmeda obtenidos a partir de una sola Línea de Tendencia Potencial “q” – Cementera B. ....	144
<b>Tabla 90.</b> Valores de Resistividad Eléctrica Húmeda obtenidos a partir de una sola Línea de Tendencia Potencial “q” – Cementera B. ....	144
<b>Tabla 91.</b> Porcentaje de error entre los valores de laboratorio y los obtenidos a partir del factor q – Cementera B.....	145
<b>Tabla 92.</b> Porcentaje de error entre los valores de laboratorio y los obtenidos a partir del factor q – Cementera B.....	145
<b>Tabla 93.</b> Valores de Resistividad Eléctrica Húmeda obtenidos a partir de dos Líneas de Tendencia Potencial “q <sub>b</sub> ” y “q <sub>a</sub> ” – Cementera B.....	146
<b>Tabla 94.</b> Valores de Resistividad Eléctrica Húmeda obtenidos a partir de dos Líneas de Tendencia Potencial “q <sub>b</sub> ” y “q <sub>a</sub> ” – Cementera B.....	146
<b>Tabla 95.</b> Porcentaje de error entre los valores de laboratorio y los obtenidos a partir de los factores “q <sub>b</sub> ” y “q <sub>a</sub> ” – Cementera B.....	147
<b>Tabla 96.</b> Porcentaje de error entre los valores de laboratorio y los obtenidos a partir de los factores “q <sub>b</sub> ” y “q <sub>a</sub> ” – Cementera B.....	147
<b>Tabla 97.</b> Reducción del error de aproximación – Cementera B.....	148



<b>Tabla 98.</b> Valores simplificados del factor de Retardo (PNE 83994-2, 2016).....	149
<b>Tabla 99.</b> Valores del factor de exposición ambiental $F_{cl}$ en función de la clase de ambiente (PNE 83994-2, 2016). .....	149
<b>Tabla 100.</b> Posibles combinaciones de $F_{exp}$ y $r_{cl}$ . .....	151
<b>Tabla 101.</b> Cálculo del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo para las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera A.....	154
<b>Tabla 102.</b> Cálculo del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo para las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera B.....	154
<b>Tabla 103.</b> Valores de $q_b$ , $q_a$ y $R_{28días}$ de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera A y B. ....	164
<b>Tabla 104.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 3 días – M-159. ....	167
<b>Tabla 105.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 7 días – M-159. ....	168
<b>Tabla 106.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 28 días – M-159. ....	168
<b>Tabla 107.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 56 días – M-159. ....	169
<b>Tabla 108.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 90 días – M-159. ....	169
<b>Tabla 109.</b> Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 120 días – M-159. ....	170
<b>Tabla 110.</b> Valores promedios de la resistividad eléctrica húmeda a diferentes edades – M-159. ....	171
<b>Tabla 111.</b> Valor del espesor de recubrimiento “x” calculado con la fórmula de la Doctora Andrade - M-159.....	174
<b>Tabla 112.</b> Valor del espesor de recubrimiento “x” calculado con la fórmula Empírica obtenida – M-159.....	174
<b>Tabla 113.</b> Error promedio en el cálculo del espesor de recubrimiento – Cementeras A y B.....	175
<b>Tabla 114.</b> Error promedio en el cálculo del espesor de recubrimiento a los 17 días de curado – Cementera B.....	176
<b>Tabla 115.</b> Predicción de la vida útil (periodo de iniciación) con 17 días de análisis, proponiendo un espesor de 6 cm para todas las mezclas de concreto – Cementera B..	177
<b>Tabla 116.</b> Vida útil (periodo de iniciación) de una mezcla de concreto en años en función del espesor de recubrimiento “x” y del Factor Edad “ $q_b$ ”.....	179
<b>Tabla 117.</b> Vida útil (periodo de iniciación) de una mezcla de concreto en años en función del espesor de recubrimiento “x” y del Factor Edad “ $q_b$ ”.....	180
<b>Tabla 118.</b> Vida útil (periodo de iniciación) de una mezcla de concreto en años en función del espesor de recubrimiento “x” y del Factor Edad “ $q_b$ ”.....	182
<b>Tabla 119.</b> Vida útil (periodo de iniciación) de una mezcla de concreto en años en función del espesor de recubrimiento “x” y del Factor Edad “ $q_b$ ”.....	183
<b>Tabla 120.</b> Relación entre el valor del Factor Edad “ $q_b$ ” y la composición de las mezclas de concreto.....	186
<b>Tabla 121.</b> Valores simplificados del factor de retardo (PNE 83994-2, 2016). ....	190



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.

---

<b>Ilustración 1.</b> Resistómetro marca Nilsson modelo 400. ....	5
<b>Ilustración 2.</b> Método de las cuatro puntas (Picos, 2014). ....	8
<b>Ilustración 3.</b> Resistímetro tipo Wenner (Picos, 2014). ....	8
<b>Ilustración 4.</b> Modelo de durabilidad (Torres & Martínez, 2001). ....	19
<b>Ilustración 5.</b> Cilindros de concreto elaborados por la Cementera A. ....	35
<b>Ilustración 6.</b> Resistómetro marca Nilsson modelo 400. ....	40
<b>Ilustración 7.</b> Evidencia fotográfica de la prueba de resistividad eléctrica húmeda. ....	41
<b>Ilustración 8.</b> Evidencia fotográfica de la prueba de resistividad eléctrica húmeda. ....	41
<b>Ilustración 9.</b> Evidencia fotográfica de la prueba de resistencia a la compresión axial. ..	66
<b>Ilustración 10.</b> Evidencia fotográfica de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico. ....	75
<b>Ilustración 11.</b> Cilindro de concreto elaborado por la Cementera B. ....	84
<b>Ilustración 12.</b> Resistómetro marca Nilsson modelo 400. ....	86
<b>Ilustración 13.</b> Evidencia fotográfica de la prueba de resistencia a la compresión axial. .....	111
<b>Ilustración 14.</b> Evidencia fotográfica de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico. ..	120



## ÍNDICE DE GRÁFICAS.

---

<b>Gráfica 1.</b> Valores de conductividad en los tiempos $t_o$ y $t_n$ (escala logarítmica). .....	33
<b>Gráfica 2.</b> Valores de conductividad en los tiempos $t_o$ , $t_n$ y factor edad “q” (escala logarítmica). .....	34
<b>Gráfica 3.</b> Composición y denominación de las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera A. ....	37
<b>Gráfica 4.</b> Relación agua - cemento de las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera A. ....	38
<b>Gráfica 5.</b> Valores promedios de la resistividad eléctrica húmeda a diferentes edades – Cementera A. ....	52
<b>Gráfica 6.</b> Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 1 (M-151). .....	54
<b>Gráfica 7.</b> Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 2 (M-155). .....	55
<b>Gráfica 8.</b> Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 3 (M-156). .....	55
<b>Gráfica 9.</b> Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 4 (M-153). .....	56
<b>Gráfica 10.</b> Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 5 (M-153-B). .....	56
<b>Gráfica 11.</b> Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 6 (M-158). .....	57
<b>Gráfica 12.</b> Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 7 (M-157). .....	57
<b>Gráfica 13.</b> Tendencia lineal de la conductividad (escala logarítmica) – Cementera A. ...	58
<b>Gráfica 14.</b> Tendencia lineal de la conductividad (escala logarítmica) mezclas 2, 5 y 6 – Cementera A. ....	59
<b>Gráfica 15.</b> Tendencia lineal de la conductividad (escala logarítmica) mezclas 1 y 5 – Cementera A. ....	60
<b>Gráfica 16.</b> Valores del factor edad “q” – Cementera A. ....	61
<b>Gráfica 17.</b> Composición y denominación de las mezclas de concreto 1 y 7 – Cementera A. ....	62
<b>Gráfica 18.</b> Tendencia lineal de la conductividad (escala logarítmica) mezclas 1 y 7 – Cementera A. ....	63
<b>Gráfica 19.</b> Relación entre el factor edad y el contenido de aire (%) – Cementera A. ....	64
<b>Gráfica 20.</b> Valores promedios de la prueba mecánica de compresión simple a diferentes edades – Cementera A. ....	73
<b>Gráfica 21.</b> Valores promedios de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico a diferentes edades – Cementera A. ....	82
<b>Gráfica 22.</b> Valores promedios de la resistividad eléctrica húmeda a diferentes edades – Cementera B. ....	104
<b>Gráfica 23.</b> Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 1 (SACYR 1). ....	106
<b>Gráfica 24.</b> Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 2 (SACYR 2). ....	106
<b>Gráfica 25.</b> Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 3 (SACYR 3). ....	107
<b>Gráfica 26.</b> Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 4 (SACYR 4). ....	107
<b>Gráfica 27.</b> Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 5 (SACYR 5). ....	108
<b>Gráfica 28.</b> Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 6 (SACYR 6). ....	108
<b>Gráfica 29.</b> Valores promedios de la prueba mecánica de compresión simple a diferentes edades – Cementera B. ....	118



<b>Gráfica 30.</b> Valores promedios de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico a diferentes edades – Cementera B. ....	127
<b>Gráfica 31.</b> Factor edad $q_b$ y $q_a$ de la mezcla de concreto 1 (M-151).....	130
<b>Gráfica 32.</b> Factor edad $q_b$ y $q_a$ de la mezcla de concreto 2 (M-155). ....	130
<b>Gráfica 33.</b> Factor edad $q_b$ y $q_a$ de la mezcla de concreto 3 (M-156).....	131
<b>Gráfica 34.</b> Factor edad $q_b$ y $q_a$ de la mezcla de concreto 4 (M-153). ....	131
<b>Gráfica 35.</b> Factor edad $q_b$ y $q_a$ de la mezcla de concreto 5 (M-153 B).....	132
<b>Gráfica 36.</b> Factor edad $q_b$ y $q_a$ de la mezcla de concreto 6 (M-158).....	132
<b>Gráfica 37.</b> Factor edad $q_b$ y $q_a$ de la mezcla de concreto 7 (M-157).....	133
<b>Gráfica 38.</b> Factor edad $q_b$ y $q_a$ de la mezcla de concreto 1 (SACYR 1). ....	134
<b>Gráfica 39.</b> Factor edad $q_b$ y $q_a$ de la mezcla de concreto 2 (SACYR 2). ....	134
<b>Gráfica 40.</b> Factor edad $q_b$ y $q_a$ de la mezcla de concreto 3 (SACYR 3).....	135
<b>Gráfica 41.</b> Factor edad $q_b$ y $q_a$ de la mezcla de concreto 4 (SACYR 4).....	135
<b>Gráfica 42.</b> Factor edad $q_b$ y $q_a$ de la mezcla de concreto 5 (SACYR 5).....	136
<b>Gráfica 43.</b> Factor edad $q_b$ y $q_a$ de la mezcla de concreto 6 (SACYR 6).....	136
<b>Gráfica 44.</b> Superficie del Factor E – Vista A.....	152
<b>Gráfica 45.</b> Superficie del Factor E – Vista B.....	152
<b>Gráfica 46.</b> Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla M-151.....	155
<b>Gráfica 47.</b> Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla M-155.....	156
<b>Gráfica 48.</b> Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla M-156.....	156
<b>Gráfica 49.</b> Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla M-153.....	157
<b>Gráfica 50.</b> Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla M-153 B. ....	157
<b>Gráfica 51.</b> Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla M-158.....	158
<b>Gráfica 52.</b> Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla M-157.....	158
<b>Gráfica 53.</b> Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla SACYR 1. ....	159
<b>Gráfica 54.</b> Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla SACYR 2. ....	159
<b>Gráfica 55.</b> Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla SACYR 3. ....	160
<b>Gráfica 56.</b> Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla SACYR 4. ....	160
<b>Gráfica 57.</b> Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla SACYR 5. ....	161
<b>Gráfica 58.</b> Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla SACYR 6. ....	161
<b>Gráfica 59.</b> Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de las 13 mezclas de concreto elaboradas.....	162
<b>Gráfica 60.</b> Relación entre los valores de $q_a/q_b$ y el factor edad “ $q_b$ ”.....	165
<b>Gráfica 61.</b> Relación entre los valores de conductividad a los 28 días de curado y el factor edad “ $q_b$ ”.....	165
<b>Gráfica 62.</b> Valores promedios de la resistividad eléctrica húmeda a diferentes edades – M-159. ....	170
<b>Gráfica 63.</b> Factores edad $q_b$ y $q_a$ de la mezcla de concreto 8 (M-159) elaborada por la cementera A. ....	173
<b>Gráfica 64.</b> Ábaco de diseño “1A”, el cual relaciona el espesor de recubrimiento “x” y el valor del factor edad “ $q_b$ ” para diferentes casos. ....	185
<b>Gráfica 65.</b> Ábaco de diseño “1B”, el cual relaciona el espesor de recubrimiento “x” y el valor del factor edad “ $q_b$ ” para diferentes casos. ....	185
<b>Gráfica 66.</b> Relación entre el valor del factor edad “ $q_b$ ” y la composición de la mezcla de concreto.....	187



- Gráfica 67.** Coeficientes A, B, C y D en función de la cantidad y tipo de componentes. 188
- Gráfica 68.** Ábaco de diseño “1B”, el cual relaciona el espesor de recubrimiento “x” y el valor del factor edad “qb” para diferentes casos. .... 191
- Gráfica 69.** Valores de resistividad efectiva en los tiempos  $t_0$  y  $t_n$  (escala logarítmica). . 199



## **OBJETIVOS.**

---

El principal objetivo de este trabajo de investigación es, determinar mediante la resistividad eléctrica húmeda la vida útil (periodo de iniciación –  $T_i$ ) de las mezclas de concreto elaboradas por las cementeras A y B, es decir, calcular el tiempo que tardaría el frente de iones cloruro en atravesar el recubrimiento que protege al acero de refuerzo hasta alcanzar la armadura y provocar su despasivación.

Esta metodología está en función del espesor de recubrimiento, de la agresividad del ambiente que rodea a la estructura y de las propiedades que presenta el concreto. Para nuestro caso de estudio se busca garantizar una vida útil de por lo menos 100 años.

Verificar el desempeño (en términos de durabilidad) de las mezclas de concreto elaboradas por las cementeras A y B mediante tres pruebas: resistividad eléctrica húmeda, velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión.

Con base en los resultados de las pruebas de resistividad eléctrica húmeda elaborar un ábaco o monograma para la determinación de la vida útil (periodo de iniciación -  $T_i$ ) de las mezclas de concreto elaboradas por las cementeras A y B, tomando en cuenta que el agente despasivante es el ion cloruro.

Relacionar las cantidades de cada uno de los componentes de las mezclas de concreto con el ábaco de diseño, con la finalidad de optimizar costos en la obra.

## **PROBLEMÁTICA.**

---

Es evidente que el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) ha alcanzado su saturación y ello ha generado un decremento en la competitividad de la región central del país, con el fin de resolver esta problemática en el 2001 el gobierno federal a través del secretario de Comunicaciones y Transportes anuncio la selección del área federal del ex-Lago de Texcoco (un terreno ubicado en el oriente del Valle de México) como sitio de construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM).

Nuestro problema de investigación surge debido a que esta zona (ex-Lago de Texcoco) presenta elevadas concentraciones de sales (del orden de tres veces la del agua de mar), dichas condiciones hacen de esta zona especialmente hostil para la construcción de estructuras de concreto reforzado.



## INTRODUCCIÓN.

---

El área federal del ex-Lago de Texcoco es la más adecuada para albergar el Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM), por la facilidad de conectividad entre líneas aéreas en el procesamiento de los vuelos y por la disponibilidad de terreno federal en esa zona.

En diversos estudios de las condiciones del suelo, se ha encontrado que el terreno y el agua en el mismo contienen altas concentraciones de sulfatos y cloruros, mismos que, con efectos y fenómenos diferentes, promueven el deterioro acelerado de la pasta de cemento y del acero de refuerzo embebido respectivamente (*Aguilar, 2015*).

La corrosión es uno de los fenómenos de destrucción más agresivos y de mayor velocidad, manifestándose en el concreto en manchas, fracturas y desprendimientos de la estructura y en el acero, en la pérdida de adherencia y de sección.

La corrosión es generada por la pérdida acelerada de electrones en el metal, la corrosión inicia cuando el acero sufre la despasivación o activación química que puede ser provocada por diversos factores, entre ellos, corrientes eléctricas cercanas o en este caso, por el ingreso de cloruros al concreto en una cantidad superior al soporte natural del acero embebido de 0.7 kgCl/m<sup>3</sup> de concreto (*Bentur, 1997*).

La manifestación de estos fenómenos y la destrucción de la estructura pueden demorar entre 5 y 7 años, independientemente del tiempo que tome la activación química del acero, sin embargo, la vida útil se considera terminada una vez que el proceso de intercambio de electrones ha iniciado.

Dadas las características del proyecto y a las condiciones de exposición y servicio se requiere el diseño de un concreto que proporcione una mayor protección ante la alta concentración de cloruros y sulfatos a la que se encontrará expuesto. Lo anterior debido a que bajo estas condiciones existe la posibilidad de una corrosión acelerada del acero de refuerzo, cambios volumétricos derivados del ataque de sulfatos y en general, un deterioro de la estructura.

En este trabajo de investigación se propuso calcular la vida útil (Periodo de iniciación –  $T_i$ ) de una estructura de concreto reforzado a partir de la resistividad eléctrica húmeda, la cual está directamente relacionada con la porosidad del concreto. Esta metodología está en función del espesor de recubrimiento, de la agresividad del ambiente que rodea a la estructura y de las propiedades que presenta el concreto. Para nuestro caso de estudio se busca garantizar una vida útil de por lo menos 100 años.

No existe un elemento único para lograr la vida útil requerida de 100 años. Cada uno de los componentes del concreto debe cumplir con un desempeño adecuado y al mismo tiempo, al ser combinados en las proporciones adecuadas, deben interactuar de manera correcta para lograr que todas las propiedades necesarias puedan ser alcanzadas tanto en estado fresco como en estado endurecido a lo largo del tiempo.



Sin embargo, estas no son las únicas patologías que pueden favorecer el deterioro del concreto. Así como los ataques químicos, es necesario que el concreto sea cuidadosamente vigilado en los aspectos de fisuración, espesor del recubrimiento del acero, control de temperatura, condiciones de curado y cualquier otro fenómeno que pueda favorecer la aceleración en la velocidad de ingreso de las sustancias nocivas para el concreto armado.

La permeabilidad es posiblemente el factor fundamental para poder incrementar la vida útil de una estructura en condiciones agresivas, controlada por el espacio poroso disponible y su grado de comunicación, en el que tiene una particular influencia la presencia de microfisuras. Una baja permeabilidad garantiza que el ingreso de sustancias nocivas, sobretodo en el caso de corrosión, demoren más tiempo en llegar y acumularse en cantidades suficientes para iniciar el proceso de deterioro.

La realización de proyectos de investigación acerca de la afectación del fenómeno de la corrosión en los elementos de concreto reforzado, toma una alta importancia debido a la gran cantidad de dinero que se invierte en reparar, reconstruir o sustituir estructuras dañadas por corrosión. Por ejemplo, en el Reino Unido se tienen pérdidas por más de 620 millones de libras esterlinas por problemas de corrosión.

En México no hay datos precisos que reflejen la enorme cantidad de dinero que se invierte para reparar estructuras dañadas por corrosión. Sin embargo, el desarrollo de tecnologías para la prevención y reparación de estructuras va en aumento, debido a las consecuencias en la integridad estructural de las estructuras y su efecto social (*Lee et al., 2006*).

Los daños por durabilidad han afectado las estructuras de concreto en su desempeño estructural y, en ocasiones, también tienen repercusiones económicas que son puntos clave para determinar la rentabilidad de un proyecto.

Diseñar por durabilidad una estructura de concreto y no solo por resistencia, puede conducir a la industria de la construcción a tener un mejor desempeño y optimización de los materiales, logrando con esto construir estructuras con una mayor vida útil y menores costos de mantenimiento, con la finalidad de que la construcción participe en mayor medida en el desarrollo sustentable de nuestro país.

El concreto elaborado con cemento Portland es un material con una historia relativamente reciente. Debido a su consistencia rígida, anteriormente se creía que tenía una larga vida útil; sin embargo, la experiencia ha demostrado que no siempre es así. Los ejemplos en la construcción de estructuras de concreto con problemas, ante sus condiciones de servicio son abundantes y de diferente naturaleza.

Éstos se han tenido que explicar, enfrentar y resolver desde diferentes trincheras como investigaciones serias, teorías, fórmulas, sistemas constructivos, pruebas de laboratorio y campo, todo ello con el objetivo de diagnosticar problemas de durabilidad y conocer los factores que en ella intervienen.



A nivel mundial, el concreto es el material más utilizado en la construcción, y a menos que haya una revolución en los materiales de construcción, seguirá siéndolo; gran parte de la infraestructura de los países está elaborada con él, por lo que su conocimiento y tecnología son básicos para el ingeniero civil encargado de alguna etapa del proceso constructivo (*Hernández & Mendoza, 2006*).

Este es un tema con implicaciones socioeconómicas. El Reino Unido, por ejemplo, un país desarrollado, destina 40% de la inversión en construcción a la reparación y al mantenimiento, 4% de su Producto Interno Bruto (*Neville, 2001*).

En los últimos veinte años el término “durabilidad” se ha estado escuchando con más frecuencia en la rama de la ingeniería civil. Países industrializados como los EEUU y algunos en Europa (España, Francia, Gran Bretaña, etc.), al igual que Japón, han tomado a la durabilidad como un tema de gran importancia, invirtiendo sumas millonarias en estudios de investigación específicos.

Hace poco tiempo, aproximadamente una década, estos países han estado intentando incluir en sus códigos de diseño recomendaciones básicas para obtener un mejor uso de los materiales y así poder fabricar estructuras más durables (*ACI-201, 1991*) & (*RILEM, 1996*). El principio fundamental de estas recomendaciones ha sido proporcionar las bases para el diseño por durabilidad de estructuras bajo condiciones ambientales diversas. Aunque innovadoras en su época, estas recomendaciones no contemplan la determinación directa de la durabilidad, sino proporcionan las reglas de ‘que se debe y no hacerse’ para obtener estructuras durables a diversos agentes externos.

En Latinoamérica un esfuerzo similar se realizó en el año 1997 al presentarse el reporte de la Red Temática DURAR (*DURAR, 2000*), en el cual se presentaron algunos conceptos básicos sobre evaluación, mantenimiento, reparación y/o rehabilitación de obras de concreto armado dañadas principalmente por corrosión de la armadura (barras de refuerzo).

No es hasta el año 1996 cuando en el reporte técnico 130-CSL de la RILEM (*RILEM, 1996*), “*Durability Design of Concrete Structures*,” se propuso una metodología más completa sobre el tema de diseño por durabilidad. Este reporte (único en su género), se enfocó principalmente en asociar, por un lado, el diseño estructural por carga última y revisar las dimensiones diseñadas por durabilidad. Este reporte estipula que: “Las estructuras deben de ser diseñadas de tal manera que su nivel mínimo de confiabilidad se asegure durante la vida útil propuesta, a pesar de degradaciones y envejecimiento de los materiales”.

Es de primordial importancia cambiar la mentalidad del ingeniero (en particular del ingeniero civil) con relación al diseño de una estructura, o elemento estructural: es necesario el diseño por cargas y por durabilidad conjuntamente para generar estructuras con una relación de costo/beneficio rentable (*Torres & Martínez, 2001*).

En México, se tienen áreas con medios agresivos al concreto, por lo que debido a la escasez de espacio o situaciones específicas es necesario construir importantes estructuras de infraestructura en esas áreas, razón por lo que es indispensable conocer y dominar el tema (*Hernández & Mendoza, 2006*).



## CAPITULO I. MARCO TEÓRICO.

### 1.1. Resistividad eléctrica.

---

La resistividad es una propiedad volumétrica del material e indica su resistencia al paso de las cargas eléctricas (Ley de Ohm) (ALCONPAT, 2011):

$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{l}{A} \quad (1)$$

Donde:

$R$  = Resistencia eléctrica.

$V$  = Voltaje.

$I$  = Paso de corriente.

$\rho$  = Resistividad.

$l$  = Distancia entre electrodos.

$A$  = Área transversal del paso de la corriente.

Cuanto mayor es la resistividad menor es la porosidad del concreto y mayor su resistencia mecánica, al tener más fase sólida por volumen. Además si el concreto no está saturado de agua la resistividad crece, por lo que es un indicador de su grado de saturación. Por tanto, la resistividad es un indicador de la calidad del concreto al indicar su porosidad, y es un indicador de su grado de saturación y por tanto puede servir para el control del grado de curado (ALCONPAT, 2011).

### 1.2. Medida de la resistividad.

---

Puede realizarse colocando unos electrodos en las caras paralelas de las probetas cilíndricas o usando el “método de las 4 puntas”. Para la medida rápida de la resistividad en el concreto e in situ se ha desarrollado entre el IETcc y Geocisa un resistómetro portátil.

De acuerdo al párrafo anterior, existen dos métodos para medir la resistividad en especímenes de concreto (ALCONPAT, 2011):

- a) Método Directo.
  - b) Método de las cuatro puntas o de Wenner.
-



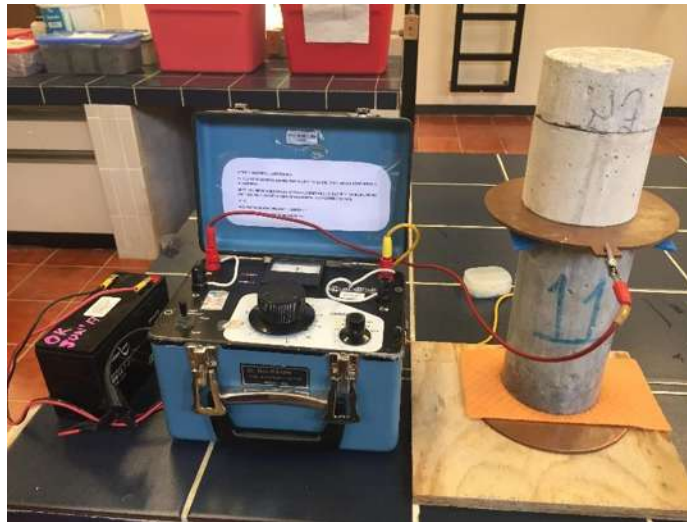
### 1.2.1. Método directo.

---

Este método consiste en aplicar un campo eléctrico uniforme mediante dos electrodos en contacto con las bases de la probeta.

Las probetas a ensayar no podrán contener ninguna armadura en su interior. Pueden ser probetas de concreto endurecido o probetas testigo de concreto extraídas. Pueden ser cilíndricas o prismáticas y sus bases deben ser perfectamente paralelas y planas. Para la realización del ensayo las probetas deben estar saturadas de agua.

Se emplea un resistómetro que es el aparato que inducirá una intensidad de corriente sobre la probeta aportando también una medición de la intensidad y el potencial. Se hará circular una corriente alterna de 30mA para probetas cúbicas y 50mA para probetas cilíndricas con una frecuencia inferior a 500Hz.



*Ilustración 1. Resistómetro marca Nilsson modelo 400.*

Los electrodos a utilizar serán dos mallas de acero tupidas o placas de acero, cobre o cualquier otro metal conductor, dichas placas deberán tener las dimensiones de las bases de la probeta.

Se utilizarán también dos esponjas finas de dimensión igual que la de los electrodos, las cuales se colocarán entre las placas o mallas y las bases de la probeta. Éstas deberán estar húmedas para llevar a cabo el ensayo.



Para el cálculo de la resistividad del concreto se deberán seguir una secuencia ordenada de pasos:

a) Cálculo de la resistencia eléctrica del concreto:

Partimos de la Ley de Ohm:

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

Donde:

$R_e$  = Resistencia eléctrica.

$V$  = Voltaje.

$I$  = Paso de corriente.

Se obtiene la resistencia eléctrica del concreto por medio de esta fórmula:

$$R_e = R_{e+sp} - R_{sp} \quad (3)$$

Donde:

$R_e$  = Resistencia eléctrica del concreto.

$R_{e+sp}$  = Resistencia eléctrica del concreto más la resistencia eléctrica de las esponjas.

$R_{sp}$  = Resistencia eléctrica de las esponjas.

b) Cálculo de la constante de celda o del factor geométrico:

La constante de celda o factor geométrico se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$k = \frac{A}{l} \quad (4)$$



Donde:

$k$  = Constante de celda o factor geométrico.

$l$  = Distancia entre electrodos o altura de la probeta, en m.

$A$  = Área transversal del paso de la corriente, en  $m^2$ .

c) Cálculo de la resistividad eléctrica.

Una vez obtenidos los parámetros anteriores la resistividad eléctrica se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\rho_{ef} = k * R_e \quad (5)$$

Donde:

$\rho_{ef}$  = Resistividad eléctrica efectiva, en  $\Omega$ -m.

$k$  = Constante de celda o factor geométrico, en m.

$R_e$  = Resistencia eléctrica del concreto, en  $\Omega$ .

Se realizaran como mínimo dos mediciones con el resistómetro en cada una de las probetas o especímenes de concreto, de las cuales se obtendrá un valor promedio.

$$\rho_{ef} = \frac{\rho_{ef1} + \rho_{ef2} + \dots + \rho_{efn}}{n} \quad (6)$$

Donde:

$\rho_{ef}$  = Resistividad eléctrica efectiva promedio, en  $\Omega$ -m.

$\rho_{ef1}$  = Resistividad eléctrica efectiva obtenida de la primera medición, en  $\Omega$ -m.

$\rho_{ef2}$  = Resistividad eléctrica efectiva obtenida de la segunda medición, en  $\Omega$ -m.

$\rho_{efn}$  = Resistividad eléctrica efectiva obtenida de la “n” medición, en  $\Omega$ -m.

$n$  = Número de mediciones realizadas con el resistómetro.



### 1.2.2. Método de las cuatro puntas o de Wenner.

---

El método consiste en la aplicación de una corriente entre dos electrodos situados en la generatriz de la probeta, y medir el voltaje en otros dos electrodos situados entre los anteriores y alineados con ellos. Nos proporciona la resistencia eléctrica del concreto conociendo la distancia entre los electrodos y las dimensiones de la muestra.



**Ilustración 2.** Método de las cuatro puntas (Picos, 2014).

Los especímenes o probetas de concreto deberán ser cilíndricos con una altura mínima de 20 centímetros, no podrán contener ninguna armadura en su interior y deberán encontrarse en estado saturado.

Para la medición se utilizará un medidor de resistencia eléctrica (Resistivímetro) de cuatro puntas o tipo Wenner. Éste inducirá a la probeta una corriente alterna de hasta 40mA con una frecuencia inferior a 500Hz.

Los electrodos serán cuatro puntas de cobre u otro conductor de metal de diámetro entre 4 y 6 mm acoplados en un soporte rígido con una separación de 5 cm. Cada electrodo contará con una esponja individual humedecida previamente.



**Ilustración 3.** Resistivímetro tipo Wenner (Picos, 2014).



Para el cálculo de la resistividad se deberán seguir una secuencia ordenada de pasos:

a) Cálculo de la resistencia eléctrica del concreto:

Partimos de la Ley de Ohm:

$$R_e = \frac{V}{I} \quad (7)$$

Donde:

$R$  = Resistencia eléctrica.

$V$  = Voltaje.

$I$  = Paso de corriente.

b) Cálculo de la constante de celda:

La constante de celda se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$k = \frac{2\pi a}{X} \quad (8)$$

Donde:

$k$  = Constante de celda.

$X$  = Constante de forma. Se considera un valor de 1.65 en el caso de muestras cilíndricas de diámetro 15 cm y altura 30 cm. Para otras dimensiones (altura y diámetro) se deberá calcular la constante de forma según la norma.

$a$  = Distancia entre electrodos (5 cm o 0.05 m).



c) Cálculo de la resistividad eléctrica.

Una vez obtenidos los parámetros anteriores ( $k$  y  $R$ ) la resistividad eléctrica se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\rho_{ef} = k * R_e \quad (9)$$

Donde:

$\rho_{ef}$  = Resistividad eléctrica efectiva, en  $\Omega$ -m.

$k$  = Constante de celda, en m.

$R_e$  = Resistencia eléctrica del concreto, en  $\Omega$ .

Se realizaran como mínimo dos mediciones con el Resistivímetro tipo Wenner en cada una de las probetas o especímenes de concreto, de las cuales se obtendrá un valor promedio.

$$\rho_{ef} = \frac{\rho_{ef1} + \rho_{ef2} + \dots + \rho_{efn}}{n} \quad (10)$$

Donde:

$\rho_{ef}$  = Resistividad eléctrica efectiva promedio, en  $\Omega$ -m.

$\rho_{ef1}$  = Resistividad eléctrica efectiva obtenida de la primera medición, en  $\Omega$ -m.

$\rho_{ef2}$  = Resistividad eléctrica efectiva obtenida de la segunda medición, en  $\Omega$ -m.

$\rho_{efn}$  = Resistividad eléctrica efectiva obtenida de la “n” medición, en  $\Omega$ -m.

$n$  = Número de mediciones realizadas con el Resistivímetro tipo Wenner.



### **1.3. Factores que influyen en la medida de la resistividad eléctrica del concreto.**

---

Existen diferentes factores que alteran la medida de resistividad en el concreto, desde factores ligados con las propiedades de la mezcla hasta factores externos como la humedad y la temperatura (*Picos, 2014*).

Estos factores se pueden clasificar de la siguiente manera:

- a) Factores ligados a las propiedades de la mezcla: Tipo de cemento, Tipo de agregados, relación a/c, porosidad.
- b) Adiciones en el concreto: Metacaolín, microsilica, ceniza volante, humo de sílice.
- c) Factores ligados al ambiente (condiciones e in situ): Humedad superficial y Temperatura.
- d) Factores estructurales: que dependen de las características geométricas de la estructura.
- e) Estado de la estructura: delaminaciones, fisuras, carbonatación.

#### **1.3.1. Factores ligados a las propiedades de la mezcla.**

---

##### *1.3.1.1. Tipo de cemento.*

La resistividad eléctrica varía en función de la química del cemento, es decir, los valores de resistividad eléctrica estarán condicionados por el contenido de álcali o el contenido de aluminatos en el cemento.

Hammond y otros autores estudiaron el efecto de tres tipos de cemento, de diferentes contenidos de aluminatos (cemento Portland, cemento de resistividad inicial alta y cemento aluminoso), sobre la resistividad eléctrica de un concreto a 28 días, la resistividad varía un 20% entre un concreto fabricado con un cemento Portland tradicional y un cemento de alto contenido en aluminatos (*Hammond et al., 1955*).

Otro factor que condiciona la medida de la resistividad eléctrica es el contenido de cemento en la mezcla.

Hughes y otros autores estudiaron la influencia sobre la resistividad eléctrica del contenido de cemento (contenido de 300, 350 y 400 kg/m<sup>3</sup>). Para una relación a/c = 0.50, se observa una disminución lineal de la resistividad en un 20% con el aumento de la proporción de cemento de 300 a 400 kg/m<sup>3</sup>. Con una relación a/c = 0.55, esta disminución es del 25% (*Hughes et al., 1985*).



### 1.3.1.2. Tipo de agregados.

La resistividad eléctrica varía en función de la densidad del agregado, entre mayor sea la densidad del agregado mayor será su resistencia ( $R_e$ ), por ejemplo el mármol o el granito son mucho más resistentes que la arenisca o la calcárea (Monfore, 1968).

En realidad la influencia del tipo de agregado en la medida de la resistividad es baja pero notable, cuanto mayor sea el contraste de resistividad eléctrica entre el agregado y el cemento, más disminuye la variabilidad de la medida (Morris et al., 1996).

Woelfl menciona que, entre mayor sea el contenido de agregado en la mezcla de concreto mayor será la resistividad eléctrica aparente (Woelfl et al., 1980).

### 1.3.1.3. Relación agua – cemento.

La relación agua-cemento es uno de los factores más importantes que condiciona el valor de la resistividad eléctrica. La resistividad eléctrica aumenta conforme la relación agua – cemento disminuye: una pasta de cemento con relación a/c de 0.40 tiene una resistividad eléctrica dos veces mayor que una con una relación a/c de 0.60 (Monfore, 1968).

Relaciones agua – cemento altas producen valores de resistividad bajos, esto se debe a que una mezcla de concreto o pasta de cemento con una relación agua-cemento alta produce un concreto muy poroso, y por ende a mayor porosidad menor será la resistividad (Quidel Cortés, 2008). Una mezcla con menor relación a/c presenta una matriz menos permeable (una matriz más densa) al paso de electrones (ion cloruro) y por tanto mayor resistividad eléctrica (González Sersen, 2011).

### 1.3.1.4. La porosidad.

En un material sólido existen dos tipos de porosidad:

- a) Porosidad total.
- b) Porosidad efectiva.

La porosidad total se define como:

$$\mu_t = \frac{V_H}{V_m} \quad (11)$$



Donde:

$\mu_t$  = Porosidad total.

$V_H$  = Volumen de huecos o vacíos.

$V_m$  = Volumen de la muestra.

La porosidad efectiva se define como:

$$\mu_t = \frac{V_H}{V_m} \quad (12)$$

Donde:

$\mu_t$  = Porosidad efectiva.

$V_H$  = Volumen de huecos o vacíos intercomunicados.

$V_m$  = Volumen de la muestra.

La conductividad (inversa de la resistividad) de la corriente eléctrica en el concreto depende de la porosidad efectiva y de sus características (cantidad, tamaño, conectividad, tortuosidad). Después de muchos estudios, para un concreto saturado, cuanto mayor es la porosidad efectiva, menor es la resistividad eléctrica (*Lataste, 1998*).

Los poros que se encuentran interconectados (porosidad efectiva) son la ruta de entrada de los agentes agresivos (ion cloruro), cuando estos se encuentran totalmente saturados el ingreso o avance del ion cloruro es mucho más rápido que cuando se encuentran parcialmente saturados.

#### 1.3.1.5. *El grado de saturación.*

Cuanto mayor sea el grado de saturación del concreto menor será la resistividad eléctrica de éste, puesto que cuando los poros están totalmente saturados de agua la disponibilidad de oxígeno en los poros es mínima impidiendo así la buena circulación de los iones. Por ello, la resistividad eléctrica alcanzará su máximo cuando los poros estén semi-saturados (*Picos, 2014*).



#### 1.3.1.6. *Los iones cloruro.*

El mecanismo de transporte de iones cloruro viene determinado por la estructura de los poros del concreto (diámetro, volumen y conectividad) y por el grado de saturación de dichos poros. Un concreto poco poroso y con baja interconexión entre ellos tendrá baja permeabilidad, baja difusividad, baja absorción capilar y baja conductividad eléctrica, por consiguiente, su resistividad eléctrica será alta al igual que la resistencia a la penetración de iones cloruro (*González Sersen, 2011*).



### 1.3.2. Adiciones en el concreto.

---

Las adiciones en la pasta de cemento como son por ejemplo las cenizas, el humo de sílice etc. densifican la matriz cementicia, es decir, disminuyen la porosidad del concreto por medio de reacciones químicas.

Un decremento en la porosidad disminuye la capacidad de conducción de cargas por iones en el concreto, presentándose un aumento en la medida de la resistividad eléctrica.

El proceso de densificación de una matriz cementicia genera una microestructura más fuerte, es por ello que la capacidad del concreto para soportar esfuerzos a compresión aumenta (Picos, 2014).

### 1.3.3. Factores ligados al ambiente.

---

#### 1.3.3.1. Humedad superficial.

Para tomar mediciones eléctricas sobre una superficie de concreto, es necesario que dicha superficie posea un grado de saturación elevado, con el objetivo de superar la resistencia de contacto entre los electrodos y el concreto.

#### 1.3.3.2. Temperatura.

La resistividad eléctrica varía en función de la temperatura, cuando existe un incremento en la temperatura los valores de resistividad disminuyen, esto se debe a que la viscosidad del fluido decrece y la movilidad de los iones responsables de la conducción de la corriente eléctrica aumenta (Picos, 2014).

La ley de Rasch y Hinrichsen (1908) nos da una relación entre la resistividad eléctrica y la temperatura:

$$\rho_1 = \rho_2 * e^A * \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \quad (13)$$

Donde:

$\rho_1$  = Resistividad eléctrica a la temperatura  $T_1$ , en  $\Omega$ -m.

$\rho_2$  = Resistividad eléctrica a la temperatura  $T_2$ , en  $\Omega$ -m.

$T_1$  y  $T_2$  = Temperaturas en (K).

$A$  = Constante que depende del concreto, en (K).



#### **1.3.4. Factores ligados al estado de la estructura.**

---

Lataste demostró que las variaciones de resistividad aparentes confirman la sensibilidad del método a la presencia de una zona de delaminación.

Además, estudió la influencia de la fisuración en la medida de la resistividad eléctrica. Demostró que la resistividad aparente depende de la resistividad de la fisura (fisura conductora o aislante) y de la orientación del dispositivo de medición.

Demostró también que existe una relación entre la profundidad de la fisura y la resistividad eléctrica (*Lataste, 2002*).



## 1.4. Conceptos básicos de durabilidad.

### 1.4.1. Introducción.

---

En un ambiente con presencia de iones cloruro, estos se acumulan en la superficie del concreto y lentamente se transportan a través del recubrimiento de concreto hasta llegar a la armadura. Cuando la concentración de los iones cloruro en la superficie del acero de las armaduras alcanza valores que exceden un nivel crítico (denominado  $C_{CRIT}$ ), la protección de la armadura corre el peligro de desaparecer y la corrosión puede desencadenarse.

Cuando el acero embebido en concreto se corroe, se reduce la sección de la barra de refuerzo de acero, ya que el fierro contenido en el acero reacciona con el oxígeno presente y se forma una capa de productos de corrosión (óxido o hidróxido de fierro) en el perímetro de la barra. El volumen ocupado por dicho óxido (o hidróxido) es mayor que el que ocupaba el acero original creando presiones contra el concreto, que rodea al acero, esto propicia la formación de grietas y desprendimientos del concreto. Estas grietas y/o desprendimientos del recubrimiento de concreto además de ser antiestéticas, pueden disminuir el anclaje del acero y, potencialmente, la resistencia del elemento estructural (Torres & Martínez, 2001).

### 1.4.2. Conceptos básicos de durabilidad.

---

#### 1.4.2.1. Durabilidad.

La durabilidad se define como la capacidad que presenta una estructura para conservar su funcionalidad, a su vez la funcionalidad de una estructura es una medida cuantificable en términos de su capacidad portante.

#### 1.4.2.2. Degradación.

La degradación de una estructura de concreto se define como la pérdida de su funcionalidad, es decir, se presenta un decremento en la capacidad portante de la estructura. Varios autores definen a la degradación como (RILEM, 1996):

$$D_e = \frac{1}{f_u} \quad (14)$$

Donde:

$D_e$  = Degradación.

$f_u$  = Funcionalidad.



#### 1.4.2.3. *Vida útil.*

El reporte de la Red Temática DURAR propone una definición clara para el concepto de vida útil de una estructura: “periodo en el que la estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento”. Es decir, si la estructura careciera de cualquiera de estas tres propiedades (seguridad, funcionalidad y estética) ésta habría ya sobrepasó el periodo de su vida útil (*DURAR, 2000*).

#### 1.4.2.4. *Vida residual.*

La vida residual de una estructura es el periodo que comienza a partir del término de su vida útil, es cuando la estructura no cumple con algún aspecto de seguridad, funcionalidad o estética (*DURAR, 2000*).

En este periodo de tiempo la estructura presenta agrietamientos y deterioro, por lo cual es necesario parchar, remodelar o sustituir por completo a la estructura. Durante la vida residual se aprecia un decremento en la funcionalidad de la estructura.

El fin de la vida residual se presenta cuando la estructura ha perdido tal funcionalidad o capacidad portante que esta próxima al colapso.

#### 1.4.2.5. *Estado límite de servicio (ELS).*

El estado límite de servicio (ELS) se alcanza cuando la estructura ya no cumple con algún requisito de seguridad, funcionalidad y estética, en otras palabras el estado límite de servicio nos indica el término de la vida útil y el inicio de la vida residual de la estructura (*CEB, 1992*).

El estado límite de servicio será el tiempo en el que la manifestación de daños externos por la formación de grietas con ancho no mayor a 0.1 mm es visible.

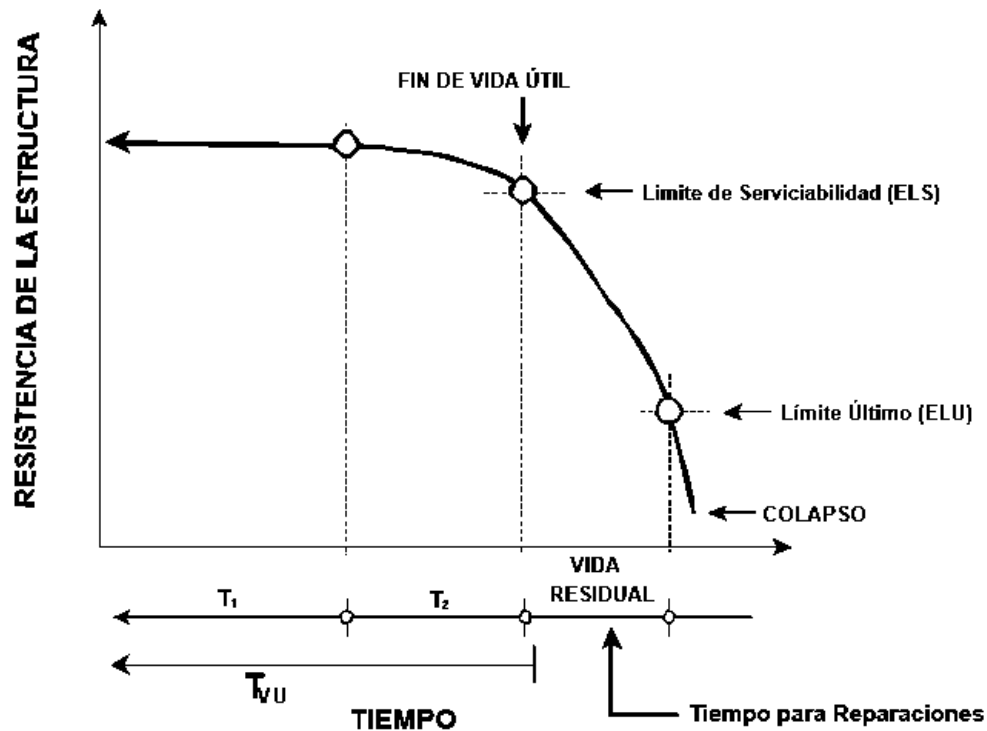
#### 1.4.2.6. *El estado límite último (ELU).*

Es el estado en que la estructura o elemento estructural se encuentra asociado con colapso u otra forma similar de falla estructural. Durante este periodo la estructura ha sufrido una degradación tal o una pérdida de funcionalidad que esta próxima al colapso (*CEB, 1992*). El estado límite último deberá ser menor al tiempo que se requiere para que la estructura colapse, por lo cual:

$$ELU < T_{COLAPSO}$$



La siguiente ilustración presenta un modelo de degradación que se basa en los diferentes conceptos anteriormente definidos.



*Ilustración 4. Modelo de durabilidad (Torres & Martínez, 2001).*

La ilustración anterior muestra que la vida útil de una estructura está compuesta por dos periodos de tiempo, el periodo que comprende un tiempo de iniciación ( $T_1$ ) y el periodo que comprende un tiempo de propagación ( $T_2$ ).

Esta consideración nace a partir del modelo de durabilidad considerado por Tuutti, en cual están basados la mayoría de los modelos de durabilidad que se han propuesto en función del tiempo, con la única finalidad de determinar la vida útil de una estructura de concreto reforzado.



### **1.4.3. Modelos de durabilidad propuestos en la literatura.**

---

A lo largo de la historia se han propuesto diferentes modelos de durabilidad, los cuales relacionan la degradación de la estructura por corrosión del acero de refuerzo o pre-esfuerzo con el tiempo.

Recordemos que un modelo de durabilidad tiene por objeto calcular la vida útil ( $T_{vu}$ ) de una estructura de concreto reforzado. Cada uno de estos modelos presenta una diferente concepción sobre el cálculo de la vida útil de una estructura (*Torres & Martínez, 2001*).

Los diferentes modelos son:

#### *1.4.3.1. El modelo de Tuutti:*

Este modelo representa la base en la cual se sustentan la mayoría de los modelos de durabilidad, el cual considera que la vida útil de una estructura de concreto reforzado es igual a la suma de dos periodos de tiempo, un periodo de iniciación y un periodo de propagación (*Tuutti, 1982*).

$$T_{vu} = T_i + T_p \quad (15)$$

Donde:

$T_{vu}$  = Tiempo de vida útil de una estructura de concreto reforzado.

$T_i$  = Tiempo o periodo de iniciación.

$T_p$  = Tiempo o periodo de propagación.

Este modelo de durabilidad únicamente contempla la despasivación del acero por el ataque de cloruros.

#### *1.4.3.1.1. Tiempo o periodo de iniciación.*

El periodo de iniciación ( $T_i$ ) se define como el tiempo que tarda el frente de ion cloruro en atravesar el recubrimiento que protege al acero de refuerzo, alcanzar la armadura y provocar su despasivación.

Este tiempo estará en función de la velocidad de avance del frente (ion cloruro), y esta a su vez (velocidad de avance) estará en función de las propiedades del concreto y de la agresividad del medio (concentración de sales) que rodea a la estructura.



El periodo de iniciación ( $T_i$ ) puede prolongarse entre 50 y 100 años, dependiendo de la calidad del concreto (*ACI-201, 1991*) & (*RILEM, 1996*). Por esto las tendencias actuales para el diseño por durabilidad de estructuras de concreto reforzado en ambientes con concentraciones de sales (ion cloruro) priorizan en prolongar el periodo ( $T_i$ ) lo más que se pueda.

#### 1.4.3.1.2. Tiempo o periodo de propagacion.

El periodo de propagación ( $T_p$ ) se define como el lapso de tiempo que transcurre entre la pérdida de protección de la película pasiva del acero de refuerzo y la manifestación externa de los daños por corrosión de la misma (manchas de óxido, agrietamientos, o desprendimientos de la cobertura del concreto) (*Torres & Martínez, 2001*).

El periodo de propagación finaliza cuando en la superficie de la estructura se observan grietas con un ancho mayor a 0.1 mm.

Se ha estimado experimentalmente y por inspección de estructuras en servicio, que la duración del periodo de propagación ( $T_p$ ) es únicamente entre 1 y 5 años, dependiendo principalmente de la velocidad de corrosión, ICORR (que a su vez está ligada íntimamente al contenido de humedad y de oxígeno del concreto que rodean a la armadura) (*ACI-201, 1991*) & (*RILEM, 1996*).

#### 1.4.3.2. El modelo de Bazant.

Este modelo de durabilidad también contempla un periodo de iniciación ( $T_i$ ) y uno de propagación ( $T_p$ ), considera que el periodo de propagación ( $T_p$ ) finaliza cuando se detectan daños visibles en la superficie de la estructura (*Bazant, 1979a*) & (*Bazant, 1979b*).

#### 1.4.3.3. El modelo de Browne.

Este modelo de durabilidad considera que la vida útil ( $T_{vu}$ ) es la suma de un periodo de iniciación ( $T_i$ ) y uno de propagación ( $T_p$ ), el  $T_p$  finaliza al encontrarse daños visibles en la estructura o elemento estructural (*Browne, 1980*).

#### 1.4.3.4. El modelo de Beeby.

Este modelo de durabilidad divide el cálculo de la vida útil ( $T_{vu}$ ) en dos etapas  $T_i$  y  $T_p$ . A diferencia de los modelos de Browne y Bazant el modelo de durabilidad propuesto por Beeby considera que el periodo de propagación finaliza hasta que se ha alcanzado un nivel inaceptable de la corrosión (*Beeby, 1983*). Esto quiere decir que el elemento puede estar más allá de su periodo de vida útil y encontrarse en la etapa de su vida residual (*Torres & Martínez, 2001*).



#### **1.4.4. Procedimiento general para el diseño por durabilidad.**

---

El procedimiento usado para el diseño por durabilidad de una estructura de concreto armado es el siguiente (*Torres & Martínez, 2001*):

#### DISEÑO POR DURABILIDAD.

1. Determinación de la vida útil de diseño.
2. Análisis de los efectos del medio ambiente.
3. Identificación de los mecanismos de degradación.
4. Selección del modelo de durabilidad.
5. Determinar los parámetros de durabilidad:
6. Factores a ser considerados:
  - a) Resistencia del concreto ( $f'_c$ ).
  - b) Permeabilidad del concreto.
  - c) Tipo y cantidad de cemento.
  - d) Método de curado.
  - e) Tipo de acero de refuerzo.
  - f) Dimensiones del elemento.



## CAPITULO II. ESTADO DEL ARTE.

### 2.1. Introducción.

---

Esta metodología permite el cálculo de la vida útil de una estructura de concreto reforzado con base en la resistividad eléctrica húmeda (*PNE 83994-2, 2016*), dicha estructura pudiera estar bajo el ataque del ion cloruro o por carbonatación. Para nuestro caso de estudio nos enfocaremos en el cálculo de la vida útil por ataque del ion cloruro.

La vida útil de una estructura de concreto es la suma del tiempo en que tarda el ion cloruro en atravesar el recubrimiento de concreto que protege al acero de refuerzo hasta llegar a este (Periodo de iniciación) y el tiempo en que se corroe el acero de refuerzo hasta formarse microfisuras en la superficie del concreto (tiempo de propagación) (*Tuutti, 1982*).

Es decir:

$$T_{vu} = T_i + T_p$$

Debemos garantizar una vida útil de por lo menos 100 años, si logramos que el tiempo de iniciación ( $T_i$ ) sea de por lo menos 100 años no será necesario calcular el tiempo de propagación ( $T_p$ ), por lo cual, solo nos enfocaremos en el cálculo del tiempo de iniciación garantizando que este sea de por lo menos 100 años.

La resistividad puede ser utilizada para calcular la vida útil de una estructura de concreto. Esto se debe a la relación inversa que guarda la resistividad y la difusividad del ion cloruro (lo que permite el cálculo del periodo de iniciación) y la relación entre la velocidad de corrosion y la resistividad (lo que permite el cálculo del periodo de propagación) debido a que la resistividad refleja el grado de saturación del concreto.

Se deben tener en cuenta dos aspectos muy importantes cuando se calcula la vida útil de una estructura de concreto reforzado a partir de la resistividad:

- a) La resistividad refleja la porosidad del concreto y la tortuosidad de los poros capilares, siempre y cuando el concreto se encuentre totalmente saturado.
- b) La resistividad varia con el grado de saturación del concreto, el valor mínimo de resistividad se alcanza cuando el grado de saturación es el máximo, el valor máximo de resistividad se alcanza cuando el concreto se encuentra parcialmente húmedo.

Es baja la velocidad de avance del ion cloruro cuando el concreto se encuentra totalmente seco, esta se incrementa conforme el concreto aumenta su grado de saturación.

Debido a lo anterior, el cálculo de la vida útil se basa en valores de resistividad obtenidos a partir de especímenes de concreto curados en condiciones de saturación, ya que esta representa la condición más crítica.

La metodología que se presenta a continuación considera únicamente el cálculo del tiempo o periodo de iniciación ( $T_i$ ).



## 2.2. Fundamento del método.

---

El método se basa en la relación entre la difusividad y la resistencia al movimiento de las cargas eléctricas (iones) establecida hace unos 100 años por A. Einstein y que a lo largo del tiempo ha sido modificada por otros autores al aplicar ese principio a medios porosos (PNE 83994-2, 2016).

Esta relación se expresa como:

$$D_{ef} = \frac{k_{cl}}{\rho_{ef}} \quad (16)$$

Donde:

$D_{ef}$  = Coeficiente de difusión efectivo (no toma en cuenta la reacción de los cloruros con las fases del cemento).

$k_{cl}$  = Una constante que depende de la concentración exterior de cloruros.

$\rho_{ef}$  = Resistividad efectiva, la cual se calcula a partir de especímenes de concreto en estado saturado.

Sabemos que la resistividad guarda una relación inversa con la conductividad, es por ello que:

$$\sigma = \frac{1}{\rho_{ef}} \quad (17)$$

Donde:

$\sigma$  = Conductividad (inversa de la Resistividad).

$\rho_{ef}$  = Resistividad efectiva, la cual se calcula a partir de especímenes de concreto en estado saturado.

Debido a la relación anterior, la ecuación número dieciséis queda de la siguiente forma (PNE 83994-2, 2016):

$$D_{ef} = k_{cl} \sigma \quad (18)$$



### 2.3. Deducción de la fórmula para el cálculo de la vida útil de estructuras de concreto a partir del valor de Resistividad.

---

La velocidad de avance de los cloruros es, en general, una función de la raíz cuadrada del tiempo (*DURAR, 2000*):

$$X_{cl} = K_{cl} \sqrt{t} \quad (19)$$

Donde:

$X_{cl}$  = Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros.

$t$  = Tiempo.

$K_{cl}$  = Constante dependiente del concreto y del medio.

Ello es debido a que, en general, tanto los procesos de difusión pura, como los de absorción capilar, siguen una ley potencial.

El cálculo riguroso de  $X$  es complejo debido a la multitud de parámetros que influyen (porosidad del concreto, tipo de cemento, nivel de contaminación exterior, contenido en humedad del concreto, etc.).

Es decir, la constante  $K_{cl}$  depende del tipo de cemento, de la agresividad del ambiente (concentración de cloruros), del contenido de humedad del concreto etc. Uno de los modelos más sencillos que permite predecir la *velocidad de penetración* del frente de cloruros en el concreto es la que relaciona la profundidad de alcance del ion cloruro con la raíz cuadrada del tiempo de exposición, por lo que (*DURAR, 2000*):

$$K_{cl} = \frac{X_{cl}}{\sqrt{t}} \quad (20)$$

Con base en la información del párrafo anterior, se puede inferir que:

$$K_{cl} = V_{cl} \quad (21)$$

Donde:

$V_{cl}$  = Velocidad de penetración del frente de cloruros.

$K_{cl}$  = Constante dependiente del concreto y del medio.



Tomando en cuenta la ecuación número veintiuno, la cual se sustituye en la ecuación número diecinueve, se tiene que:

$$X_{cl} = V_{cl} \sqrt{t} \quad (22)$$

Donde:

$X_{cl}$  = Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros.

$V_{cl}$  = Velocidad de penetración del frente de cloruros.

$t$  = Tiempo.

Considerando que, la velocidad de penetración del frente de cloruros es igual a la raíz cuadrada del coeficiente de difusión efectivo (*PNE 83994-2, 2016*):

$$V_{cl} = \sqrt{D_{ef}} \quad (23)$$

Sustituyendo la ecuación número veintitrés en la ecuación número veintidós:

$$X_{cl} = \sqrt{D_{ef}} \sqrt{t} \quad (24)$$

La variable  $t$  representa el tiempo de exposición al agente agresor (ion cloruro). Ya que nos interesa conocer el tiempo de vida útil (periodo de iniciación) se despeja el tiempo de la ecuación número veinticuatro:

$$t = \frac{X_{cl}^2}{D_{ef}} \quad (25)$$

El periodo de iniciación es el tiempo que tarda el frente de cloruros en atravesar el espesor de recubrimiento que protege al acero de refuerzo y llegar a la superficie de este, por lo cual la ecuación número veinticinco se podría describir como:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2}{D_{ef}} \quad (26)$$



Sustituyendo la ecuación número dieciséis en la ecuación número veintiséis:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2}{\frac{k_{cl}}{\rho_{ef}}} \quad (27)$$

Expresada de otra forma:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2 \rho_{ef}}{k_{cl}} \quad (28)$$

Donde:

$X_{cl}$  = Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros.

$k_{cl}$  = Una constante que depende de la concentración exterior de cloruros.

$\rho_{ef}$  = Resistividad efectiva, la cual se calcula a partir de especímenes de concreto en estado saturado.

$t_i$  = Tiempo de iniciación.

En la expresión número veintiocho la relación  $\rho_{ef}/k_{cl}$  no toma en cuenta la reacción de los cloruros con las fases del cemento, es por ello que a continuación se presenta un nuevo parámetro, el cual se incluirá en la ecuación para el cálculo de la vida útil (periodo de iniciación).



### 2.3.1. Factor de retardo ( $r_b$ ).

---

El factor de retardo de un concreto es un valor que toma en cuenta la cantidad de cloruros que quedan combinados en relación al flujo de iones cloruro. El factor de retardo se expresa como la relación entre el coeficiente de difusión en estado estacionario (equivalente al  $D_{ef}$ ) y el coeficiente de difusión en estado no estacionario (equivalente al  $D_{ap}$ ) (PNE 83994-2, 2016):

$$r_{b,cl} = \frac{D_{ef,cl}}{D_{ap,cl} * P} \quad (29)$$

Donde:

$r_{b,cl}$  = Factor de retardo.

$D_{ef,cl}$  = Coeficiente de difusión en estado estacionario referido a  $\text{cm}^3$  de fase acuosa, en  $\text{cm}^2/\text{s}$ .

$D_{ap,cl}$  = Coeficiente de difusión en estado no estacionario referido a  $\text{cm}^3$  de muestra, en  $\text{cm}^2/\text{s}$ .

$P$  = Volumen de la fase acuosa entre el volumen de muestra, que coincide con la porosidad del concreto en volumen cuando la muestra está saturada, en  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ .

De forma simplificada se pueden tomar los valores que se presentan en la siguiente tabla:

	Tipo de Cemento	Factor de retardo
<b>CLORUROS</b>	Tipo I	1.30
	Tipo II y III/A	1.50
	Tipo III/B, III/C y IV	2.00

**Tabla 1.** Valores simplificados del factor de retardo (PNE 83994-2, 2016).



### 2.3.2. Resistividad aparente ( $\rho_{ap}$ ).

---

La resistividad aparente  $\rho_{ap}$  es el valor de la resistividad efectiva por el factor de retardo  $r_b$  (PNE 83994-2, 2016):

$$\rho_{ap} = \rho_{ef} * r_{b,cl} \quad (30)$$

La  $\rho_{ap}$  es un parámetro teórico que se ha definido por analogía a la existencia de un coeficiente de difusión efectivo  $D_{ef}$  (equivalente a la  $\rho_{ef}$ ) que no contempla que haya reacción entre el cloruro y las fases hidratadas del cemento y un coeficiente “aparente”  $D_{ap}$  que si toma en cuenta esta reacción de los cloruros. La  $\rho_{ap}$  equivale al  $D_{ap}$  que se deduce de un ensayo de difusión de cloruros. La  $\rho_{ap}$  no puede ser obtenida de una medida de resistividad que solo aporta la  $\rho_{ef}$ .

Por lo tanto (tomando como base la ecuación número veintiocho y la número treinta), la ecuación para el cálculo de la vida útil (periodo de iniciación) que considera la reacción de los cloruros con las fases del cemento es:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2 \rho_{ap}}{k_{cl}} \quad (31)$$

Expresada de otra forma:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2 \rho_{ef}}{k_{cl}} r_{b,cl} \quad (32)$$

Donde:

$X_{cl}$  = Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros.

$k_{cl}$  = Una constante que depende de la concentración exterior de cloruros.

$\rho_{ef}$  = Resistividad efectiva, la cual se calcula a partir de especímenes de concreto en estado saturado.

$r_{b,cl}$  = Factor de retardo.

$t_i$  = Tiempo de iniciación.



La constante  $k_{cl}$  que depende de la concentración exterior de cloruros puede expresarse como un factor de exposición, tal y como se muestra a continuación.

### **2.3.3. Factor de exposición ambiental para el periodo de iniciación ( $F_{exp}$ ).**

---

El factor de exposición ambiental para el periodo de iniciación  $F_{exp}$  es el factor que relaciona la resistividad del concreto con la difusividad de los cloruros (*PNE 83994-2, 2016*). Es decir:

$$D_{ap,cl} = \frac{F_{exp,cl}}{\rho_{ap}} \quad (33)$$

Si comparamos la ecuación número treinta y tres y la ecuación número dieciséis y además consideramos la influencia del factor de retardo, se infiere que:

$$F_{exp,cl} = k_{cl} \quad (34)$$

Sustituyendo la igualdad anterior en la ecuación número treinta y dos:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2 \rho_{ef}}{F_{exp,cl}} r_{b,cl} \quad (35)$$

Donde:

$X_{cl}$  = Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros.

$F_{exp,cl}$  = Factor de exposición ambiental.

$\rho_{ef}$  = Resistividad efectiva, la cual se calcula a partir de especímenes de concreto en estado saturado.

$r_{b,cl}$  = Factor de retardo.

$t_i$  = Tiempo de iniciación.



El factor de exposición ambiental depende del clima y de la cantidad de cloruros. Este factor considera el grado de agresividad ambiental (contenido de cloruros).

Los valores de  $F_{exp,cl}$  que pueden ser utilizados en función de la agresividad ambiental y que a la vez son independientes de la resistencia mecánica del concreto son:

Clase de exposición	$F_{exp,cl}$ ( $\Omega\text{-cm}^3/\text{año}$ )
XS1 - IIIa-aéreo (> 500 m de la costa)	5,000
XS1 - IIIa-aéreo (< 500 m de la costa)	10,000
XS2 - IIIb	17,000
XS3 - IIIc	25,000

**Tabla 2.** Valores del factor de exposición ambiental en función de la clase de ambiente (PNE 83994-2, 2016).

#### 2.3.4. Resistividad efectiva ( $\rho_{ef}$ ).

---

El valor de  $\rho_{ef}$  se mide utilizando el método de las cuatro puntas después de un curado normalizado en probetas curadas durante 28 días en condiciones de humedad relativa superior al 95% y  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura.

La  $\rho_{ef}$  representa el último valor de resistividad que se mide, no se tiene experiencia de cuánto dura la hidratación del concreto ni de la eficacia de la reacción con la fases del cemento. Por ello se sugieren edades tempranas como medida conservadora debido a la falta de experiencia. Las edades sugeridas son 60 y 90 días (PNE 83994-2, 2016).

El último valor de  $\rho_{ef}$  que se mide puede ser expresado de la siguiente forma (Ver anexo A):

$$\rho_{ef} = \rho_{ef,0} \left(\frac{t_n}{t_0}\right)^q \quad (36)$$



Donde:

$\rho_{ef}$  = Último valor medido de Resistividad efectiva, la cual se calcula a partir de especímenes de concreto en estado saturado.

$\rho_{ef,0}$  = Resistividad efectiva obtenida a los 28 días de curado en cámara húmeda a una humedad relativa superior al 95% y  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura.

$t_n$  = Es la última edad que se mide la resistividad efectiva.

$t_o$  = Es la edad de 28 días en la que se toma el valor de resistividad.

$q$  = Es el factor edad.

Sustituyendo la ecuación número treinta y seis en la ecuación número treinta y cinco:

$$t_i = \frac{X_{cl}^2 \rho_{ef,0} \left(\frac{t_n}{t_o}\right)^q}{F_{exp,cl}} r_{b,cl} \quad (37)$$

Donde:

$X_{cl}$  = Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros, en *cm*.

$F_{exp,cl}$  = Factor de exposición ambiental, en  $\Omega\text{-cm}^3/\text{año}$ .

$\rho_{ef}$  = Último valor medido de Resistividad efectiva, la cual se calcula a partir de especímenes de concreto en estado saturado, en  $\Omega\text{-cm}$ .

$\rho_{ef,0}$  = Resistividad efectiva obtenida a los 28 días de curado en cámara húmeda a una humedad relativa superior al 95% y  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura, en  $\Omega\text{-cm}$ .

$t_n$  = Es la última edad que se mide la resistividad efectiva.

$t_o$  = Es la edad de 28 días en la que se toma el valor de resistividad. Ambas edades  $t_n$  y  $t_o$  deben introducirse en las mismas unidades.

$q$  = Es el factor edad (adimensional)

$r_{b,cl}$  = Factor de retardo (adimensional)

$t_i$  = Tiempo de iniciación, en *años*.



La ecuación número treinta y siete representa el cálculo de la vida útil (periodo de iniciación) del concreto en función de la resistividad eléctrica húmeda.

También se introdujo un nuevo parámetro denominado “Factor Edad” el cual está representado por la letra “q”.

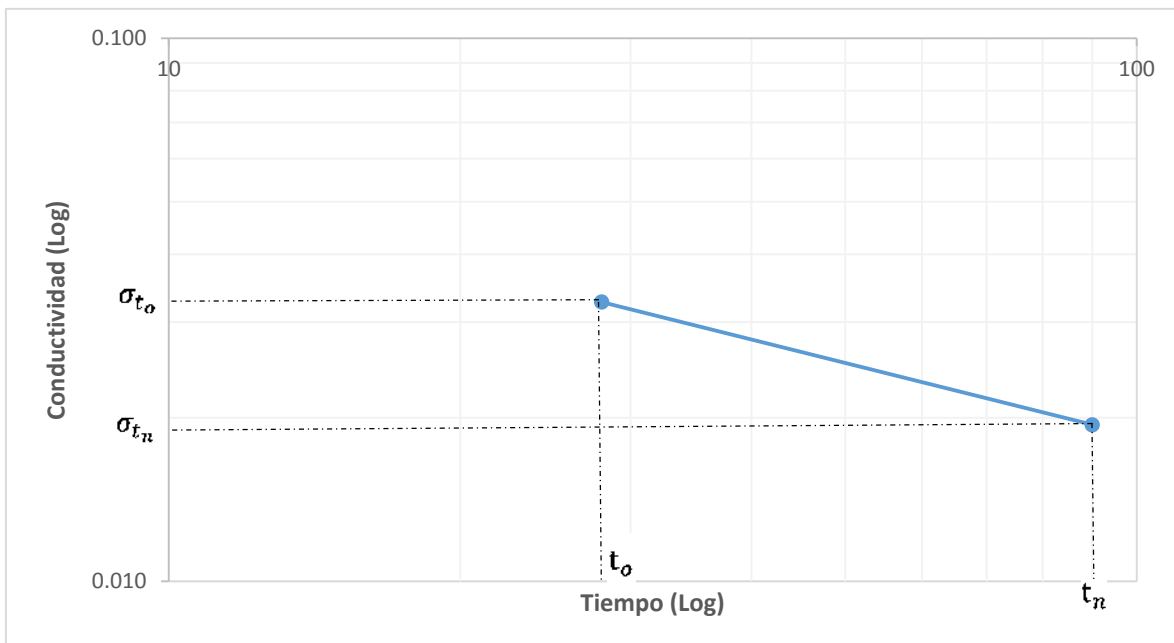
### 2.3.5. Factor edad ( $q$ ).

---

El factor edad “q” es el exponente al que se eleva una relación de edades entre las que se quiere calcular el aumento de resistividad con el tiempo. Habitualmente la edad inicial es la de 28 días desde la fabricación y la otra edad puede ser considerada a 60 o 90 días.

Para obtener el valor del factor edad “q” es necesario seguir una secuencia ordenada de pasos:

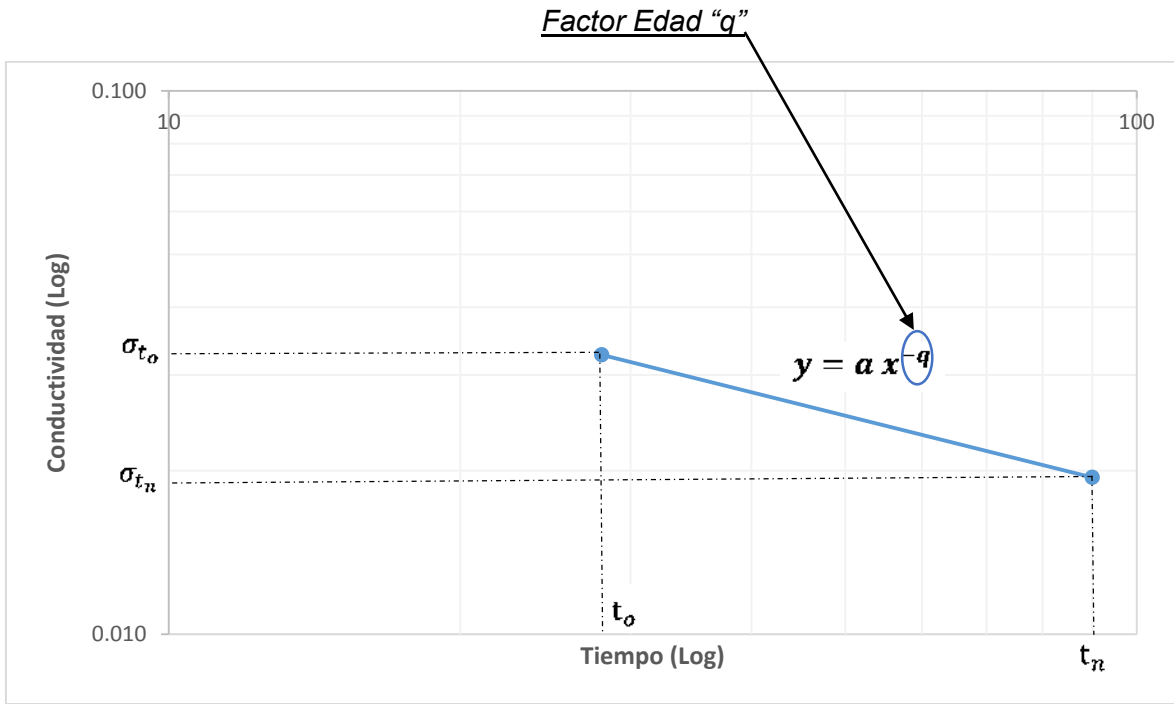
- Se obtienen los valores inversos de la resistividad efectiva (conductividad) a la edad de 28 días ( $t_o$ ) y a la última edad que se midió la resistividad efectiva ( $t_n$ ).
- Se grafican ambos valores en escala logarítmica, colocando en el eje de las ordenadas los valores de conductividad y en el eje de las abscisas el tiempo  $t_o$  y  $t_n$ , obteniendo un gráfico como el que se muestra a continuación:



**Gráfica 1.** Valores de conductividad en los tiempos  $t_o$  y  $t_n$  (escala logarítmica).



- c) Se obtiene una línea de tendencia potencial de la recta, generándose la ecuación del gráfico, el valor del exponente se tomará como el factor edad “q”.



**Gráfica 2.** Valores de conductividad en los tiempos  $t_o$ ,  $t_n$  y factor edad “q” (escala logarítmica).

- d) Se toma el valor absoluto del factor edad “q”.

El valor del factor edad “q” representa la pendiente de la recta en escala logarítmica, físicamente representa el proceso de hidratación del concreto (conservado en estado húmedo). El aumento de resistividad (disminución de la conductividad) a lo largo del tiempo refleja la disminución de la porosidad.

El factor edad “q” representa la evolución de la resistividad con el tiempo. Este factor puede no utilizarse si se efectúa un curado acelerado (PNE 83994-2, 2016).

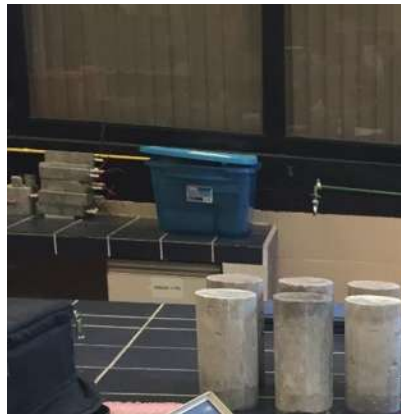


## CAPITULO III. CEMENTERA A.

### 3.1. Introducción.

---

Se fabricaron siete mezclas de concreto los días 20 y 21 de marzo, en el laboratorio de materiales de la “cementara A”, a estas se les realizaron tres pruebas utilizando cilindros de 10 x 20 cm.



*Ilustración 5. Cilindros de concreto elaborados por la Cementera A.*

Las pruebas realizadas fueron tres, las cuales se agrupan en pruebas no destructivas y pruebas destructivas:

- a) Resistividad Eléctrica Húmeda (Prueba no destructiva)
- b) Velocidad de Pulso Ultrasónico (Prueba no destructiva)
- c) Resistencia a la compresión (Prueba destructiva)

Cabe señalar que cada una de estas pruebas se realizó a los **3, 7, 28, 56, 90** y **120** días a partir de su fabricación.

A continuación se muestra la composición, denominación (Identificación) así como un análisis de cada una de las siete mezclas elaboradas.



### 3.2. Datos de las mezclas de concreto.

Número	ID	Fecha de colado	Denominación	Total de cementantes (Kg)	Cemento (Kg)	Ceniza Volante (Kg)	Metacaolín (Kg)	Microsílica (Kg)	Relación a/c
1	M-151	2017/03/20	M1-1	440.0	360.8		44.0	35.2	0.43
2	M-155	2017/03/20	M1-2	440.0	347.6		66.0	26.4	0.44
3	M-156	2017/03/20	M1-3	553.0	425.8		83.0	44.2	0.43
4	M-153	2017/03/21	M1-4	470.0	352.5	94.0		23.5	0.47
5	M-153 -B	2017/03/21	M1-5	470.0	314.9	117.5		37.6	0.49
6	M -158	2017/03/21	M1-6	440.0	360.8		44.0	35.2	0.43
7	M -157	2017/03/21	M1-7	440.0	360.8		44.0	35.2	0.43

**Tabla 3.** Composición y denominación de las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera A.

Número	ID	Fecha de colado	Denominación	Agua (l)	Relación a/c	Relación a/tc	Contenido de aire	Revenimiento (cm)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Temperatura (C°)
1	M-151	2017/03/20	M1-1	154	0.43	0.35	1.9	12.50	2374	19.10
2	M-155	2017/03/20	M1-2	154	0.44	0.35	2.0	15.00	2370	18.20
3	M-156	2017/03/20	M1-3	185	0.43	0.33	1.9	14.00	2342	17.70
4	M-153	2017/03/21	M1-4	165	0.47	0.35	2.1	13.50	2354	20.10
5	M-153 -B	2017/03/21	M1-5	154	0.49	0.33	2.2	12.50	2338	19.90
6	M -158	2017/03/21	M1-6	155	0.43	0.35	2.2	13.50	2353	17.10
7	M -157	2017/03/21	M1-7	154	0.43	0.35	2.1	13.00	2364	16.50

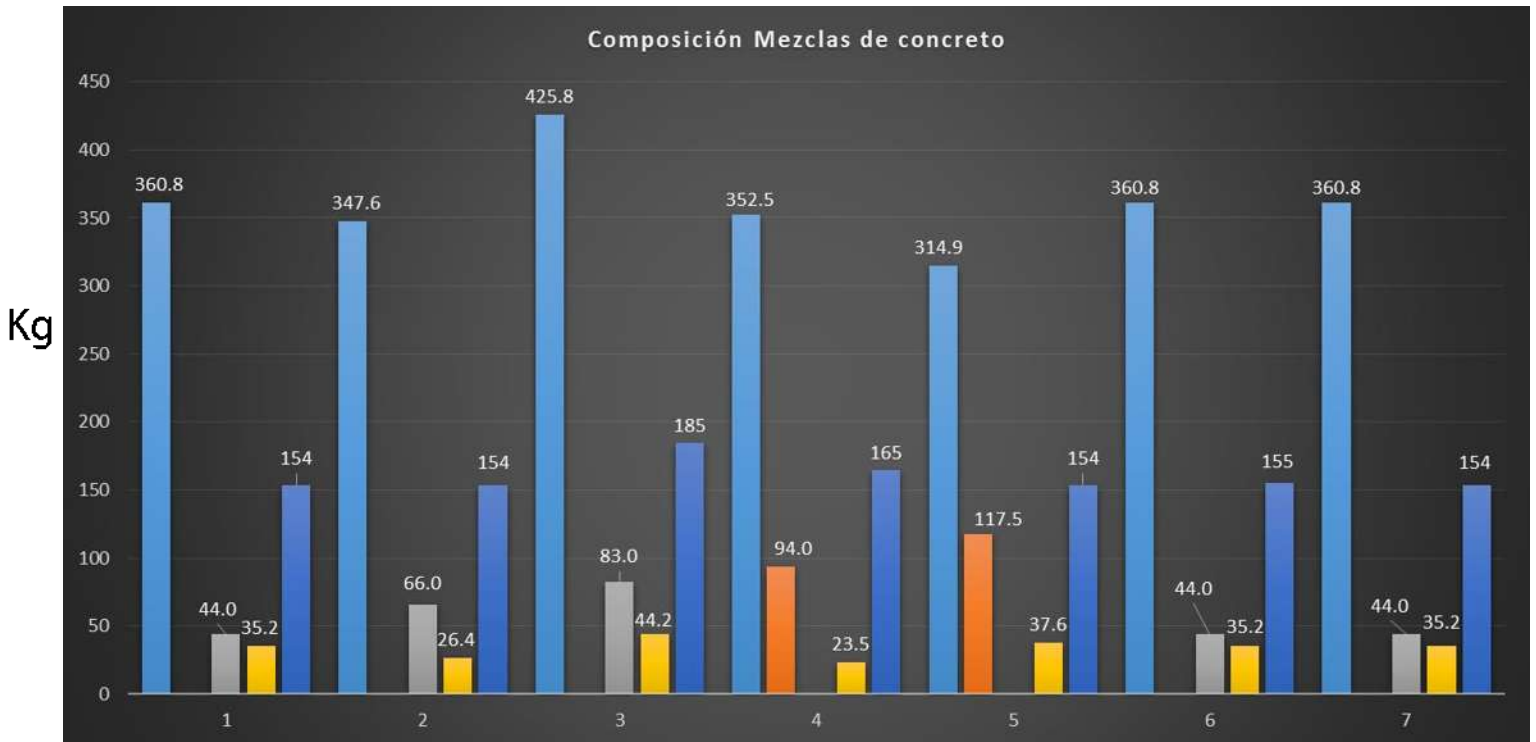
**Tabla 4.** Propiedades y denominación de las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera A.

Número	ID	Total de cementantes (Kg)	Porcentaje (%)	Cemento (%)	Ceniza Volante (%)	Metacaolín (%)	Microsílica (%)	Relación a/c	Relación a/tc
1	M-151	440.0	100.00	82.00		10.0	8.0	0.43	0.35
2	M-155	440.0	100.00	79.00		15.0	6.0	0.44	0.35
3	M-156	553.0	100.00	77.00		15.0	8.0	0.43	0.33
4	M-153	470.0	100.00	75.00	20.0		5.0	0.47	0.35
5	M-153 -B	470.0	100.00	67.00	25		8.0	0.49	0.33
6	M -158	440.0	100.00	82.00		10.0	8.0	0.43	0.35
7	M -157	440.0	100.00	82.00		10.0	8.0	0.43	0.35

**Tabla 5.** Composición en porcentaje y denominación de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera A.



### 3.3. Análisis de las mezclas de concreto.



Número de muestras.

Número	ID
1	M-151
2	M-155
3	M-156
4	M-153
5	M-153 -B
6	M -158
7	M-157

- Cemento.
- Ceniza Volante.
- Metacaolín.
- Microsilica.
- Contenido de Agua.

**Gráfica 3.** Composición y denominación de las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera A.

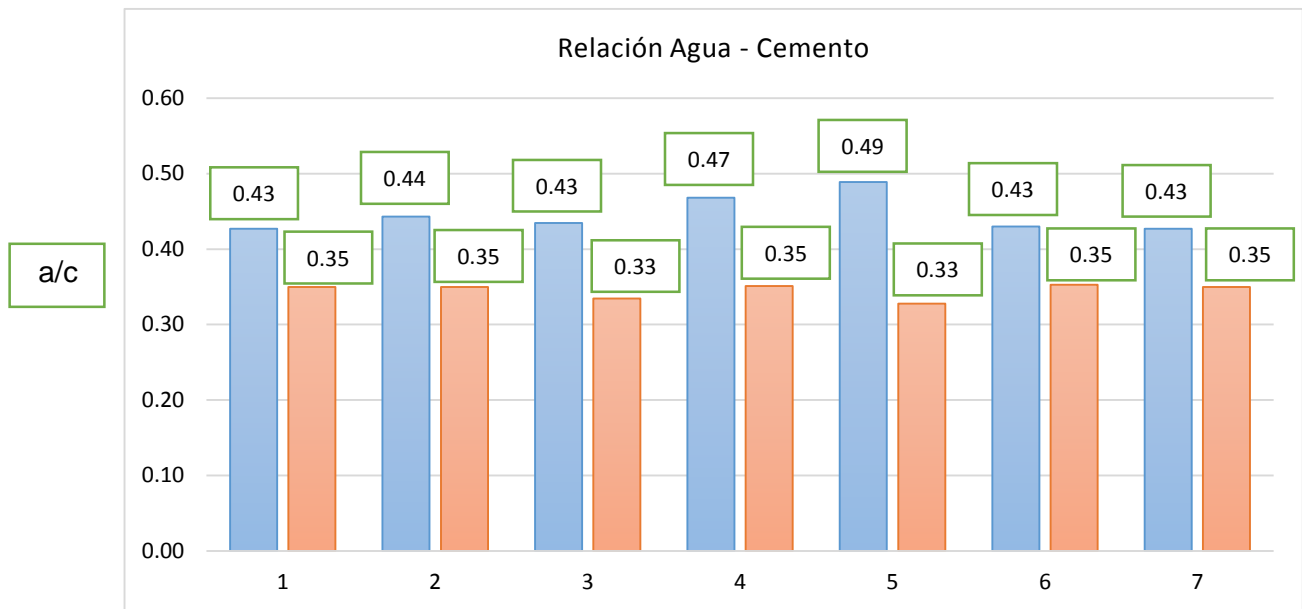
De la gráfica anterior se puede concluir lo siguiente:

- a) La mezcla número tres (**M-156**) es la que presenta un mayor contenido de cemento (kg).





- b) Las mezclas 4 (**M-153**) y 5 (**M-153-B**) son las únicas que contienen ceniza volante, presentando un mayor contenido la mezcla número 5 (117.5 kg), aunque la mezcla número 4 presenta un mayor contenido de cemento (352.5 kg). Ambas presentan el mismo total de materiales cementantes (470 kg).
- c) Todas las mezclas contienen Microsilica en cantidades diferentes. La mezcla número tres (**M-156**) es la que presenta una mayor cantidad de Microsilica (44.2 kg).
- d) Todas las mezclas contienen Metacaolín a excepción de las mezclas 4 (**M-153**) y 5 (**M-153-B**). La mezcla número 3 (**M-156**) es la que presenta una mayor cantidad de Metacaolín (83 kg).

Las mezclas de concreto que presentan una menor relación agua – cemento son las mezclas 1 (**M-151**), 3 (**M-156**), 6 (**M-158**) y la número 7 (**M-157**), así mismo la mezcla número 5 (**M-153-B**) es la que presenta una mayor relación agua-cemento, como se muestra en la siguiente gráfica:



Número	ID
1	M-151
2	M-155
3	M-156
4	M-153
5	M-153 -B
6	M-158
7	M-157

-  Relación agua – cemento.
-  Relación agua - total de cementantes.

**Gráfica 4.** Relación agua - cemento de las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera A.



De la gráfica cuatro se observa que las siete mezclas de concreto mantienen un valor aproximado de 0.35 con respecto a la relación agua – total de cementantes.

Es difícil saber cuál será el comportamiento de estas 7 mezclas de concreto ante el ataque del ion cloruro, es decir, no sabemos con exactitud cuál será el desempeño de cada una de estas mezclas en términos de durabilidad, debido a sus diferentes composiciones y relaciones agua – cemento.

Para ello, se propuso el análisis de estas 7 mezclas de concreto mediante tres pruebas utilizando cilindros de 10 x 20 cm, resistividad eléctrica húmeda, velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión a edades de 3, 7, 28, 56, 90 y 120 días.

La gran desventaja que presentan las pruebas no destructivas (resistividad eléctrica húmeda y velocidad de pulso ultrasónico) es que no garantizan de cierta manera una determinada vida útil, más sin embargo son indicadoras de la calidad de la mezcla de concreto, lo cual se traduce en términos de durabilidad.

A continuación se presentan los resultados de la prueba de resistividad eléctrica realizada a las 7 mezclas de concreto a los 3, 7, 28, 56, 90 y 120 días. Más adelante se discutirán algunos resultados y observaciones que de estas emanen, además se compararán los valores obtenidos en cada una de las pruebas con los valores mínimos que marcan las normas de durabilidad para ser considerado como un concreto de buena calidad (un concreto durable).



### 3.4. Resistividad eléctrica húmeda.

---

Se hicieron mediciones de resistencia eléctrica por el método directo con un resistómetro marca Nilsson modelo 400, mediante este aparato podemos obtener el valor de la resistencia más sin embargo para el cálculo del valor de la resistividad se realiza lo siguiente:

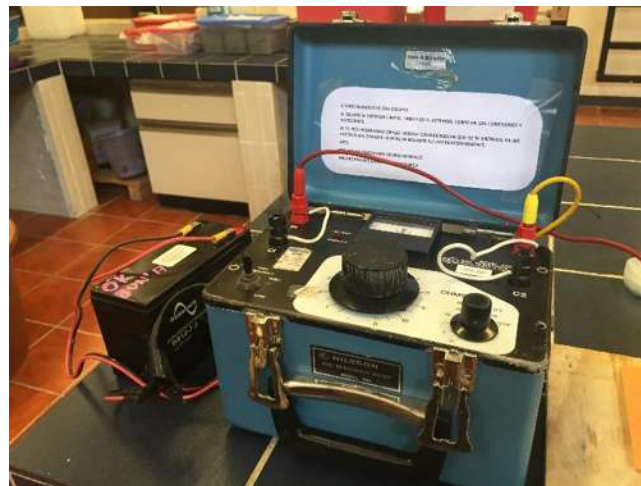
$$\text{Resistividad} = \text{Resistencia} \left(\frac{A}{L}\right)$$

**Donde:**

**A=** es el área de la sección del cilindro.

**L=** es la longitud del cilindro.

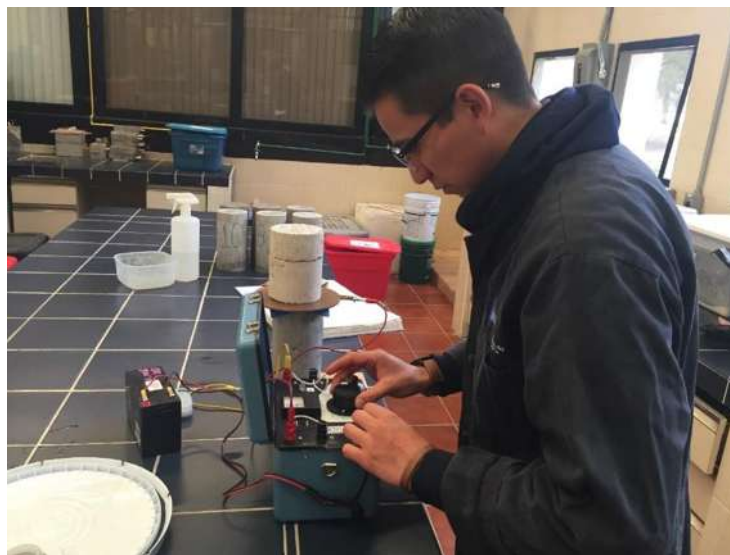
La relación **A/L** también es conocida como el factor forma, por ello se midieron tanto el área de la sección y longitud de cada cilindro.



**Ilustración 6.** Resistómetro marca Nilsson modelo 400.



**Ilustración 7.** Evidencia fotográfica de la prueba de resistividad eléctrica húmeda.



**Ilustración 8.** Evidencia fotográfica de la prueba de resistividad eléctrica húmeda.



Los resultados de esta prueba se muestran a continuación.

**Tabla 6.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 3 días de edad – Cementera A.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 3 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ )
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm
1	M-151	1-1	20.1	10.1	80.12	0.83	3.3	3.4
		1-2	20.3	10.1	80.12	0.85	3.3	
		1-3	20.3	10.15	80.91	0.89	3.5	
		1-4	20.2	10.15	80.91	0.85	3.4	
2	M-155	2-1	20.2	10.15	80.91	0.86	3.4	3.3
		2-2	20.2	10.15	80.91	0.84	3.4	
		2-3	20.1	10.1	80.12	0.82	3.3	
		2-4	20.2	10.1	80.12	0.84	3.3	
3	M-156	3-1	20.5	10.15	80.91	0.87	3.4	3.3
		3-2	20.2	10.1	80.12	0.88	3.5	
		3-3	20.3	10.1	80.12	0.80	3.2	
		3-4	20.1	10.1	80.12	0.78	3.1	
4	M-153	4-1	20.4	10.1	80.12	0.80	3.1	3.1
		4-2	20.2	10.1	80.12	0.78	3.1	
		4-3	20.4	10.1	80.12	0.75	2.9	
		4-4	20.3	10.2	80.91	0.80	3.2	
5	M-153 B	5-1	20.3	10.2	80.91	0.69	2.8	2.7
		5-2	20.3	10.1	80.12	0.69	2.7	
		5-3	20.2	10.2	80.91	0.65	2.6	
		5-4	20.2	10.1	79.33	0.67	2.6	
6	M-158	6-1	20.6	10.2	80.91	0.57	2.2	2.2
		6-2	20.1	10.3	83.32	0.53	2.2	
		6-3	20.2	10.2	80.91	0.59	2.4	
		6-4	20.4	10.0	78.85	0.54	2.1	
7	M-157	7-1	20.1	10.1	80.12	0.59	2.4	2.4
		7-2	20.1	10.1	80.12	0.61	2.4	
		7-3	20.3	10.2	80.91	0.63	2.5	
		7-4	20.2	10.1	79.33	0.61	2.4	



**Tabla 7.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 7 días de edad – Cementera A.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 7 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
1	M-151	1-5	20.8	10.3	83.32	2.18	8.7	8.9
		1-6	20.4	10.0	78.54	2.20	8.5	
		1-7	20.3	10.2	81.71	2.30	9.3	
		1-8	20.3	10.1	80.12	2.30	9.1	
2	M-155	2-5	20.4	10.2	81.71	2.45	9.8	9.6
		2-6	20.3	10.2	81.71	2.50	10.1	
		2-7	20.4	10.1	80.12	2.22	8.7	
		2-8	20.3	10.2	81.71	2.45	9.9	
3	M-156	3-5	20.5	10.1	80.12	2.95	11.5	11.5
		3-6	20.5	10.2	81.71	3.02	12.0	
		3-7	20.5	10.3	83.32	2.70	11.0	
		3-8	20.3	10.2	81.71	2.85	11.5	
4	M-153	4-5	20.3	10.2	81.71	1.70	6.8	7.2
		4-6	20.4	10.3	83.32	1.70	6.9	
		4-7	20.4	10.1	80.12	1.90	7.5	
		4-8	20.3	10.3	83.32	1.80	7.4	
5	M-153 B	5-5	20.3	10.3	83.32	2.35	9.6	9.8
		5-6	20.4	10.0	78.54	2.85	11.0	
		5-7	20.3	10.2	81.71	2.30	9.3	
		5-8	20.2	10.1	80.12	2.37	9.4	
6	M-158	6-5	20.4	10.1	80.12	1.40	5.5	5.7
		6-6	20.3	10.2	81.71	1.38	5.6	
		6-7	20.3	10.2	81.71	1.55	6.2	
		6-8	20.3	10.1	80.12	1.40	5.5	
7	M-157	7-5	20.2	10.2	81.71	1.60	6.5	6.4
		7-6	20.2	10.0	78.54	1.58	6.1	
		7-7	20.3	10.2	81.71	1.58	6.4	
		7-8	20.3	10.2	81.71	1.60	6.4	



**Tabla 8.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 28 días de edad – Cementera A.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 28 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) (p) K $\Omega$ .cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
1	M-151	1-3	20.3	10.15	80.91	6.32	25.2	30.6
		1-4	20.2	10.15	80.91	5.90	23.6	
		1-7	20.3	10.20	81.71	6.10	24.6	
		1-8	20.3	10.10	80.12	6.42	25.3	
		1-9	20.2	10.30	83.32	9.70	40.0	
		1-10	20.2	10.25	82.52	10.99	44.9	
2	M-155	2-3	20.1	10.10	80.12	5.75	22.9	28.4
		2-4	20.2	10.10	80.12	6.70	26.6	
		2-7	20.4	10.10	80.12	6.02	23.6	
		2-8	20.3	10.20	81.71	6.45	26.0	
		2-9	20.4	10.20	81.71	9.48	38.0	
		2-10	20.5	10.10	80.12	8.51	33.3	
3	M-156	3-3	20.3	10.10	80.12	6.40	25.3	30.8
		3-4	20.1	10.10	80.12	6.40	25.5	
		3-7	20.5	10.30	83.32	7.30	29.7	
		3-8	20.3	10.20	81.71	7.32	29.5	
		3-9	20.4	10.00	78.54	8.91	34.3	
		3-10	20.4	10.10	80.12	10.34	40.6	
4	M-153	4-1	20.4	10.10	80.12	4.90	19.2	24.7
		4-2	20.2	10.10	80.12	4.98	19.8	
		4-5	20.3	10.20	81.71	5.80	23.3	
		4-6	20.4	10.30	83.32	5.95	24.3	
		4-9	20.6	10.20	81.71	8.11	32.2	
		4-10	20.5	10.3	83.32	7.25	29.5	
5	M-153 B	5-3	20.2	10.15	80.91	6.55	26.2	32.3
		5-4	20.2	10.05	79.33	6.80	26.8	
		5-5	20.3	10.30	83.32	7.10	29.1	
		5-7	20.3	10.20	81.71	7.50	30.2	
		5-9	20.3	10.20	81.71	10.10	40.7	
		5-10	20.6	10.30	83.32	10.13	41.0	



Resistividad ( $\rho$ ) a los 28 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área ( $\text{cm}^2$ )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) ( $\rho$ ) $\text{K}\Omega.\text{cm}$
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re ( $\text{K}\Omega$ )	( $\rho$ ) $\text{K}\Omega.\text{cm}$	
6	M-158	6-2	20.1	10.30	83.32	4.70	19.5	23.1
		6-4	20.4	10.02	78.85	4.80	18.6	
		6-5	20.4	10.10	80.12	5.30	20.8	
		6-6	20.3	10.20	81.71	5.35	21.5	
		6-9	20.3	10.30	83.32	7.48	30.7	
		6-10	20.2	10.3	83.32	6.59	27.2	
7	M-157	7-3	20.3	10.15	80.91	5.20	20.8	25.3
		7-4	20.2	10.05	79.33	4.65	18.3	
		7-5	20.2	10.20	81.71	6.04	24.4	
		7-6	20.2	10.00	78.54	6.06	23.6	
		7-9	20.3	10.20	81.71	7.98	32.1	
		7-10	20.2	10.15	80.91	8.11	32.5	



**Tabla 9.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 56 días de edad – Cementera A.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 56 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área ( $\text{cm}^2$ )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) ( $\rho$ ) $\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re ( $\text{K}\Omega$ )	( $\rho$ ) $\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$	
1	M-151	1-3	20.30	10.15	80.91	8.78	35.0	44.6
		1-4	20.20	10.15	80.91	8.18	32.8	
		1-7	20.30	10.20	81.71	8.60	34.6	
		1-8	20.30	10.10	80.12	8.99	35.5	
		1-11	20.30	10.25	82.52	16.00	65.0	
		1-12	20.30	10.20	81.71	16.00	64.4	
2	M-155	2-3	20.10	10.10	80.12	8.47	33.8	42.0
		2-4	20.20	10.10	80.12	9.23	36.6	
		2-7	20.40	10.10	80.12	8.73	34.3	
		2-8	20.30	10.20	81.71	8.80	35.4	
		2-11	20.30	10.15	80.91	14.20	56.6	
		2-12	20.40	10.15	80.91	14.00	55.5	
3	M-156	3-3	20.30	10.10	80.12	9.99	39.4	49.9
		3-4	20.10	10.10	80.12	9.48	37.8	
		3-7	20.50	10.30	83.32	12.00	48.8	
		3-8	20.30	10.20	81.71	12.00	48.3	
		3-11	20.30	10.20	81.71	15.60	62.8	
		3-12	20.20	10.20	81.71	15.40	62.3	
4	M-153	4-1	20.40	10.10	80.12	7.80	30.6	37.3
		4-2	20.20	10.10	80.12	8.10	32.1	
		4-5	20.30	10.20	81.71	8.60	34.6	
		4-6	20.40	10.30	83.32	8.80	35.9	
		4-11	20.30	10.00	78.54	11.00	42.6	
		4-12	20.30	10.15	80.91	12.00	47.8	
5	M-153 B	5-3	20.20	10.15	80.91	8.60	34.4	43.2
		5-4	20.15	10.05	79.33	9.13	35.9	
		5-5	20.30	10.30	83.32	10.42	42.8	
		5-7	20.30	10.20	81.71	9.40	37.8	
		5-11	20.40	10.15	80.91	13.00	51.6	
		5-12	20.30	10.20	81.71	14.00	56.4	



Resistividad ( $\rho$ ) a los 56 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) (K $\Omega$ .cm)
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
6	M-158	6-2	20.10	10.30	83.32	6.45	26.7	32.3
		6-4	20.35	10.02	78.85	7.00	27.1	
		6-5	20.40	10.10	80.12	7.80	30.6	
		6-6	20.30	10.20	81.71	7.70	31.0	
		6-11	20.20	10.15	80.91	9.90	39.7	
		6-12	20.40	10.02	78.85	9.95	38.5	
7	M-157	7-3	20.25	10.15	80.91	7.45	29.8	34.7
		7-4	20.15	10.05	79.33	6.80	26.8	
		7-5	20.20	10.20	81.71	8.90	36.0	
		7-6	20.20	10.00	78.54	8.00	31.1	
		7-11	20.20	10.25	82.52	9.85	40.2	
		7-12	20.35	10.2	81.71	11.00	44.2	



**Tabla 10.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 90 días de edad – Cementera A.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 90 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ )
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm
1	M-151	1-3	20.30	10.15	80.91	12.50	49.82	51.47
		1-4	20.20	10.15	80.91	11.50	46.06	
		1-7	20.30	10.20	81.71	12.00	48.30	
		1-8	20.30	10.10	80.12	12.00	47.36	
		1-13	20.00	10.30	83.32	14.00	58.33	
		1-14	20.10	10.20	81.71	14.50	58.95	
2	M-155	2-3	20.10	10.10	80.12	10.70	42.65	49.49
		2-4	20.20	10.10	80.12	11.50	45.61	
		2-7	20.40	10.10	80.12	11.60	45.56	
		2-8	20.30	10.20	81.71	11.20	45.08	
		2-13	20.10	10.22	82.03	13.80	56.32	
		2-14	20.20	10.22	82.03	15.20	61.73	
3	M-156	3-3	20.30	10.10	80.12	13.30	52.49	56.46
		3-4	20.10	10.10	80.12	13.00	51.82	
		3-7	20.50	10.30	83.32	14.30	58.12	
		3-8	20.30	10.20	81.71	14.00	56.35	
		3-13	20.20	10.25	82.52	15.50	63.32	
		3-14	20.10	10.25	82.52	13.80	56.65	
4	M-153	4-1	20.40	10.10	80.12	12.00	47.13	53.20
		4-2	20.20	10.10	80.12	11.50	45.61	
		4-5	20.30	10.20	81.71	12.50	50.32	
		4-6	20.40	10.30	83.32	12.60	51.46	
		4-13	20.10	10.25	82.52	14.50	59.53	
		4-14	20.50	10.15	80.91	16.50	65.13	
5	M-153 B	5-3	20.20	10.15	80.91	12.50	50.07	59.57
		5-4	20.15	10.05	79.33	13.00	51.18	
		5-5	20.30	10.30	83.32	15.40	63.21	
		5-7	20.30	10.20	81.71	15.00	60.38	
		5-13	20.00	10.50	86.59	15.50	67.11	
		5-14	20.20	10.10	80.12	16.50	65.44	



Resistividad ( $\rho$ ) a los 90 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área ( $\text{cm}^2$ )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) ( $\rho$ ) $\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re ( $\text{K}\Omega$ )	( $\rho$ ) $\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$	
6	M-158	6-2	20.10	10.30	83.32	10.00	41.45	43.97
		6-4	20.35	10.02	78.85	10.00	38.75	
		6-5	20.40	10.10	80.12	11.00	43.20	
		6-6	20.30	10.20	81.71	11.00	44.28	
		6-13	20.00	10.00	78.54	12.00	47.12	
		6-14	20.10	10.1	80.12	12.30	49.03	
7	M-157	7-3	20.25	10.15	80.91	10.05	40.16	45.35
		7-4	20.15	10.05	79.33	9.80	38.58	
		7-5	20.20	10.20	81.71	12.00	48.54	
		7-6	20.20	10.00	78.54	11.40	44.32	
		7-13	20.00	10.15	80.91	12.00	48.55	
		7-14	20.00	10.5	86.59	12.00	51.95	



**Tabla 11.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 120 días de edad – Cementera A.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 120 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) (p) K $\Omega$ .cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
1	M-151	1-3	20.30	10.15	80.91	13.50	53.81	58.65
		1-4	20.20	10.15	80.91	13.20	52.87	
		1-7	20.30	10.20	81.71	13.70	55.15	
		1-8	20.30	10.10	80.12	13.50	53.28	
		1-15	20.20	10.10	80.12	17.40	69.01	
		1-16	20.10	10.10	80.12	17.00	67.76	
2	M-155	2-3	20.10	10.10	80.12	12.50	49.83	54.78
		2-4	20.20	10.10	80.12	13.50	53.54	
		2-7	20.40	10.10	80.12	13.30	52.23	
		2-8	20.30	10.20	81.71	13.00	52.33	
		2-15	20.10	10.10	80.12	15.10	60.19	
		2-16	20.10	10.10	80.12	15.20	60.59	
3	M-156	3-3	20.30	10.10	80.12	16.10	63.54	66.35
		3-4	20.10	10.10	80.12	15.30	60.99	
		3-7	20.50	10.30	83.32	16.30	66.25	
		3-8	20.30	10.20	81.71	16.00	64.40	
		3-15	20.10	10.20	81.71	17.50	71.14	
		3-16	20.10	10.10	80.12	18.00	71.75	
4	M-153	4-1	20.40	10.10	80.12	14.00	54.98	59.85
		4-2	20.20	10.10	80.12	13.80	54.73	
		4-5	20.30	10.20	81.71	14.80	59.57	
		4-6	20.40	10.30	83.32	14.50	59.22	
		4-15	20.10	10.10	80.12	16.60	66.17	
		4-16	20.10	10.15	80.91	16.00	64.41	
5	M-153 B	5-3	20.20	10.15	80.91	13.00	52.07	59.78
		5-4	20.15	10.05	79.33	14.00	55.12	
		5-5	20.30	10.30	83.32	15.40	63.21	
		5-7	20.30	10.20	81.71	16.00	64.40	
		5-15	20.00	10.10	80.12	14.50	58.09	
		5-16	20.10	10.10	80.12	16.50	65.77	



Resistividad ( $\rho$ ) a los 120 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área ( $\text{cm}^2$ )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) ( $\rho$ ) $\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re ( $\text{K}\Omega$ )	( $\rho$ ) $\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$	
6	M-158	6-2	20.10	10.30	83.32	11.00	45.60	44.92
		6-4	20.35	10.02	78.85	11.20	43.40	
		6-5	20.40	10.10	80.12	12.40	48.70	
		6-6	20.30	10.20	81.71	12.00	48.30	
		6-15	20.00	10.00	78.54	10.05	39.47	
		6-16	20.00	10.1	80.12	11.00	44.07	
7	M-157	7-3	20.25	10.15	80.91	12.30	49.15	47.06
		7-4	20.15	10.05	79.33	11.20	44.09	
		7-5	20.20	10.20	81.71	13.20	53.40	
		7-6	20.20	10.00	78.54	10.05	39.08	
		7-15	20.00	10.15	80.91	12.00	48.55	
		7-16	20.00	10.1	80.12	12.00	48.07	

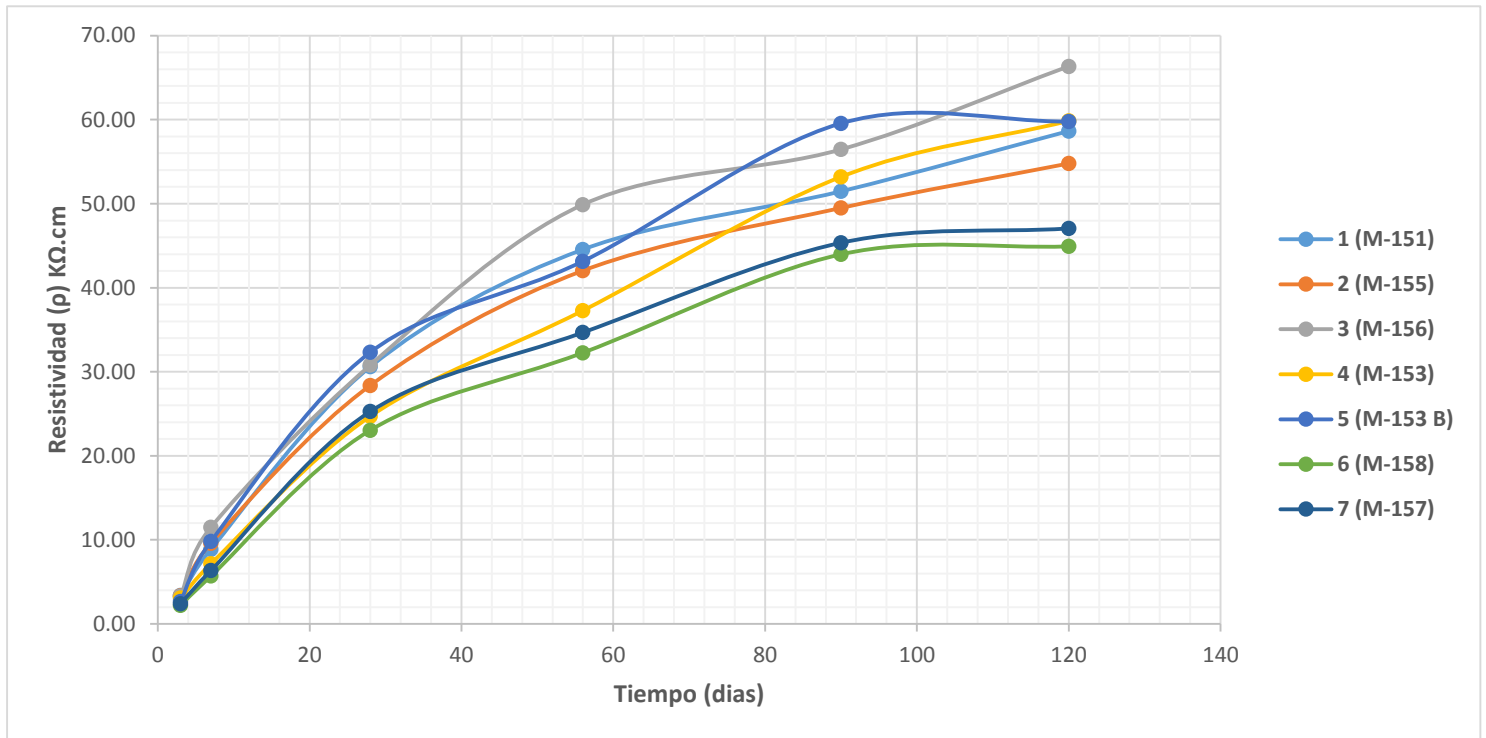
Como se puede observar en las tablas anteriores (Tabla 6 – Tabla 11) de cada mezcla de concreto se obtuvo un valor promedio de la resistividad eléctrica húmeda a los 3, 7, 28, 56, 90 y 120 días. Se muestran los valores promedios concentrados en la siguiente tabla:

Resistividad ( $\rho$ ) $\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$							
Número	Mezcla	Días					
		3	7	28	56	90	120
1	M-151	3.40	8.88	30.60	44.55	51.47	58.65
2	M-155	3.35	9.61	28.39	42.03	49.49	54.78
3	M-156	3.30	11.50	30.80	49.90	56.46	66.35
4	M-153	3.09	7.16	24.71	37.29	53.20	59.85
5	M-153 B	2.67	9.82	32.33	43.15	59.57	59.78
6	M-158	2.22	5.70	23.05	32.27	43.97	44.92
7	M-157	2.41	6.35	25.28	34.68	45.35	47.06

**Tabla 12.** Valores promedios de la resistividad eléctrica húmeda a diferentes edades – Cementera A.



A veces es difícil obtener conclusiones a partir de la información contenida en una tabla, es por ello que se elaboró la gráfica cinco con los valores de la tabla doce, a partir de esta emanar algunas conclusiones, las cuales se mostraran más adelante.



**Gráfica 5.** Valores promedio de la resistividad eléctrica húmeda a diferentes edades – Cementera A.

En la gráfica anterior se observa que la mezcla número 3 (M-156) obtuvo el mayor valor promedio de la resistividad eléctrica húmeda a los 120 días, en contraste la mezcla número 6 (M-158) obtuvo el menor valor promedio de la resistividad eléctrica húmeda.

La resistividad eléctrica húmeda es un indicador de la calidad de la mezcla de concreto, ya que está relacionada con la porosidad, la resistividad al principio del mezclado es muy baja pero, según va hidratándose el cemento y el concreto va fraguando y endureciendo, la resistividad aumenta o mejor dicho la conductividad o capacidad del concreto para conducir agentes agresivos (ion cloruro - paso de las cargas eléctricas) disminuye (Andrade & D’Andrea, 2011), esto se puede observar en la gráfica anterior.

Por consiguiente, la mezcla número 3 (M-156) es la que presenta un mejor desempeño hablando en términos de durabilidad, y lo contrario para la mezcla número 6 (M-158).



Esto se puede explicar debido a que la mezcla número 3 (M-156) presenta un mayor contenido de cemento (425.8 Kg.) con respecto a la mezcla número 6 (M-158) con un contenido de cemento de 360.8 Kg.

Mas sin embargo no es la mezcla que presenta el menor contenido de material cementante. Se puede concluir que el factor más importante para obtener un concreto durable es la cantidad y tipo de cemento además de la relación a/c. El proporcionamiento o composición de la mezcla 6 (M-158) y de la mezcla de concreto número 7 (M-157) son similares, y resulta que ambas obtuvieron los valores promedios de resistividad más bajos durante el tiempo de análisis, inclusive se puede observar que a los 120 días el valor promedio de la resistividad eléctrica húmeda tiende a estabilizarse, el valor de la resistividad se hace constante a partir de los 120 días.

La mezcla número 5 (M-153-B) es la única que presenta una caída o disminución en el valor promedio de la resistividad eléctrica húmeda a partir del día 90. Las mezclas de concreto 3 (M-156), 4 (M-153), 1 (M-151) y 2 (M-155) muestran que el valor promedio de la resistividad eléctrica húmeda seguirá aumentando hasta un valor fijo (un valor constante) del cual no disponemos debido a que no se obtuvieron resultados de resistividad eléctrica húmeda después de los 120 días de análisis.

Las diferentes propiedades que puede desarrollar una mezcla de concreto, hablando en términos de durabilidad, dependerá del diseño de la misma, por ejemplo para bajas relaciones agua/cemento se obtendrán concretos menos porosos y por ende con una mayor resistencia mecánica y una mayor durabilidad.

La resistividad está en función de la hidratación de la mezcla de concreto, es decir, conforme la mezcla se va hidratando el valor de la resistividad eléctrica húmeda aumenta, y por ende la porosidad disminuye, pero ¿Que variación presenta la resistividad eléctrica húmeda con motivo de las reacciones de hidratación del cemento en función del tiempo? ¿Existirá alguna variable que aumente o disminuya esta variación? y ¿Qué efecto tiene esta con respecto al valor inicial de resistividad o conductividad que se obtiene a partir de los 3 días de análisis?

Para responder las preguntas anteriores, introduciremos un nuevo factor denominado “factor edad  $q$ ” que representa el envejecimiento del concreto, es decir, con que variación el concreto adquiere sus propiedades finales (Andrade & Andrea, 2011).

Este factor puede calcularse gráficamente, donde la pendiente del ajuste obtenido al representar el logaritmo de la inversa de la resistividad frente al logaritmo del tiempo, es el valor “ $q$ ” (Andrade & D’Andrea, 2011). Es por ello que para cada mezcla de concreto elaborada se calculó su correspondiente factor edad.

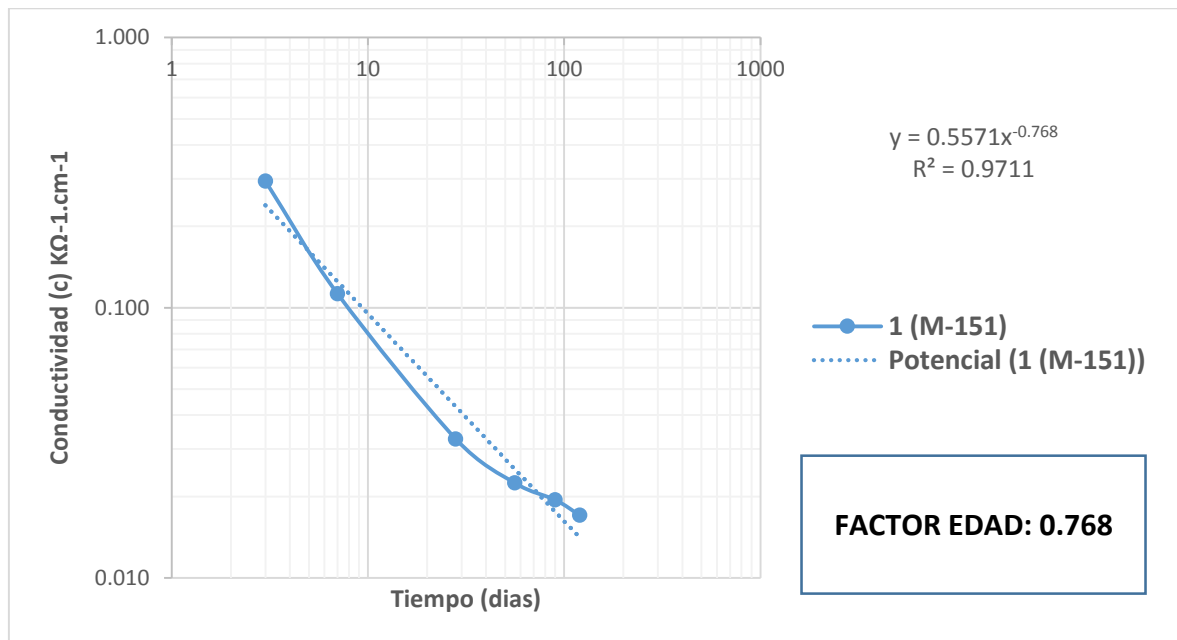


Primeramente se calcularán los valores de conductividad:

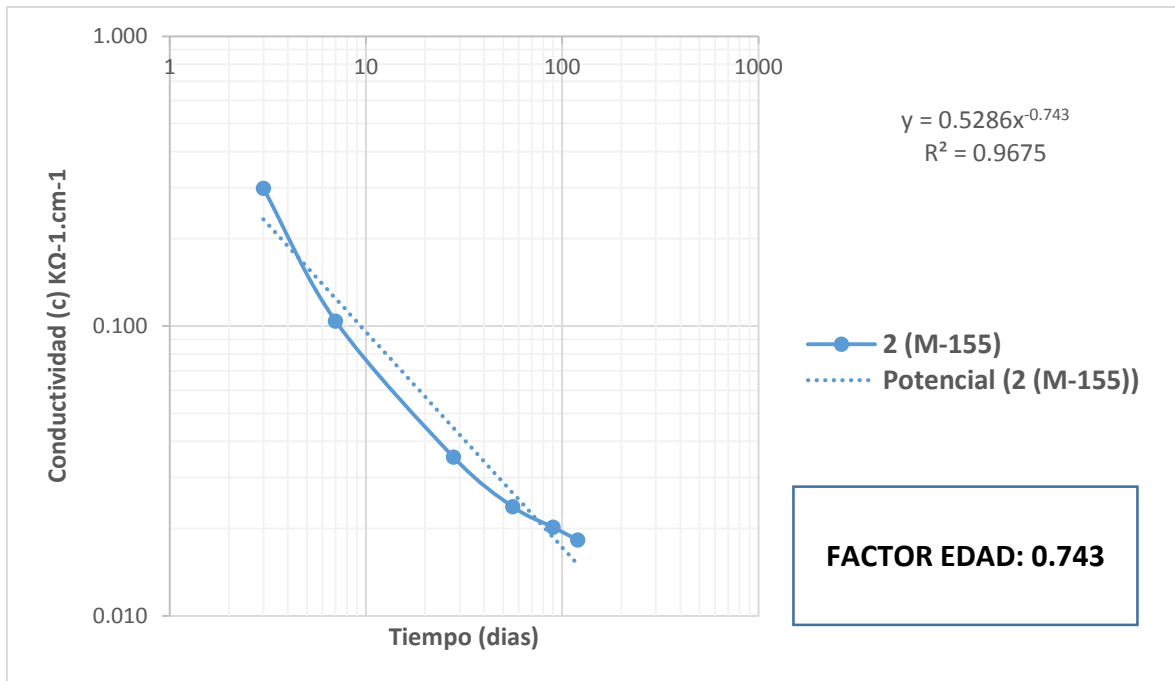
Conductividad (c) $K\Omega^{-1}.cm^{-1}$							
Número	Mezcla	Días					
		3	7	28	56	90	120
1	M-151	0.294	0.113	0.033	0.022	0.019	0.017
2	M-155	0.299	0.104	0.035	0.024	0.020	0.018
3	M-156	0.303	0.087	0.032	0.020	0.018	0.015
4	M-153	0.324	0.140	0.040	0.027	0.019	0.017
5	M-153 B	0.374	0.102	0.031	0.023	0.017	0.017
6	M-158	0.451	0.175	0.043	0.031	0.023	0.022
7	M-157	0.415	0.157	0.040	0.029	0.022	0.021

**Tabla 13.** Valores promedios de la conductividad a diferentes edades – Cementera A.

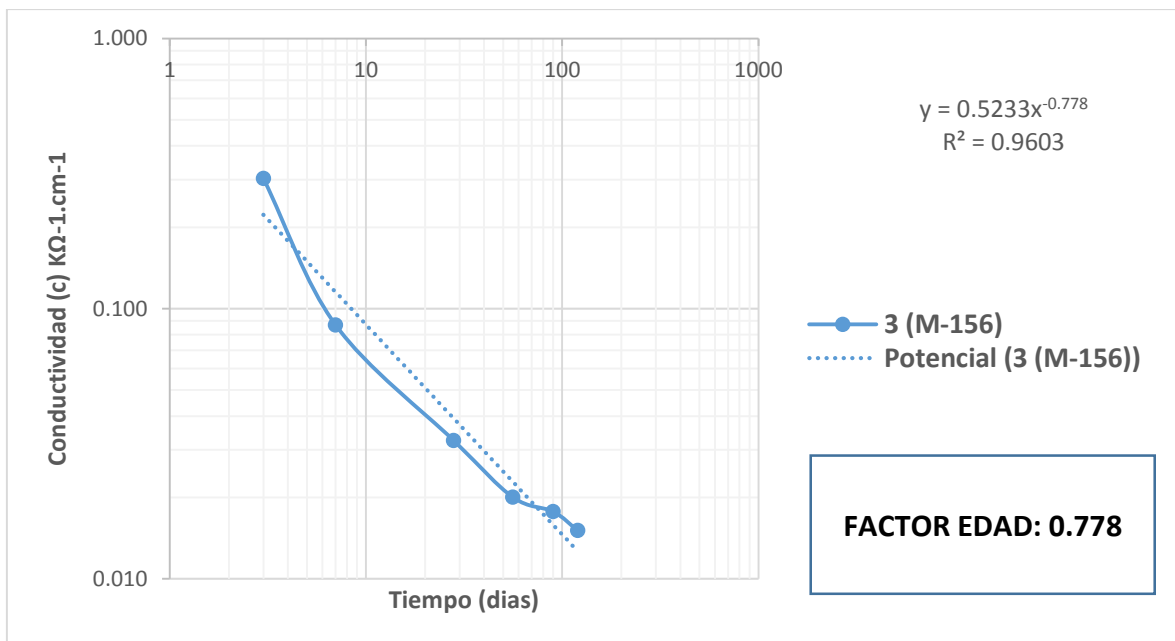
El factor edad y su correspondiente gráfica de cada una de las siete mezclas de concreto se muestran a continuación:



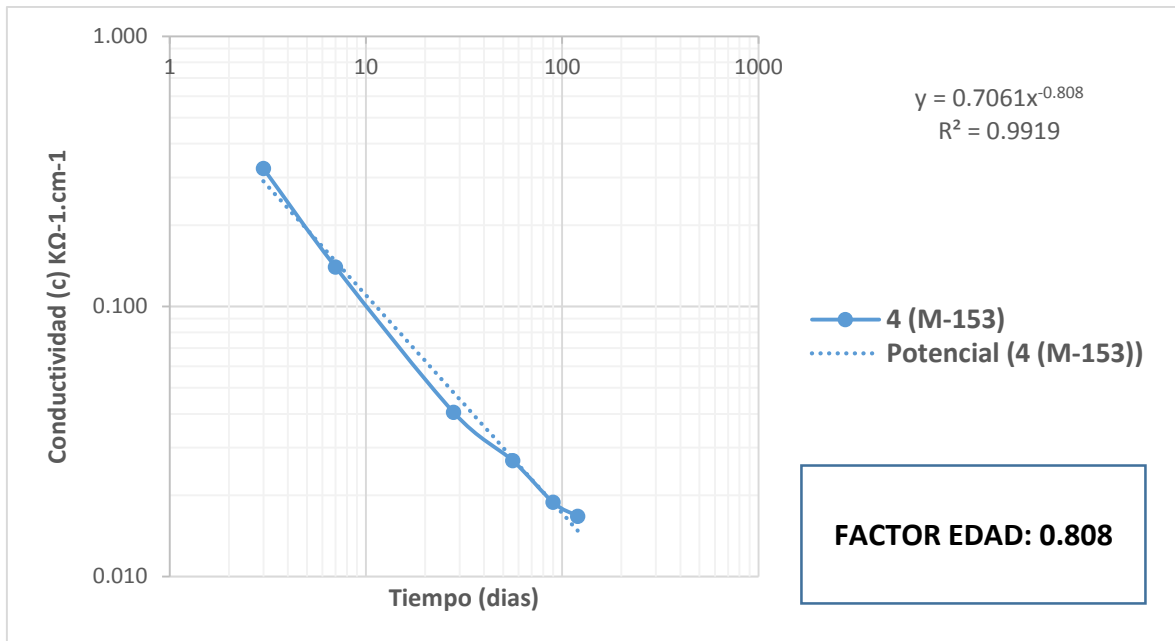
**Gráfica 6.** Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 1 (M-151).



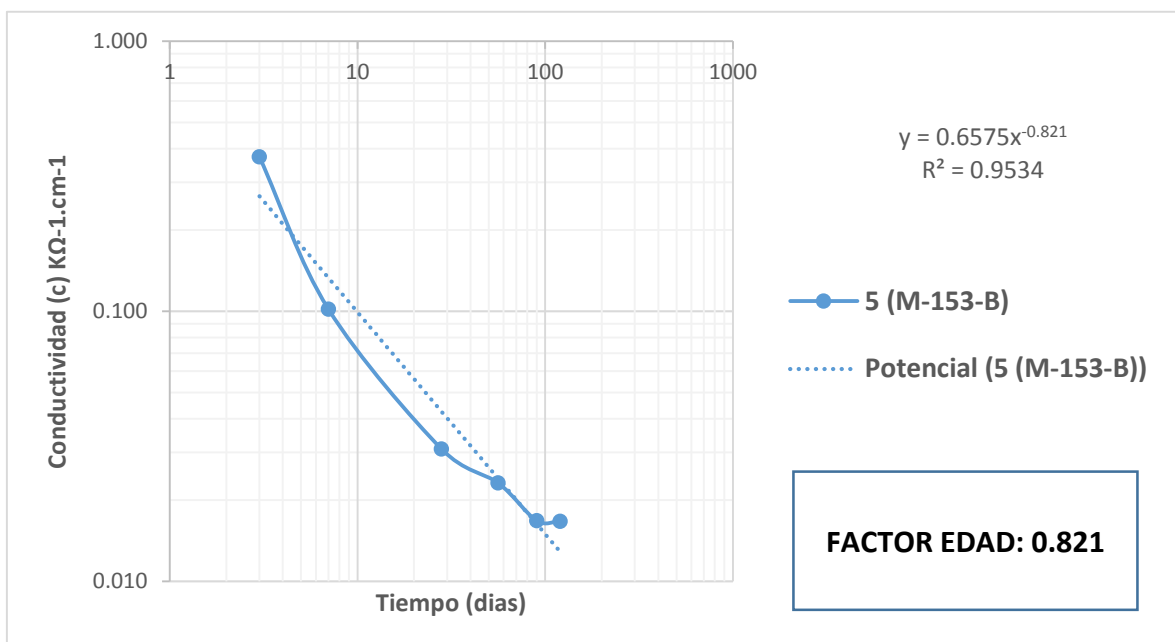
**Gráfica 7.** Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 2 (M-155).



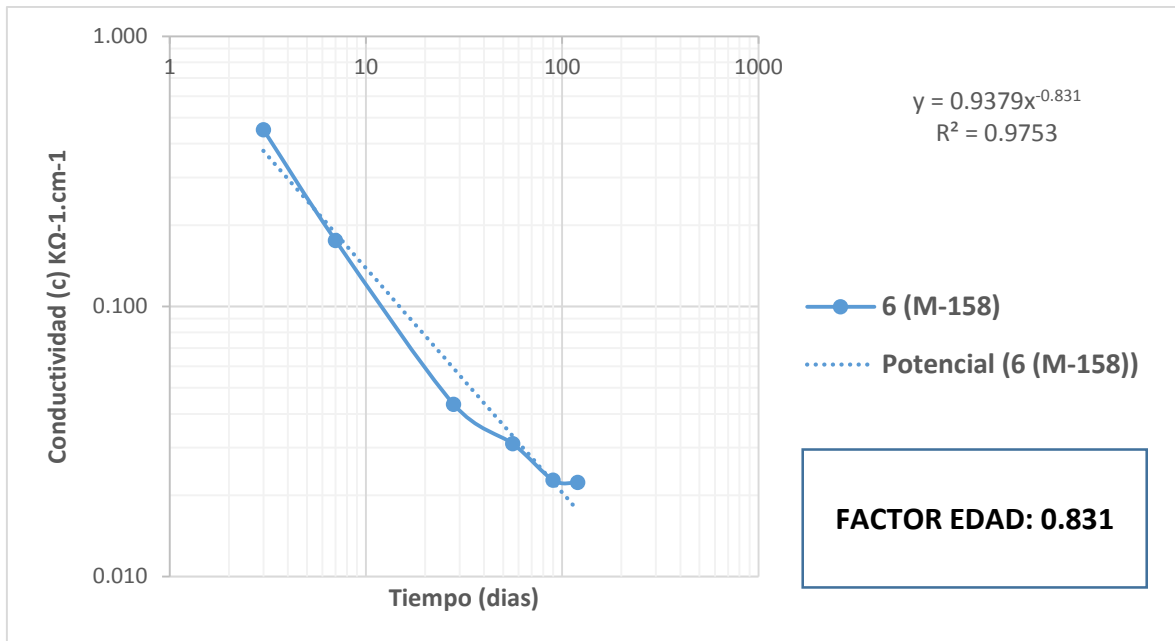
**Gráfica 8.** Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 3 (M-156).



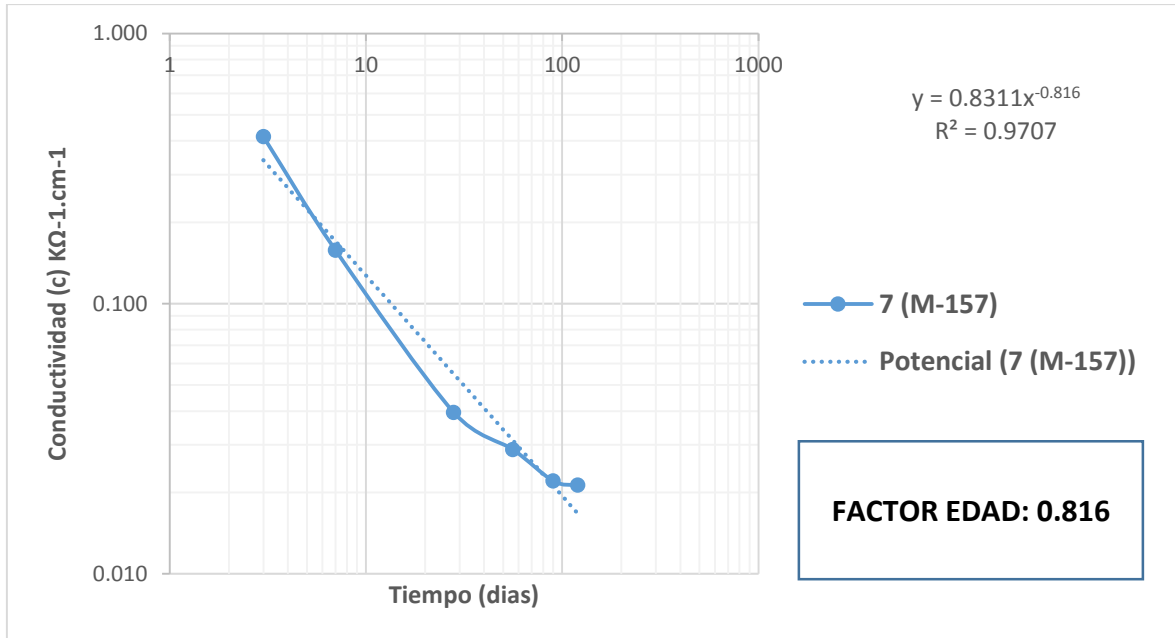
**Gráfica 9.** Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 4 (M-153).



**Gráfica 10.** Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 5 (M-153-B).



**Gráfica 11.** Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 6 (M-158).



**Gráfica 12.** Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 7 (M-157).

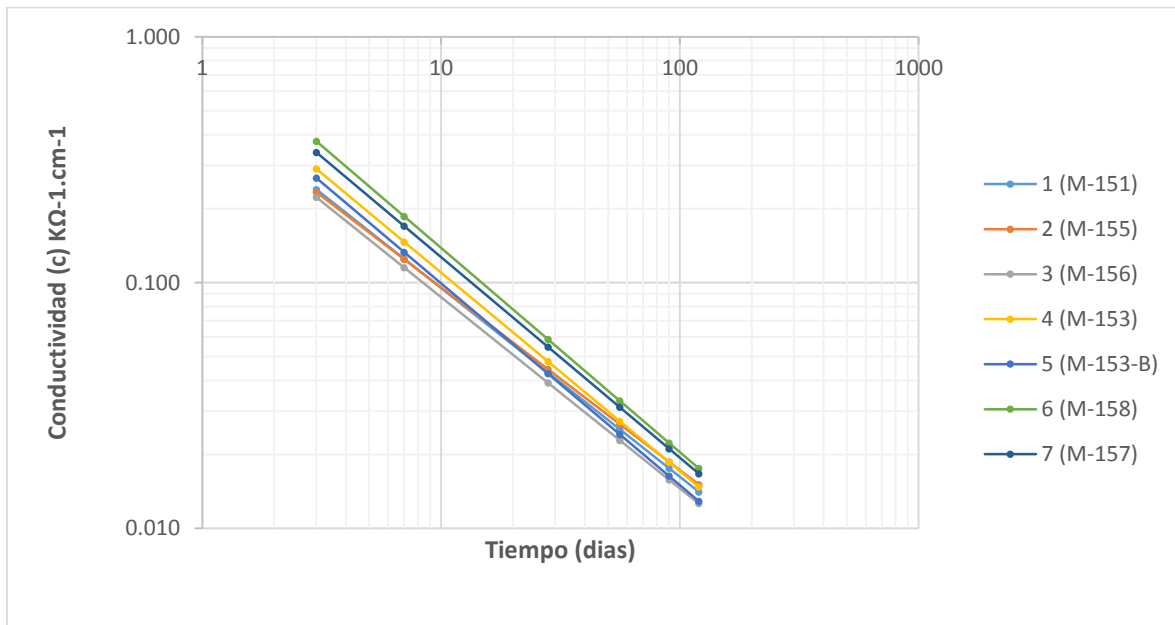


En la siguiente tabla se muestran los valores de la conductividad obtenidos a partir de la ecuación que se genera del ajuste potencial:

Conductividad (c) $K\Omega^{-1}.cm^{-1}$								
Número	Mezcla	Ecuación	Días					
			3	7	28	56	90	120
1	M-151	$0.5571x^{-0.768}$	0.240	0.125	0.043	0.025	0.018	0.014
2	M-155	$0.5286x^{-0.743}$	0.234	0.125	0.044	0.027	0.019	0.015
3	M-156	$0.5233x^{-0.778}$	0.223	0.115	0.039	0.023	0.016	0.013
4	M-153	$0.7061x^{-0.808}$	0.291	0.147	0.048	0.027	0.019	0.015
5	M-153 B	$0.6575x^{-0.821}$	0.267	0.133	0.043	0.024	0.016	0.013
6	M-158	$0.9379x^{-0.831}$	0.376	0.186	0.059	0.033	0.022	0.018
7	M-157	$0.8311x^{-0.816}$	0.339	0.170	0.055	0.031	0.021	0.017

**Tabla 14.** Valores promedios de la conductividad obtenidos a partir de la ecuación generada del ajuste potencial.

Para poder observar la tendencia lineal (escala logarítmica) o pendiente de cada una de las 7 mezclas de concreto (en términos de la conductividad) se presenta el siguiente gráfico, el cual fue generado a partir de los valores contenidos en la tabla catorce.

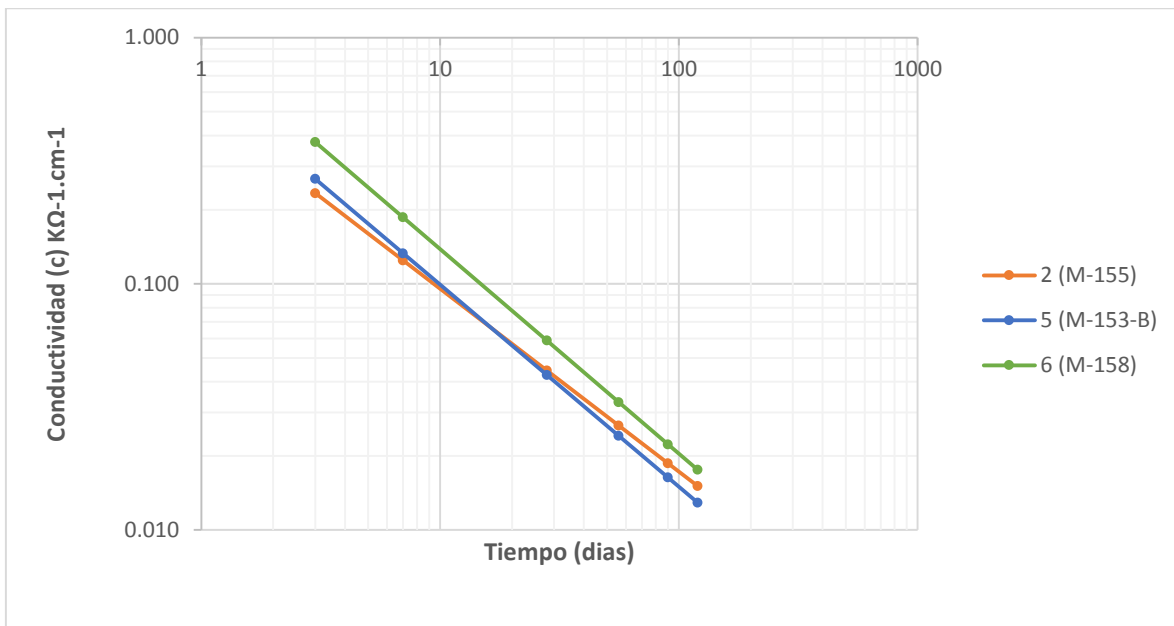


**Gráfica 13.** Tendencia lineal de la conductividad (escala logarítmica) – Cementera A.



En la gráfica trece (Conductividad vs. tiempo) se observa que la mezcla con un menor valor en términos de conductividad a los 3 días de análisis es la mezcla número 3 (M-156) y por el contrario la mezcla con el mayor valor de conductividad es la mezcla número 6 (M-158), esto era de esperarse de acuerdo al análisis que se realizó con base en la gráfica cinco (en términos de la resistividad eléctrica húmeda).

El valor de la conductividad decrece con el tiempo, pero, ¿Estos decrementos o mejor dicho, la pendiente de cada una de las rectas de la gráfica trece son iguales para las 7 mezclas de concreto analizadas?, a simple vista se podría decir que las 7 presentan una pendiente similar, lo cual no es así, es por ello que a continuación se presentan algunas gráficas para poder observar con más detalle a este fenómeno.

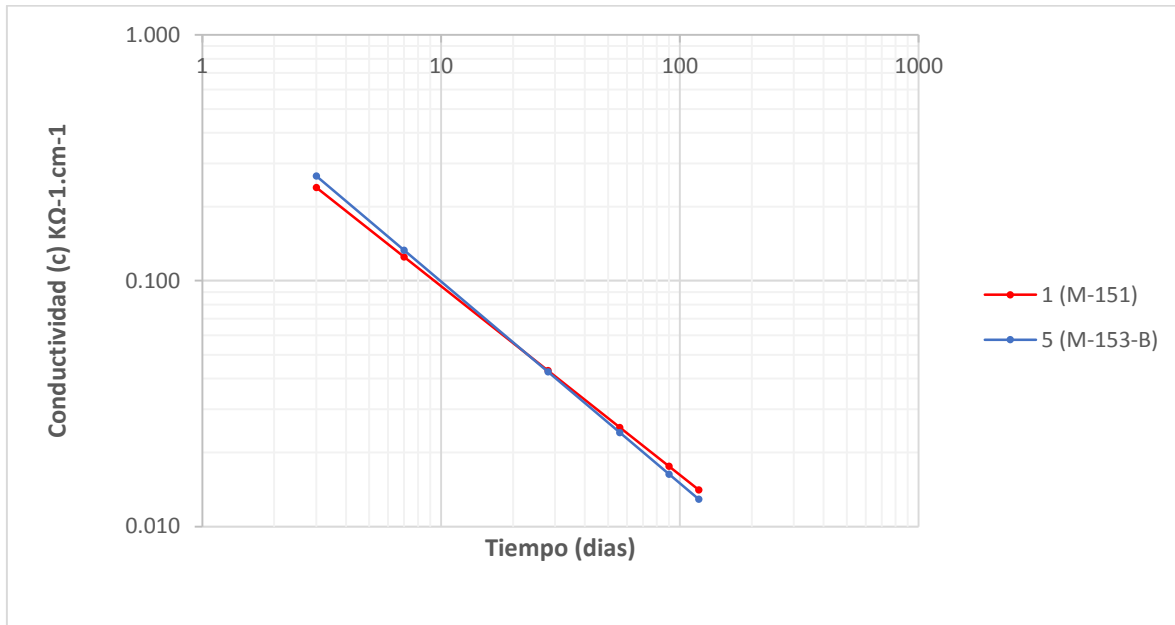


**Gráfica 14.** Tendencia lineal de la conductividad (escala logarítmica) mezclas 2, 5 y 6 – Cementera A.

En la gráfica anterior se observa un fenómeno muy curioso, la mezcla de concreto número 2 (M-155) presenta un menor valor de conductividad a los 3 días de análisis con respecto a la mezcla número 5 (M-153-B), más sin embargo a los 120 días de análisis quien ahora presenta un menor valor de conductividad es la mezcla de concreto número 5 (M-153-B), lo cual significa que la pendiente de la recta (escala logarítmica) de la mezcla número 5 (M-153-B) es mayor que la pendiente que presenta la recta de la mezcla de concreto número 2 (M-155).



Otro caso similar se presenta a continuación:



**Gráfica 15.** Tendencia lineal de la conductividad (escala logarítmica) mezclas 1 y 5 – Cementera A.

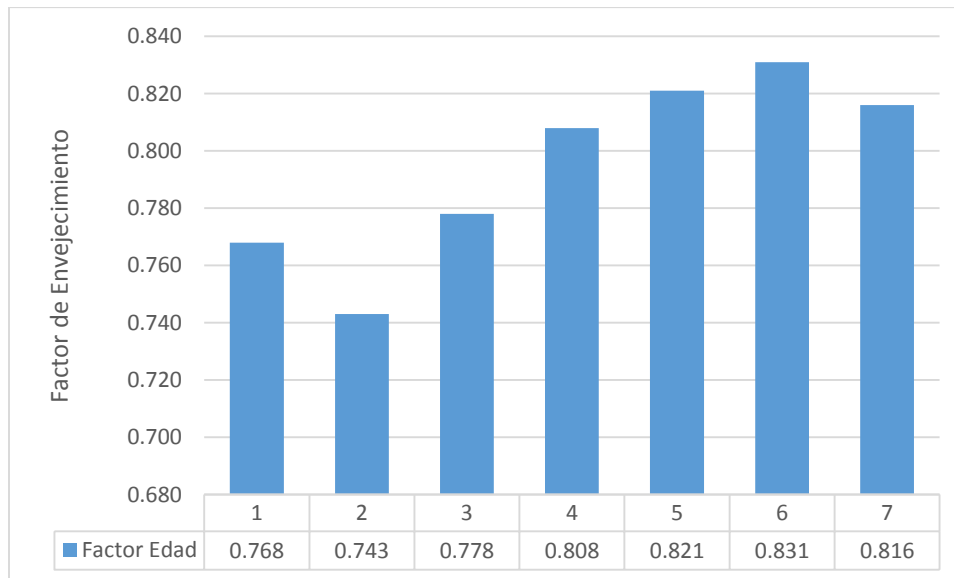
La mezcla de concreto número 1 (M-151) presenta un menor valor de conductividad a los 3 días de análisis con respecto a la mezcla número 5 (M-153-B), más sin embargo, a los 120 días de análisis quien ahora presenta un menor valor de conductividad es la mezcla de concreto número 5 (M-153-B), lo cual significa que la pendiente de la recta (escala logarítmica) de la mezcla número 5 (M-153-B) es mayor con respecto a la pendiente que presenta la recta de la mezcla de concreto número 1 (M-151).

Acabamos de comprobar que cada una de las 7 mezclas de concreto presenta un valor diferente en cuanto a la pendiente de la línea recta (escala logarítmica), ¿Cómo demostrar numéricamente esto?, para ello nos apoyaremos del factor edad “q”, el cual se presenta en la siguiente tabla y gráfica.



Conductividad (c) $K\Omega^{-1}.cm^{-1}$				
Número	Mezcla	Días		Factor Edad
		3	120	
1	M-151	0.2942	0.0171	<b>0.768</b>
2	M-155	0.2986	0.0183	<b>0.743</b>
3	M-156	0.3032	0.0151	<b>0.778</b>
4	M-153	0.3239	0.0167	<b>0.808</b>
5	M-153 B	0.3739	0.0167	<b>0.821</b>
6	M-158	0.4509	0.0223	<b>0.831</b>
7	M-157	0.4147	0.0213	<b>0.816</b>

**Tabla 15.** Valores de la conductividad a los 3 y 120 días de análisis así como su correspondiente factor edad – Cementera A.



**Gráfica 16.** Valores del factor edad “q” – Cementera A.

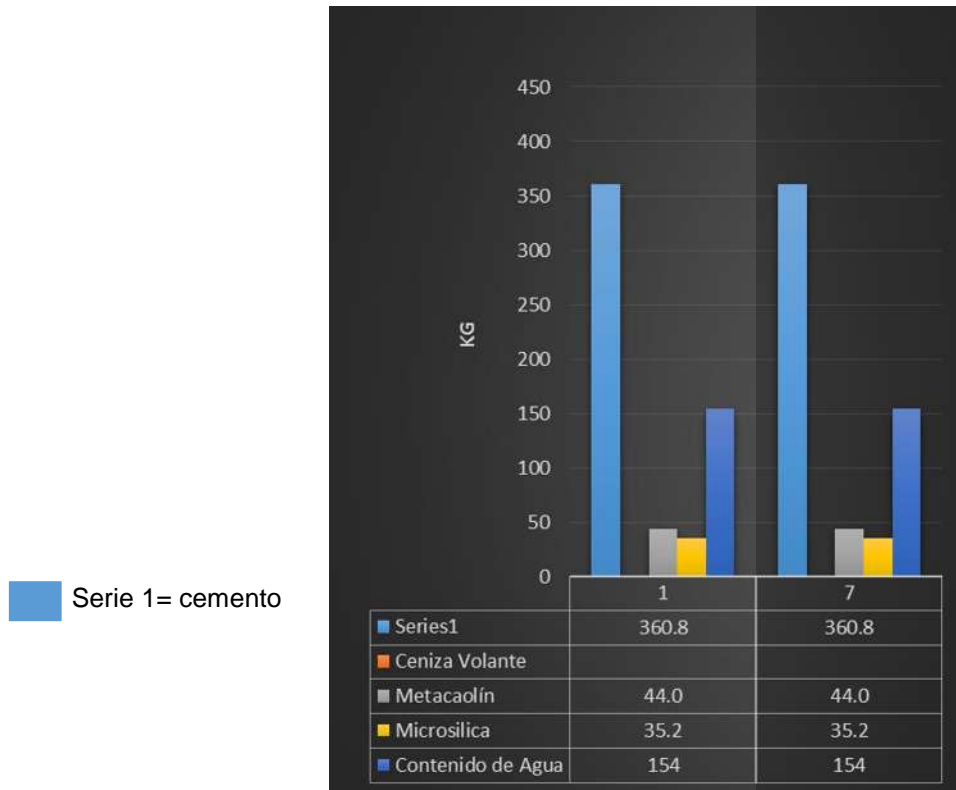


El factor edad como lo habíamos mencionado con anterioridad representa el envejecimiento o el proceso de hidratación del concreto con respecto al tiempo, lo que podemos concluir es lo siguiente: Entre más grande sea el valor del factor edad “q” o la pendiente de la recta (escala logarítmica) sea mayor, el proceso de hidratación es mucho más efectivo, es decir, la estructura interna de la mezcla de concreto se va hidratando de una manera más efectiva reflejándose en los valores de la conductividad.

Ahora, la pregunta sería: ¿Qué variables influyen en el desplazamiento vertical de la recta y en la pendiente de esta?, o de otra manera, ¿A que debemos la variación del valor de “q” y del valor inicial de la conductividad (3 días)?

Las variables que ocasionan este tipo de comportamiento podrían ser diversas, ya que cada una de las 7 mezclas de concreto presenta un diseño o una composición diferente, la variación en los contenidos de cemento, adiciones minerales, relación agua/cemento, tipo de agregado, etc. Influyen en las propiedades finales que el concreto pudiera desarrollar. Mas sin embargo, esto no contesta la pregunta que se planteó con anterioridad, para ello, nos enfocaremos en el análisis de la mezcla de concreto número 1 (M-151) y la número 7 (M-157).

Ambas mezclas de concreto presentan la siguiente información:



**Gráfica 17.** Composición y denominación de las mezclas de concreto 1 y 7 – Cementera A.

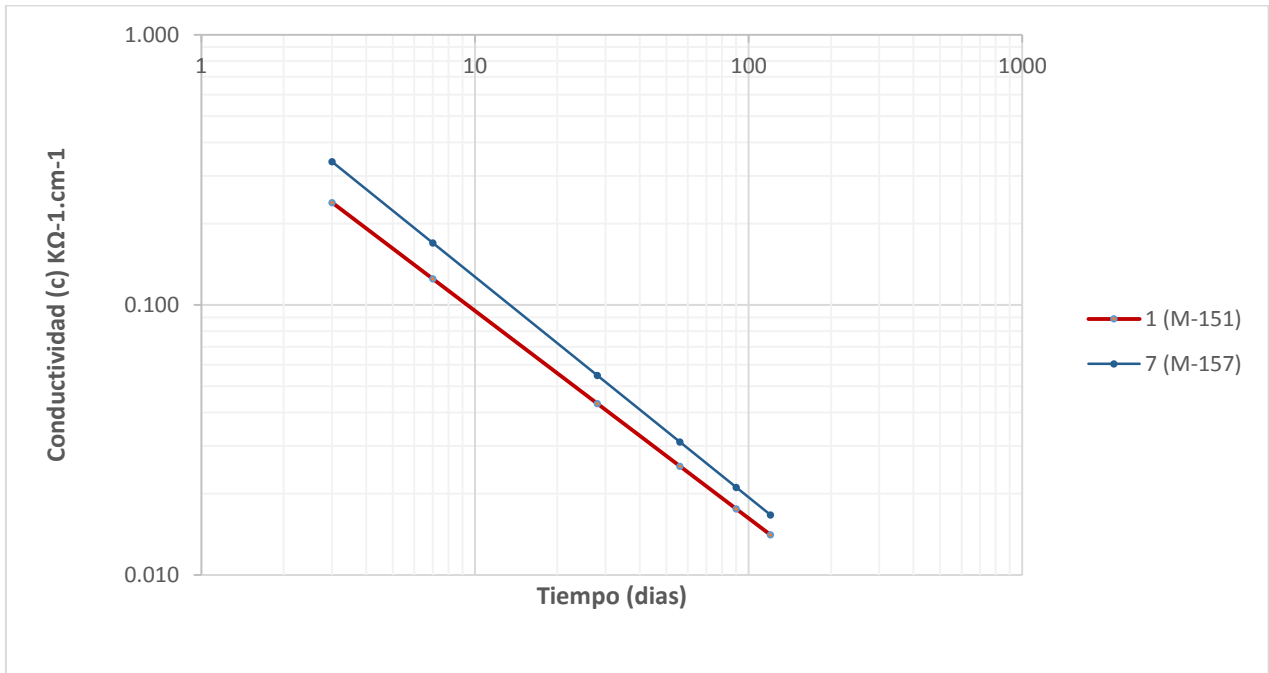


**Tabla 13. Propiedades y denominación de las mezclas de concreto 1 y 7**

Número	ID	Fecha de colado	Denominación	Total de cementantes (Kg)	Cemento (Kg)	Metacaolín (Kg)	Microsilica (Kg)	Agua (l)	Relación a/c	Relación a/tc	Contenido de aire	Revenimiento (cm)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
1	M-151	2017/03/20	M1-1	440.0	360.8	44.0	35.2	154	0.43	0.35	1.9	12.50	2374
7	M-157	2017/03/21	M1-7	440.0	360.8	44.0	35.2	154	0.43	0.35	2.1	13.00	2364

**Tabla 16. Propiedades y denominación de las mezclas de concreto 1 y 7- Cementera A.**

Como se puede observar en la gráfica y tabla anterior la composición de las mezclas es semejante, por lo tanto el comportamiento de estas mezclas debería ser similar, más sin embargo se presenta lo siguiente:



**Gráfica 18. Tendencia lineal de la conductividad (escala logarítmica) mezclas 1 y 7 – Cementera A.**

Ambas presentan un valor de conductividad inicial (3 días) y pendiente diferente, la mezcla de concreto número 1 (M-151) presenta un menor valor en términos de conductividad, y la mezcla de concreto que presenta una mayor pendiente (un factor de edad mayor) es la número 7.

Si analizamos la tabla dieciséis se observa que la única diferencia entre ambas mezclas es el contenido de aire (%), el cual influye (entre otras variables) en el desplazamiento vertical de la recta, y también podría influir en el valor del factor edad “q”.

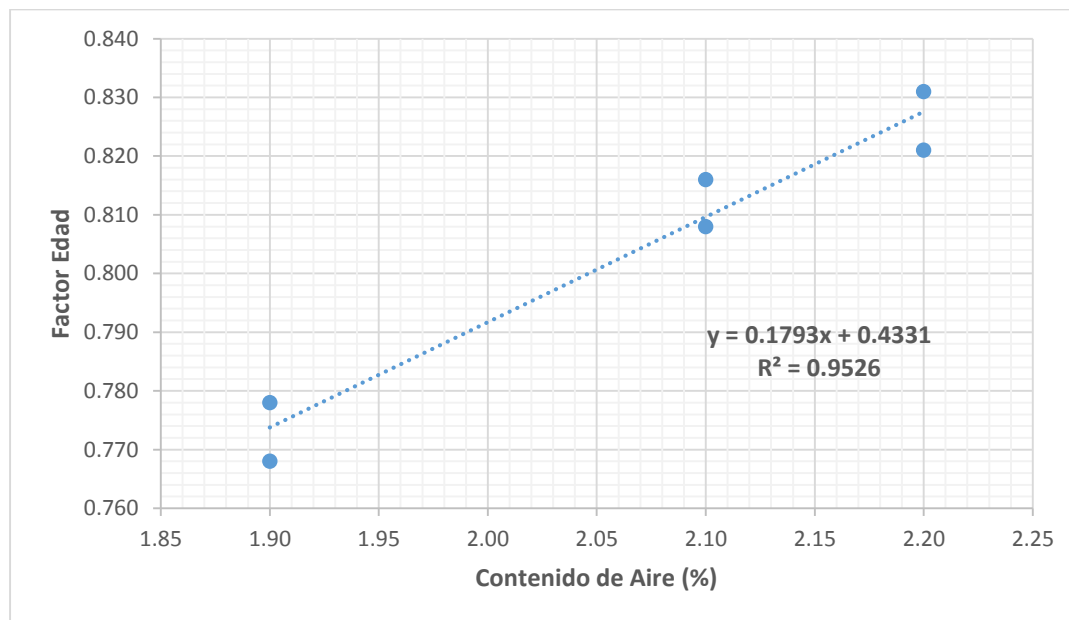


Lo anterior se debe a, cuando se tiene un mayor contenido de aire (%) en la mezcla de concreto la porosidad inicial es mayor (contenido de vacíos más alto), esto se ve reflejado en el valor inicial de la conductividad, mas sin embargo, durante el proceso de curado de la mezcla de concreto un contenido de vacíos alto permite un mejor proceso de hidratación (influencia en el factor edad “q”).

Esto nos lleva a enunciar lo siguiente: Existe una estrecha relación entre el contenido de aire (%) de una mezcla de concreto y su correspondiente valor del factor edad “q” así como también del valor inicial de la conductividad. Un mayor valor del factor edad “q” se traduce en la disminución de la porosidad de manera más efectiva a lo largo del tiempo, más sin embargo, altos contenidos de aire (%) generan concretos más permeables a los agentes agresivos. Lo anterior se presenta en la siguiente tabla y gráfica:

Número	ID	Fecha de colado	Denominación	Contenido de aire	Factor Edad
1	M-151	2017/03/20	M1-1	1.90	0.768
3	M-156	2017/03/20	M1-3	1.90	0.778
4	M-153	2017/03/21	M1-4	2.10	0.808
7	M -157	2017/03/21	M1-7	2.10	0.816
5	M-153 -B	2017/03/21	M1-5	2.20	0.821
6	M -158	2017/03/21	M1-6	2.20	0.831

**Tabla 17.** Contenido de aire y factor edad de las mezclas de concreto - Cementera A.



**Gráfica 19.** Relación entre el factor edad y el contenido de aire (%) – Cementera A.



### 3.4.1. Comparativa de los resultados obtenidos con su correspondiente norma de durabilidad.

---

No existe un acuerdo de carácter general entre los diferentes investigadores acerca del nivel límite de resistividad eléctrica por encima del cual el riesgo de corrosión de las armaduras puede ser considerado despreciable. Sin embargo, la práctica ha demostrado que se puede utilizar como criterio general (DURAR, 2000):

Resistividad (k $\Omega$ -cm)	Riesgo de corrosión (RED DURAR)
$\rho > 200$	Bajo
$200 > \rho > 10$	Moderado
$\rho < 10$	Alto

**Tabla 18.** Criterios de evaluación de la resistividad (DURAR, 2000).

De acuerdo al manual de la Red DURAR (2000), la tabla diecinueve muestra el riesgo de daño por corrosión de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera A con base en la resistividad.

Número	Mezcla	Resistividad ( $\rho$ ) k $\Omega$ -cm (Última medición)	Riesgo de de corrosión
1	M-151	58.65	Moderado
2	M-155	54.78	Moderado
3	M-156	66.35	Moderado
4	M-153	59.85	Moderado
5	M-153 B	59.78	Moderado
6	M-158	44.92	Moderado
7	M-157	47.06	Moderado

**Tabla 19.** Riesgo de corrosión de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera A, con base en los criterios de durabilidad establecidos por el manual de la Red DURAR (2000).

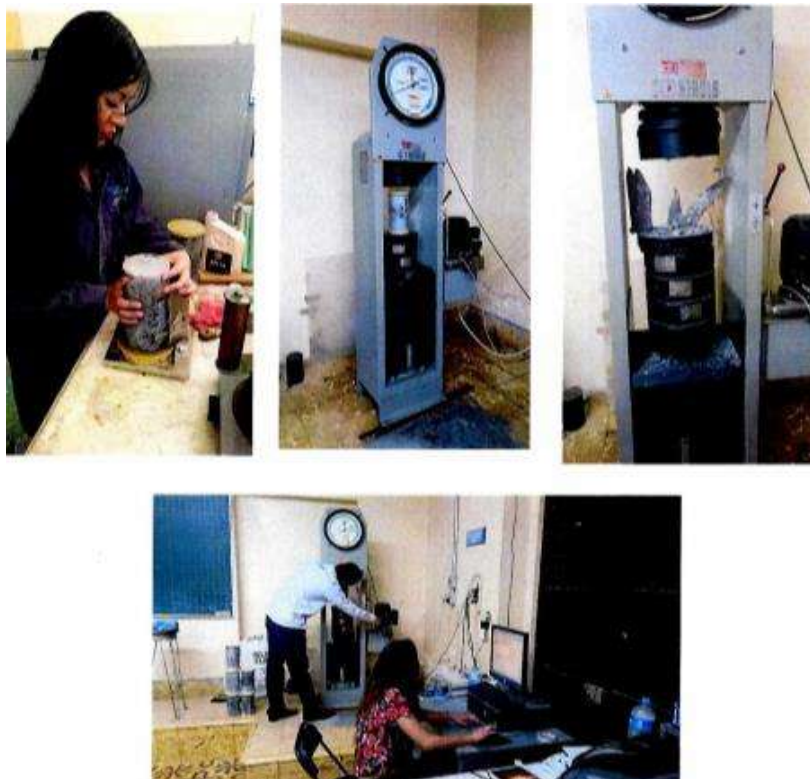


### 3.5. Resistencia a la compresión.

---

La prueba de resistencia mecánica a la compresión directa se realizó en las instalaciones de una universidad de la ciudad de Querétaro, la cual posee un laboratorio de materiales de construcción con una maquina universal calibrada.

Previo a las pruebas de compresión axial, se cabecearon los cilindros con azufre y se esperó un periodo entre 4 y 6 horas para realizar las pruebas. La siguiente ilustración muestra fotografías del procedimiento experimental de esta prueba.



**Ilustración 9.** Evidencia fotográfica de la prueba de resistencia a la compresión axial.

Las pruebas de compresión axial se realizaron a los **3, 7, 28, 56, 90 y 120** días a partir de la elaboración de las mezclas de concreto.



Los resultados de esta prueba se muestran a continuación:

**Tabla 20.** Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 3 días de edad - Cementera A.

Resistencia a la Compresión (f'c) a los 3 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la Compresión		f'c (MPa)
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Fuerza máxima (KN)	f'c (MPa)	
1	M-151	1-1	20.10	10.10	80.12	392.62	50.95	51.25
		1-2	20.30	10.10	80.12	397.17	51.55	
2	M-155	2-1	20.20	10.15	80.91	352.31	45.28	48.72
		2-2	20.15	10.15	80.91	405.90	52.16	
3	M-156	3-1	20.50	10.15	80.91	425.00	54.62	53.53
		3-2	20.20	10.10	80.12	404.00	52.43	
4	M-153	4-3	20.40	10.10	80.12	275.10	35.69	37.69
		4-4	20.30	10.15	80.91	308.90	39.68	
5	M-153 B	5-1	20.30	10.15	80.91	301.50	38.73	38.37
		5-2	20.30	10.10	80.12	292.90	38.00	
6	M-158	6-1	20.60	10.15	80.91	304.60	39.13	42.89
		6-3	20.20	10.15	80.91	363.10	46.65	
7	M-157	7-1	20.10	10.10	80.12	385.60	50.03	47.84
		7-2	20.10	10.10	80.12	351.80	45.64	



**Tabla 21.** Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 7 días de edad - Cementera A.

Resistencia a la Compresión (f'c) a los 7 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la Compresión		f'c (MPa)
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Fuerza máxima (KN)	f'c (MPa)	
1	M-151	1-5	20.8	10.3	83.32	440.50	54.97	59.27
		1-6	20.4	10	78.54	480.13	63.57	
2	M-155	2-5	20.4	10.2	81.71	468.13	59.57	61.03
		2-6	20.3	10.2	81.71	491.00	62.48	
3	M-156	3-5	20.5	10.1	80.12	400.50	51.98	55.88
		3-6	20.5	10.2	81.71	469.80	59.78	
4	M-153	4-7	20.4	10.1	80.12	380.50	49.38	51.13
		4-8	20.3	10.3	83.32	423.65	52.87	
5	M-153 B	5-6	20.4	10.0	78.54	427.58	56.61	54.40
		5-8	20.2	10.1	80.12	402.08	52.18	
6	M-158	6-7	20.3	10.2	81.71	486.42	61.90	63.66
		6-8	20.3	10.1	80.12	504.07	65.42	
7	M-157	7-7	20.3	10.2	81.71	502.11	63.89	61.77
		7-8	20.3	10.2	81.71	468.77	59.65	



**Tabla 22.** Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 28 días de edad - Cementera A.

Resistencia a la Compresión (f'c) a los 28 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la Compresión		f'c (MPa)
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Fuerza máxima (KN)	f'c (MPa)	
1	M-151	1-9	20.2	10.3	83.32	44320.00	53.15	54.03
		1-10	20.2	10.25	82.52	45780.00	54.91	
2	M-155	2-9	20.4	10.2	81.71	45550.00	54.62	52.51
		2-10	20.5	10.1	80.12	42010.00	50.40	
3	M-156	3-9	20.4	10	78.54	56230.00	67.47	66.58
		3-10	20.4	10.1	80.12	54760.00	65.70	
4	M-153	4-9	20.6	10.2	81.71	46090.00	55.31	52.43
		4-10	20.5	10.3	83.32	42100.00	49.55	
5	M-153 B	5-9	20.3	10.2	81.71	42970.00	51.57	52.66
		5-10	20.6	10.3	83.32	45670.00	53.75	
6	M-158	6-9	20.3	10.3	83.32	55850.00	65.73	64.17
		6-10	20.2	10.3	83.32	53200.00	62.61	
7	M-157	7-9	20.3	10.2	81.71	56040.00	67.25	66.09
		7-10	20.2	10.2	80.91	53580.00	64.93	



**Tabla 23.** Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 56 días de edad - Cementera A.

Resistencia a la Compresión (f'c) a los 56 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la Compresión		f'c (MPa)
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Fuerza máxima (KN)	f'c (MPa)	
1	M-151	1-11	20.3	10.25	82.52	537.60	65.15	71.57
		1-12	20.3	10.2	81.71	637.20	77.98	
2	M-155	2-11	20.3	10.15	80.91	597.90	73.89	69.49
		2-12	20.4	10.15	80.91	526.70	65.09	
3	M-156	3-11	20.3	10.2	81.71	649.10	79.44	80.07
		3-12	20.2	10.2	81.71	659.40	80.70	
4	M-153	4-11	20.3	10.0	78.54	523.93	66.71	62.55
		4-12	20.3	10.2	80.91	472.44	58.39	
5	M-153 B	5-11	20.4	10.2	80.91	467.56	57.78	57.91
		5-12	20.3	10.2	81.71	474.28	58.04	
6	M-158	6-11	20.1	10.2	80.91	542.07	66.99	67.62
		6-12	20.2	10.0	78.85	538.15	68.25	
7	M-157	7-11	20.2	10.3	82.52	560.46	67.92	66.46
		7-12	20.4	10.2	81.71	531.06	64.99	



**Tabla 24.** Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 90 días de edad - Cementera A.

Resistencia a la Compresión (f'c) a los 90 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la Compresión		f'c (MPa)
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Fuerza máxima (KN)	f'c (MPa)	
1	M-151	1-13	20.0	10.3	83.32	509.56	61.15	64.60
		1-14	20.1	10.2	81.71	556.05	68.05	
2	M-155	2-13	20.1	10.22	82.03	527.12	64.26	67.60
		2-14	20.2	10.22	82.03	582.03	70.95	
3	M-156	3-13	20.2	10.25	82.52	611.06	74.05	74.44
		3-14	20.1	10.25	82.52	617.44	74.83	
4	M-153	4-13	20.1	10.3	82.52	548.30	66.45	65.58
		4-14	20.5	10.2	80.91	523.68	64.72	
5	M-153 B	5-13	20.0	10.5	86.59	476.71	55.05	59.50
		5-14	20.2	10.1	80.12	512.31	63.94	
6	M-158	6-13	20.0	10.0	78.54	549.67	69.99	71.43
		6-14	20.1	10.1	80.12	583.90	72.88	
7	M-157	7-13	20.0	10.2	80.91	574.97	71.06	66.11
		7-14	20.0	10.5	86.59	529.57	61.16	



**Tabla 25.** Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 120 días de edad - Cementera A.

Resistencia a la Compresión (f'c) a los 120 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la Compresión		f'c (MPa)
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Fuerza máxima (KN)	f'c (MPa)	
1	M-151	1-15	20.2	10.1	80.12	624.99	78.01	80.60
		1-16	20.1	10.1	80.12	666.47	83.19	
2	M-155	2-15	20.1	10.1	80.12	576.64	71.97	75.92
		2-16	20.1	10.1	80.12	639.89	79.87	
3	M-156	3-15	20.1	10.2	81.71	612.44	74.95	75.92
		3-16	20.1	10.1	80.12	616.06	76.89	
4	M-153	4-15	20.1	10.1	80.12	586.94	73.26	67.33
		4-16	20.1	10.2	80.91	496.81	61.40	
5	M-153 B	5-15	20.0	10.1	80.12	559.97	69.89	67.36
		5-16	20.1	10.1	80.12	519.37	64.82	
6	M-158	6-15	20.0	10.0	78.54	585.76	74.58	72.63
		6-16	20.0	10.1	80.12	566.34	70.69	
7	M-157	7-15	20.0	10.2	80.91	651.17	80.48	78.64
		7-16	20.0	10.1	80.12	615.38	76.81	

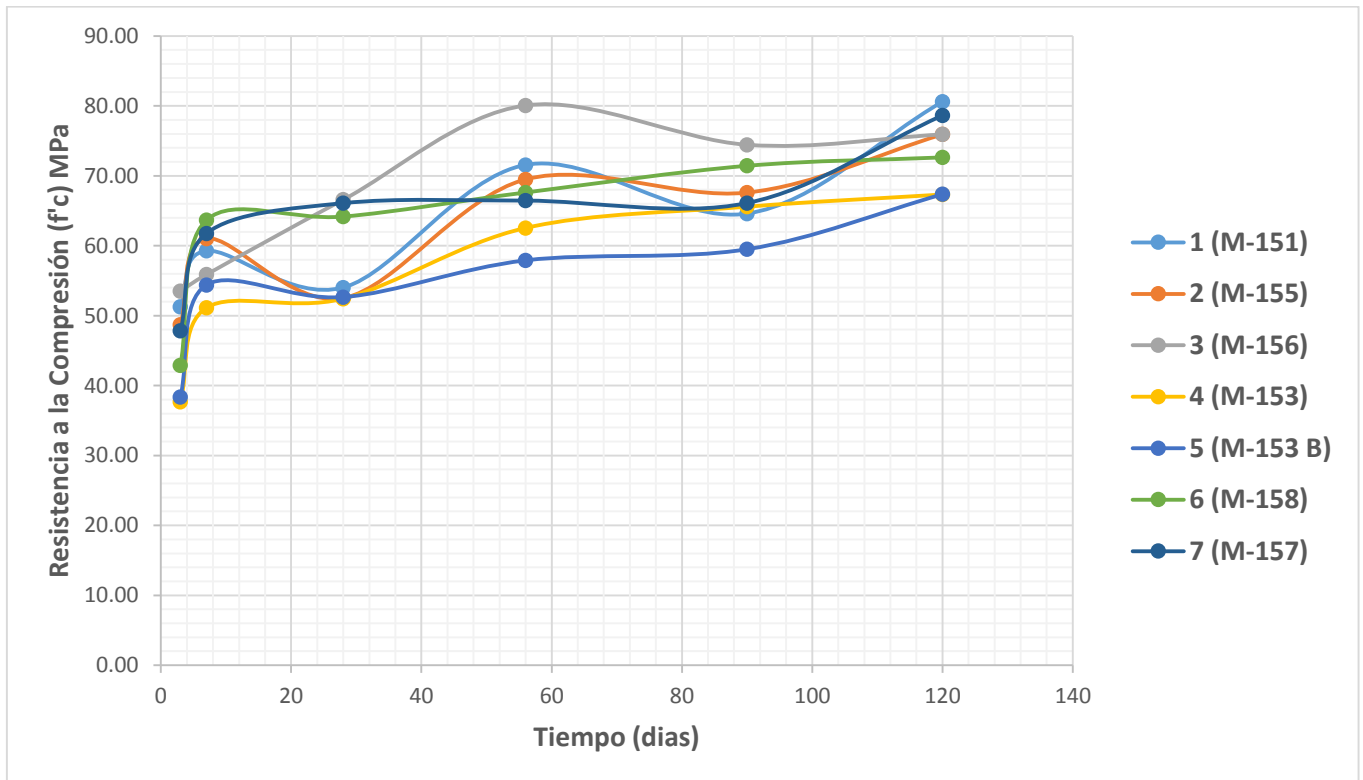
Se obtuvo un valor promedio de las pruebas de compresión axial realizadas a cada una de la mezclas de concreto elaboradas por la “Cementera A” a los 3, 7, 28, 56, 90 y 120 días. En la tabla veintiséis se muestran los valores promedios obtenidos:



Resistencia a la Compresión - $f'c$ (MPa)							
Número	Mezcla	Días					
		3	7	28	56	90	120
1	M-151	51.25	59.27	54.03	71.57	64.60	80.60
2	M-155	48.72	61.03	52.51	69.49	67.60	75.92
3	M-156	53.53	55.88	66.58	80.07	74.44	75.92
4	M-153	37.69	51.13	52.43	62.55	65.58	67.33
5	M-153 B	38.37	54.40	52.66	57.91	59.50	67.36
6	M-158	42.89	63.66	64.17	67.62	71.43	72.63
7	M-157	47.84	61.77	66.09	66.46	66.11	78.64

**Tabla 26.** Valores promedios de la prueba de resistencia mecánica en compresión simple a diferentes edades – Cementera A.

Con base en los valores contenidos en la tabla veintiséis se elaboró la gráfica veinte, en la cual podemos observar el comportamiento o evolución de la resistencia a compresión axial a través del tiempo de cada una de las mezclas elaboradas.



**Gráfica 20.** Valores promedios de la prueba mecánica de compresión simple a diferentes edades – Cementera A.



### 3.5.1. Comparativa de los resultados obtenidos con su correspondiente norma de durabilidad.

El criterio de evaluación de los resultados de la prueba de compresión simple se lleva a cabo con base en (DURAR, 2000):

- Con base en el diseño estructural:* El valor del  $f'c$  obtenido en la prueba de compresión simple debe ser mayor o igual a la resistencia a la compresión característica del concreto especificada en el diseño estructural.
- En base a la durabilidad:* El valor de la resistencia mecánica, por sí solo, no es indicativo de la durabilidad del hormigón, ya que dependerá de varios factores entre los cuales se puede mencionar: la relación  $a/c$ , la dosificación, el tipo de cemento, el espesor de recubrimiento de la armadura, etc. Sin embargo, en general se acepta lo siguiente:

Resistencia a la compresión (MPa)	Calidad del concreto (RED DURAR)
$f'c > 45$	Durable
$f'c < 20$	Baja durabilidad

**Tabla 27.** Criterios de evaluación en función de la resistencia mecánica (DURAR, 2000).

De acuerdo al manual de la Red DURAR (2000), la tabla veintiocho muestra la calidad de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera A con base en la resistencia mecánica.

Número	Mezcla	Resistencia a la compresión ( $f'c$ ) (MPa) (Última medición)	Calidad del concreto
1	M-151	80.60	Durable
2	M-155	75.92	Durable
3	M-156	75.92	Durable
4	M-153	67.33	Durable
5	M-153 B	67.36	Durable
6	M-158	72.63	Durable
7	M-157	78.64	Durable

**Tabla 28.** Calidad de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera A, con base en los criterios de durabilidad establecidos por el manual de la Red DURAR (2000).



### 3.6. Velocidad de pulso ultrasónico.

---

Una vez terminadas las mediciones de resistividad, se procedió a las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico en cada probeta ensayada, los valores que se muestran más adelante son los de cada cilindro medido y el promedio obtenido de cada mezcla. La siguiente ilustración muestra una fotografía del procedimiento experimental de esta prueba.



*Ilustración 10. Evidencia fotográfica de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico.*

Las pruebas de velocidad de pulso ultrasónico se realizaron a los **3, 7, 28, 56, 90 y 120** días a partir de la elaboración de las mezclas de concreto.



Los resultados de esta prueba se muestran a continuación:

**Tabla 29.** Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 3 días de edad – Cementera A.

Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) a los 3 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	VPU		Km/s
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		t (μ seg)	km/s	
1	M-151	1-1	20.1	10.1	80.12	47.20	4.26	4.18
		1-2	20.3	10.1	80.12	47.80	4.25	
		1-3	20.3	10.15	80.91	49.00	4.14	
		1-4	20.2	10.15	80.91	49.80	4.06	
2	M-155	2-1	20.2	10.15	80.91	47.80	4.23	4.21
		2-2	20.2	10.15	80.91	48.20	4.18	
		2-3	20.1	10.1	80.12	48.10	4.18	
		2-4	20.2	10.1	80.12	47.40	4.26	
3	M-156	3-1	20.5	10.15	80.91	48.10	4.26	4.20
		3-2	20.2	10.1	80.12	49.00	4.12	
		3-3	20.3	10.1	80.12	48.00	4.23	
		3-4	20.1	10.1	80.12	48.20	4.17	
4	M-153	4-1	20.4	10.1	80.12	47.30	4.31	4.20
		4-2	20.2	10.1	80.12	48.30	4.18	
		4-3	20.4	10.1	80.12	49.20	4.15	
		4-4	20.3	10.2	80.91	48.80	4.16	
5	M-153 B	5-1	20.3	10.2	80.91	48.40	4.19	4.17
		5-2	20.3	10.1	80.12	49.20	4.13	
		5-3	20.2	10.2	80.91	48.20	4.19	
		5-4	20.2	10.1	79.33	48.50	4.15	
6	M-158	6-1	20.6	10.2	80.91	50.70	4.06	4.07
		6-2	20.1	10.3	83.32	49.00	4.10	
		6-3	20.2	10.2	80.91	50.20	4.02	
		6-4	20.4	10.0	78.85	49.80	4.09	
7	M-157	7-1	20.1	10.1	80.12	47.30	4.25	4.23
		7-2	20.1	10.1	80.12	47.20	4.26	
		7-3	20.3	10.2	80.91	47.80	4.24	
		7-4	20.2	10.1	79.33	48.20	4.18	



**Tabla 30.** Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 7 días de edad – Cementera A.

Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) a los 7 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	VPU		km/s
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		t (μ seg)	km/s	
1	M-151	1-5	20.8	10.3	83.32	47.70	4.36	4.41
		1-6	20.4	10	78.54	45.60	4.47	
		1-7	20.3	10.2	81.71	46.70	4.35	
		1-8	20.3	10.1	80.12	45.40	4.47	
2	M-155	2-5	20.4	10.2	81.71	46.30	4.41	4.40
		2-6	20.3	10.2	81.71	45.70	4.44	
		2-7	20.4	10.1	80.12	47.20	4.32	
		2-8	20.3	10.2	81.71	45.70	4.44	
3	M-156	3-5	20.5	10.1	80.12	47.70	4.30	4.37
		3-6	20.5	10.2	81.71	46.70	4.39	
		3-7	20.5	10.3	83.32	46.80	4.38	
		3-8	20.3	10.2	81.71	46.00	4.41	
4	M-153	4-5	20.3	10.2	81.71	47.00	4.32	4.28
		4-6	20.4	10.3	83.32	48.00	4.25	
		4-7	20.4	10.1	80.12	48.00	4.25	
		4-8	20.3	10.3	83.32	47.00	4.32	
5	M-153 B	5-5	20.3	10.3	83.32	48.20	4.21	4.30
		5-6	20.4	10.0	78.54	48.00	4.25	
		5-7	20.3	10.2	81.71	46.40	4.38	
		5-8	20.2	10.1	80.12	46.40	4.35	
6	M-158	6-5	20.4	10.1	80.12	48.30	4.22	4.22
		6-6	20.3	10.2	81.71	47.20	4.30	
		6-7	20.3	10.2	81.71	48.10	4.22	
		6-8	20.3	10.1	80.12	49.10	4.13	
7	M-157	7-5	20.2	10.2	81.71	46.00	4.39	4.41
		7-6	20.2	10.0	78.54	45.70	4.42	
		7-7	20.3	10.2	81.71	45.40	4.47	
		7-8	20.3	10.2	81.71	46.40	4.38	



**Tabla 31.** Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días de edad – Cementera A.

Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) a los 28 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	VPU		Km/s
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		t (μ seg)	km/s	
1	M-151	1-3	20.3	10.15	80.91	45.70	4.44	4.40
		1-4	20.2	10.15	80.91	46.20	4.37	
		1-7	20.3	10.2	81.71	45.20	4.49	
		1-8	20.3	10.1	80.12	44.70	4.54	
		1-9	20.2	10.3	83.32	49.40	4.09	
		1-10	20.2	10.25	82.52	45.10	4.48	
2	M-155	2-3	20.1	10.1	80.12	45.10	4.46	4.50
		2-4	20.2	10.1	80.12	46.70	4.33	
		2-7	20.4	10.1	80.12	46.20	4.42	
		2-8	20.3	10.2	81.71	46.70	4.35	
		2-9	20.4	10.2	81.71	43.80	4.66	
		2-10	20.5	10.1	80.12	42.90	4.78	
3	M-156	3-3	20.3	10.1	80.12	45.60	4.45	4.46
		3-4	20.1	10.1	80.12	45.30	4.44	
		3-7	20.5	10.3	83.32	46.20	4.44	
		3-8	20.3	10.2	81.71	45.30	4.48	
		3-9	20.4	10	78.54	46.20	4.42	
		3-10	20.4	10.1	80.12	44.70	4.56	
4	M-153	4-1	20.4	10.1	80.12	47.20	4.32	4.35
		4-2	20.2	10.1	80.12	45.70	4.42	
		4-5	20.3	10.2	81.71	45.80	4.43	
		4-6	20.4	10.3	83.32	46.70	4.37	
		4-9	20.6	10.2	81.71	46.20	4.46	
		4-10	20.5	10.3	83.32	49.80	4.12	
5	M-153 B	5-3	20.2	10.2	80.91	45.80	4.41	4.30
		5-4	20.2	10.1	79.33	45.70	4.41	
		5-5	20.3	10.3	83.32	47.70	4.26	
		5-7	20.3	10.2	81.71	47.10	4.31	
		5-9	20.3	10.2	81.71	48.70	4.17	
		5-10	20.6	10.3	83.32	48.20	4.27	
6	M-158	6-2	20.1	10.3	83.32	46.20	4.35	4.38
		6-4	20.4	10.0	78.85	46.30	4.40	
		6-5	20.4	10.1	80.12	46.80	4.36	
		6-6	20.3	10.2	81.71	45.20	4.49	
		6-9	20.3	10.3	83.32	47.00	4.32	
		6-10	20.2	10.3	83.32	46.20	4.37	
7	M-157	7-3	20.3	10.2	80.91	45.70	4.43	4.38
		7-4	20.2	10.1	79.33	44.70	4.51	
		7-5	20.2	10.2	81.71	47.00	4.30	
		7-6	20.2	10.0	78.54	44.70	4.52	
		7-9	20.3	10.2	81.71	47.40	4.28	
		7-10	20.2	10.2	80.91	47.40	4.26	



**Tabla 32.** Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 56 días de edad – Cementera A.

Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) a los 56 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	VPU		Km/s
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		t (μ seg)	km/s	
1	M-151	1-3	20.3	10.15	80.91	47.70	4.26	4.39
		1-4	20.2	10.15	80.91	48.90	4.13	
		1-7	20.3	10.2	81.71	44.80	4.53	
		1-8	20.3	10.1	80.12	46.20	4.39	
		1-11	20.3	10.25	82.52	46.40	4.38	
		1-12	20.3	10.2	81.71	43.50	4.67	
2	M-155	2-3	20.1	10.1	80.12	48.20	4.17	4.41
		2-4	20.2	10.1	80.12	46.40	4.35	
		2-7	20.4	10.1	80.12	48.20	4.23	
		2-8	20.3	10.2	81.71	44.20	4.59	
		2-11	20.3	10.15	80.91	44.90	4.52	
		2-12	20.4	10.15	80.91	44.40	4.59	
3	M-156	3-3	20.3	10.1	80.12	47.30	4.29	4.36
		3-4	20.1	10.1	80.12	46.20	4.35	
		3-7	20.5	10.3	83.32	47.60	4.31	
		3-8	20.3	10.2	81.71	45.70	4.44	
		3-11	20.3	10.2	81.71	46.80	4.34	
		3-12	20.2	10.2	81.71	45.50	4.44	
4	M-153	4-1	20.4	10.1	80.12	45.30	4.50	4.42
		4-2	20.2	10.1	80.12	46.10	4.38	
		4-5	20.3	10.2	81.71	45.60	4.45	
		4-6	20.4	10.3	83.32	45.90	4.44	
		4-11	20.3	10.0	78.54	46.30	4.38	
		4-12	20.3	10.2	80.91	46.40	4.38	
5	M-153 B	5-3	20.2	10.2	80.91	45.80	4.41	4.27
		5-4	20.2	10.1	79.33	45.00	4.48	
		5-5	20.3	10.3	83.32	46.00	4.41	
		5-7	20.3	10.2	81.71	46.80	4.34	
		5-11	20.4	10.2	80.91	50.00	4.08	
		5-12	20.3	10.2	81.71	52.00	3.90	
6	M-158	6-2	20.1	10.3	83.32	50.40	3.99	4.12
		6-4	20.4	10.0	78.85	47.10	4.32	
		6-5	20.4	10.1	80.12	50.70	4.02	
		6-6	20.3	10.2	81.71	48.10	4.22	
		6-11	20.2	10.2	80.91	50.60	3.99	
		6-12	20.4	10.0	78.85	49.00	4.16	
7	M-157	7-3	20.3	10.2	80.91	44.00	4.60	4.38
		7-4	20.2	10.1	79.33	44.00	4.58	
		7-5	20.2	10.2	81.71	45.20	4.47	
		7-6	20.2	10.0	78.54	48.20	4.19	
		7-11	20.2	10.3	82.52	46.60	4.33	
		7-12	20.4	10.2	81.71	49.70	4.09	



**Tabla 33.** Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 90 días de edad – Cementera A.

Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) a los 90 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	VPU		Km/s
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		t (μ seg)	km/s	
1	M-151	1-3	20.3	10.15	80.91	46.10	4.40	4.42
		1-4	20.2	10.15	80.91	46.40	4.35	
		1-7	20.3	10.2	81.71	45.50	4.46	
		1-8	20.3	10.1	80.12	46.20	4.39	
		1-13	20.3	10.25	82.52	46.20	4.39	
		1-14	20.3	10.2	81.71	45.00	4.51	
2	M-155	2-3	20.1	10.1	80.12	47.60	4.22	4.42
		2-4	20.2	10.1	80.12	46.40	4.35	
		2-7	20.4	10.1	80.12	46.50	4.39	
		2-8	20.3	10.2	81.71	46.20	4.39	
		2-13	20.3	10.15	80.91	44.80	4.53	
		2-14	20.4	10.15	80.91	44.00	4.64	
3	M-156	3-3	20.3	10.1	80.12	46.40	4.38	4.42
		3-4	20.1	10.1	80.12	45.70	4.40	
		3-7	20.5	10.3	83.32	45.50	4.51	
		3-8	20.3	10.2	81.71	45.10	4.50	
		3-13	20.3	10.2	81.71	47.70	4.26	
		3-14	20.2	10.2	81.71	45.30	4.46	
4	M-153	4-1	20.4	10.1	80.12	45.70	4.46	4.48
		4-2	20.2	10.1	80.12	45.80	4.41	
		4-5	20.3	10.2	81.71	45.50	4.46	
		4-6	20.4	10.3	83.32	45.80	4.45	
		4-13	20.1	10.3	82.52	44.80	4.49	
		4-14	20.5	10.2	80.91	44.80	4.58	
5	M-153 B	5-3	20.2	10.2	80.91	44.90	4.50	4.42
		5-4	20.2	10.1	79.33	45.00	4.48	
		5-5	20.3	10.3	83.32	45.70	4.44	
		5-7	20.3	10.2	81.71	46.50	4.37	
		5-13	20.0	10.5	86.59	46.10	4.34	
		5-14	20.2	10.1	80.12	45.70	4.42	
6	M-158	6-2	20.1	10.3	83.32	43.80	4.59	4.42
		6-4	20.4	10.0	78.85	46.80	4.35	
		6-5	20.4	10.1	80.12	46.50	4.39	
		6-6	20.3	10.2	81.71	47.00	4.32	
		6-13	20.0	10.0	78.54	45.10	4.43	
		6-14	20.1	10.1	80.12	45.50	4.42	
7	M-157	7-3	20.3	10.2	80.91	46.10	4.39	4.46
		7-4	20.2	10.1	79.33	44.20	4.56	
		7-5	20.2	10.2	81.71	45.20	4.47	
		7-6	20.2	10.0	78.54	46.50	4.34	
		7-13	20.0	10.2	80.91	43.60	4.59	
		7-14	20.0	10.5	86.59	45.60	4.39	



**Tabla 34.** Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 120 días de edad – Cementera A.

Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) a los 120 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	VPU		Km/s
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		t (μ seg)	km/s	
1	M-151	1-3	20.3	10.15	80.91	43.80	4.63	4.57
		1-4	20.2	10.15	80.91	45.40	4.45	
		1-7	20.3	10.2	81.71	45.20	4.49	
		1-8	20.3	10.1	80.12	44.20	4.59	
		1-15	20.2	10.1	80.12	43.90	4.60	
		1-16	20.1	10.1	80.12	43.40	4.63	
2	M-155	2-3	20.1	10.1	80.12	43.20	4.65	4.55
		2-4	20.2	10.1	80.12	45.80	4.41	
		2-7	20.4	10.1	80.12	44.90	4.54	
		2-8	20.3	10.2	81.71	45.00	4.51	
		2-15	20.1	10.1	80.12	43.40	4.63	
		2-16	20.1	10.1	80.12	44.30	4.54	
3	M-156	3-3	20.3	10.1	80.12	45.30	4.48	4.46
		3-4	20.1	10.1	80.12	45.80	4.39	
		3-7	20.5	10.3	83.32	47.10	4.35	
		3-8	20.3	10.2	81.71	45.10	4.50	
		3-15	20.1	10.2	81.71	44.30	4.54	
		3-16	20.1	10.1	80.12	44.50	4.52	
4	M-153	4-1	20.4	10.1	80.12	45.10	4.52	4.47
		4-2	20.2	10.1	80.12	44.70	4.52	
		4-5	20.3	10.2	81.71	46.70	4.35	
		4-6	20.4	10.3	83.32	45.70	4.46	
		4-15	20.1	10.1	80.12	45.30	4.44	
		4-16	20.1	10.2	80.91	44.20	4.55	
5	M-153 B	5-3	20.2	10.2	80.91	44.00	4.59	4.45
		5-4	20.2	10.1	79.33	44.60	4.52	
		5-5	20.3	10.3	83.32	44.20	4.59	
		5-7	20.3	10.2	81.71	46.30	4.38	
		5-15	20.0	10.1	80.12	46.70	4.28	
		5-16	20.1	10.1	80.12	46.30	4.34	
6	M-158	6-2	20.1	10.3	83.32	43.20	4.65	4.47
		6-4	20.4	10.0	78.85	46.20	4.40	
		6-5	20.4	10.1	80.12	45.80	4.45	
		6-6	20.3	10.2	81.71	44.80	4.53	
		6-15	20.0	10.0	78.54	46.20	4.33	
		6-16	20.0	10.1	80.12	44.70	4.47	
7	M-157	7-3	20.3	10.2	80.91	43.90	4.61	4.56
		7-4	20.2	10.1	79.33	43.20	4.66	
		7-5	20.2	10.2	81.71	45.20	4.47	
		7-6	20.2	10.0	78.54	44.10	4.58	
		7-15	20.0	10.2	80.91	44.70	4.47	
		7-16	20.0	10.1	80.12	43.60	4.59	

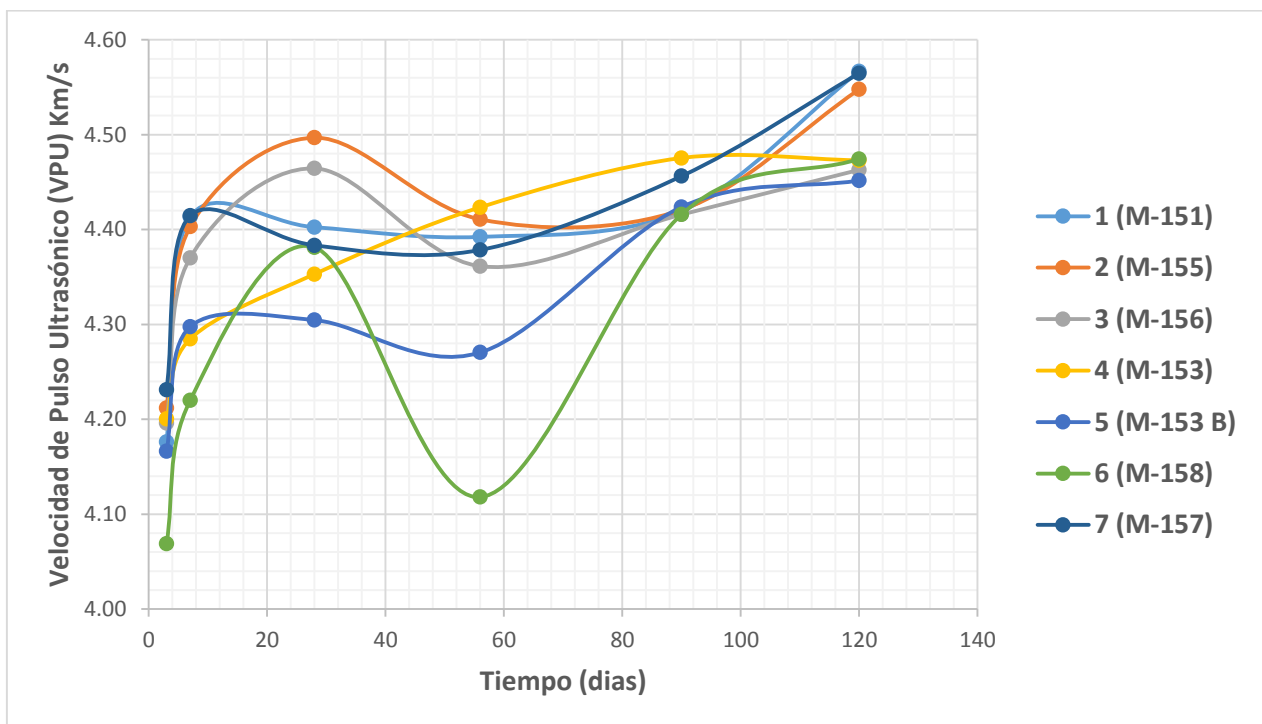


Se obtuvo un valor promedio de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico de cada cilindro medido y el promedio obtenido de cada mezcla se muestra en la tabla treinta y cinco.

Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) (Km/s)							
Número	Mezcla	Días					
		3	7	28	56	90	120
1	M-151	4.18	4.41	4.40	4.39	4.42	4.57
2	M-155	4.21	4.40	4.50	4.41	4.42	4.55
3	M-156	4.20	4.37	4.46	4.36	4.42	4.46
4	M-153	4.20	4.28	4.35	4.42	4.48	4.47
5	M-153 B	4.17	4.30	4.30	4.27	4.42	4.45
6	M-158	4.07	4.22	4.38	4.12	4.42	4.47
7	M-157	4.23	4.41	4.38	4.38	4.46	4.56

**Tabla 35.** Valores promedios de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a diferentes edades- Cementera A.

Con base en los valores de la tabla anterior se elaboró la gráfica veintiuno, en la cual podemos observar el comportamiento o evolución de los valores promedios de la velocidad de pulso ultrasónico a través del tiempo.



**Gráfica 21.** Valores promedios de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico a diferentes edades – Cementera A.



### 3.6.1. Comparativa de los resultados obtenidos con su correspondiente norma de durabilidad.

Es posible expresar la homogeneidad del concreto en forma de parámetros estadísticos, tales como la desviación estándar o el coeficiente de variación de las medidas de velocidad de propagación de ondas ultrasónicas en el concreto, tales parámetros solo pueden ser usados para comparar variaciones en la composición de concretos similares, debiendo ser considerados ciertos factores (DURAR, 2000).

Existe diversos criterios de evaluación, uno de ellos puede ser:

Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	Calidad del concreto (RED DURAR)
$V > 4000$	Durable
$4000 > V > 3001$	Alta
$3000 > V > 2001$	Normal
$V < 2000$	Deficiente

**Tabla 36.** Criterios para la velocidad de pulso ultrasónico (DURAR, 2000).

De acuerdo al manual de la Red DURAR (2000), la tabla treinta y siete muestra la calidad de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera A con base en la velocidad de pulso ultrasónico.

Número	Mezcla	Velocidad de Pulso Ultrasónico (V) (m/s) (Última medición)	Calidad del concreto
1	M-151	4,566.78	Durable
2	M-155	4,547.73	Durable
3	M-156	4,462.92	Durable
4	M-153	4,472.95	Durable
5	M-153 B	4,451.66	Durable
6	M-158	4,474.37	Durable
7	M-157	4,564.68	Durable

**Tabla 37.** Calidad de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera A, con base en los criterios de durabilidad establecidos por el manual de la Red DURAR (2000).



## CAPITULO IV. CEMENTERA B.

### 4.1. Introducción.

---

Se fabricaron seis mezclas de concreto los días 3, 4 y 5 de Abril, en el laboratorio de materiales de la “Cementara B”, a estas se les realizaron tres pruebas empleando cilindros de 10 x 20 cm.



*Ilustración 11. Cilindro de concreto elaborado por la Cementera B.*

Las pruebas realizadas fueron tres, las cuales se agrupan en pruebas no destructivas y pruebas destructivas:

- d) Resistividad Eléctrica Húmeda (Prueba no destructiva)
- e) Velocidad de Pulso Ultrasónico (Prueba no destructiva)
- f) Resistencia a la compresión (Prueba destructiva)

Cabe señalar que la prueba de resistividad eléctrica húmeda se realizó a los **3, 7, 14, 17, 29, 51, 56, 67, 71, 80, 91, 108, 120, 139, 153, y 177** días a partir de su fabricación. Las pruebas de velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión se realizaron a los **3, 7, 28, 56, 90 y 120** días a partir de su fabricación.

En la siguiente tabla se muestra la nomenclatura de cada una de las muestras elaboradas:

Número	Mezcla
1	SACYR 1
2	SACYR 2
3	SACYR 3
4	SACYR 4
5	SACYR 5
6	SACYR 6

*Tabla 38. Nomenclatura de las muestras elaboradas por la Cementera B.*



A continuación se muestra la composición de cada una de las seis mezclas elaboradas.

#### 4.2. Datos de las mezclas de concreto.

---

Denominación	Total de cementantes (Kg)	Cemento (Kg)	Ceniza Volante (Kg)	Metacaolín (Kg)	Microsilica (Kg)	Relación a/c	Agua (kg)
SACYR 1	550.00	261.25	261.25		27.50	0.62	343.16
SACYR 2	440.00	330.00	88.00		22.00	0.47	205.33
SACYR 3	439.20	316.00	88.00		35.20	0.51	222.38
SACYR 4	450.50	248.00	180.00		22.50	0.61	274.30
SACYR 5	451.00	293.00	158.00			0.51	227.81
SACYR 6	520.00	247.00	260.00		13.00	0.55	288.42

**Tabla 39.** Composición y denominación de las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera B.

La tabla anterior nos muestra que las mezclas elaboradas por la cementera B presentan un alto contenido de cementantes, en especial la mezcla identificada como “SACYR 1”, para el diseño de estas mezclas de concreto se omitió el uso de Metacaolín como adición, mas sin embargo en todas las mezclas existe la presencia de Ceniza Volante. La microsilica se omite solamente en la mezcla identificada como “SACYR 5”.

Los valores de las relaciones agua/cemento son mucho más altos en comparación a los valores que presentan las mezclas elaboradas por la cementera A.

### 4.3. Resistividad eléctrica húmeda.

---

Se hicieron mediciones de resistencia eléctrica por el método directo con un resistómetro marca Nilsson modelo 400, mediante este aparato podemos obtener el valor de la resistencia, más sin embargo para el cálculo del valor de la resistividad se realiza lo siguiente:

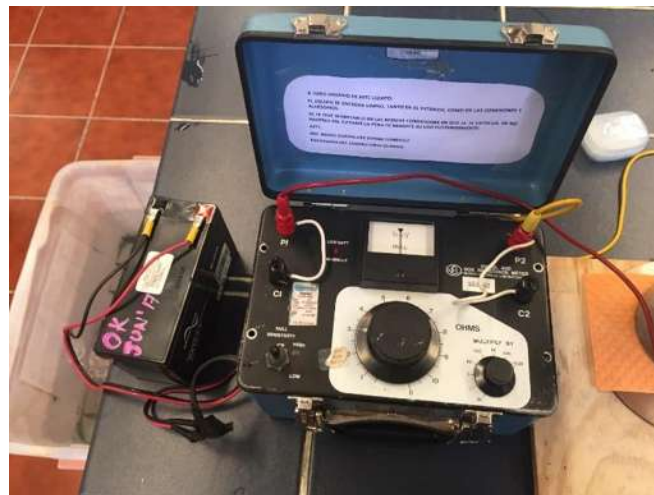
$$\text{Resistividad} = \text{Resistencia} \left(\frac{A}{L}\right)$$

**Donde:**

**A**= es el área de la sección del cilindro.

**L**= es la longitud del cilindro.

La relación **A/L** también es conocida como el factor forma, por ello se midieron tanto el área de la sección y longitud de cada cilindro.



*Ilustración 12. Resistómetro marca Nilsson modelo 400.*

A continuación se presentan los resultados de la prueba de resistividad eléctrica húmeda realizada a las seis mezclas de concreto a diferentes edades.



**Tabla 40.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 3 días de edad – Cementera B.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 3 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) (p) K $\Omega$ .cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
1	SACYR 1	1-1	20.00	10.00	78.54	0.72	2.83	2.50
		1-2	20.00	10.10	80.12	0.60	2.40	
		1-3	20.05	10.05	79.33	0.60	2.37	
		1-4	20.00	10.17	81.23	0.59	2.40	
2	SACYR 2	2-1	20.00	10.07	79.64	0.79	3.15	3.13
		2-2	20.00	10.10	80.12	0.80	3.20	
		2-3	19.95	10.02	78.85	0.80	3.16	
		2-4	20.00	10.10	80.12	0.75	3.00	
3	SACYR 3	3-1	20.00	10.00	78.54	0.70	2.75	2.81
		3-2	20.15	10.17	81.23	0.71	2.86	
		3-3	20.00	10.00	78.54	0.69	2.71	
		3-4	19.70	9.95	77.76	0.74	2.93	
4	SACYR 4	4-1	20.00	10.07	79.64	0.57	2.27	2.44
		4-2	20.00	10.05	79.33	0.64	2.54	
		4-3	19.95	10.02	78.85	0.68	2.69	
		4-4	20.10	10.10	80.12	0.57	2.26	
5	SACYR 5	5-1	20.00	10.20	81.71	0.94	3.84	3.77
		5-19	20.10	10.15	80.91	0.94	3.78	
		5-22	20.00	10.15	80.91	0.91	3.68	
		5-55	20.00	10.02	78.85	0.96	3.77	
6	SACYR 6	6-1	20.00	10.07	79.64	0.80	3.20	3.43
		6-2	20.00	10.15	80.91	0.89	3.60	
		6-3	19.95	10.10	80.12	0.86	3.45	
		6-4	20.00	10.10	80.12	0.87	3.49	



**Tabla 41.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 7 días de edad – Cementera B.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 7 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) (p) K $\Omega$ .cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
1	SACYR 1	1-1	20.00	10.00	78.54	1.53	6.01	5.52
		1-2	20.00	10.10	80.12	1.35	5.41	
		1-3	20.05	10.05	79.33	1.33	5.26	
		1-4	20.00	10.17	81.23	1.33	5.40	
2	SACYR 2	2-1	20.00	10.07	79.64	1.25	4.98	4.92
		2-2	20.00	10.10	80.12	1.28	5.13	
		2-3	19.95	10.02	78.85	1.22	4.82	
		2-4	20.00	10.10	80.12	1.19	4.77	
3	SACYR 3	3-1	20.00	10.00	78.54	1.38	5.42	5.52
		3-2	20.15	10.17	81.23	1.40	5.64	
		3-3	20.00	10.00	78.54	1.35	5.30	
		3-4	19.70	9.95	77.76	1.45	5.72	
4	SACYR 4	4-1	20.00	10.07	79.64	1.10	4.38	4.76
		4-2	20.00	10.05	79.33	1.20	4.76	
		4-3	19.95	10.02	78.85	1.40	5.53	
		4-4	20.10	10.10	80.12	1.10	4.38	
5	SACYR 5	5-1	20.00	10.20	81.71	1.04	4.25	4.21
		5-19	20.10	10.15	80.91	1.10	4.43	
		5-22	20.00	10.15	80.91	1.00	4.05	
		5-55	20.00	10.02	78.85	1.04	4.10	
6	SACYR 6	6-1	20.00	10.07	79.64	0.99	3.94	4.01
		6-2	20.00	10.15	80.91	1.01	4.09	
		6-3	19.95	10.10	80.12	1.00	4.02	
		6-4	20.00	10.10	80.12	1.00	4.01	



**Tabla 42.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 14 días de edad – Cementera B.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 14 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) (p) K $\Omega$ .cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
1	SACYR 1	1-1	20.00	10.00	78.54	4.13	16.22	16.63
		1-2	20.00	10.10	80.12	4.23	16.95	
		1-3	20.05	10.05	79.33	4.11	16.26	
		1-4	20.00	10.17	81.23	4.21	17.10	
2	SACYR 2	2-1	20.00	10.07	79.64	2.95	11.75	11.36
		2-2	20.00	10.10	80.12	2.89	11.58	
		2-3	19.95	10.02	78.85	2.81	11.11	
		2-4	20.00	10.10	80.12	2.75	11.02	
3	SACYR 3	3-1	20.00	10.00	78.54	3.69	14.49	14.62
		3-2	20.15	10.17	81.23	3.78	15.24	
		3-3	20.00	10.00	78.54	3.59	14.10	
		3-4	19.70	9.95	77.76	3.71	14.64	
4	SACYR 4	4-1	20.00	10.07	79.64	2.73	10.87	12.08
		4-2	20.00	10.05	79.33	3.11	12.34	
		4-3	19.95	10.02	78.85	3.51	13.87	
		4-4	20.10	10.10	80.12	2.82	11.24	
5	SACYR 5	5-1	20.00	10.20	81.71	1.35	5.52	5.36
		5-19	20.10	10.15	80.91	1.33	5.35	
		5-22	20.00	10.15	80.91	1.30	5.26	
		5-55	20.00	10.02	78.85	1.35	5.32	
6	SACYR 6	6-1	20.00	10.07	79.64	1.41	5.61	5.91
		6-2	20.00	10.15	80.91	1.51	6.11	
		6-3	19.95	10.10	80.12	1.48	5.94	
		6-4	20.00	10.10	80.12	1.49	5.97	



**Tabla 43.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 17 días de edad – Cementera B.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 17 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) (p) K $\Omega$ .cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
1	SACYR 1	1-1	20.00	10.00	78.54	5.49	21.56	22.00
		1-2	20.00	10.10	80.12	5.68	22.75	
		1-3	20.05	10.05	79.33	5.40	21.36	
		1-4	20.00	10.17	81.23	5.50	22.34	
2	SACYR 2	2-1	20.00	10.07	79.64	3.82	15.21	14.56
		2-2	20.00	10.10	80.12	3.69	14.78	
		2-3	19.95	10.02	78.85	3.58	14.15	
		2-4	20.00	10.10	80.12	3.52	14.10	
3	SACYR 3	3-1	20.00	10.00	78.54	5.10	20.03	19.93
		3-2	20.15	10.17	81.23	5.14	20.72	
		3-3	20.00	10.00	78.54	4.81	18.89	
		3-4	19.70	9.95	77.76	5.09	20.09	
4	SACYR 4	4-1	20.00	10.07	79.64	3.74	14.89	16.06
		4-2	20.00	10.05	79.33	4.09	16.22	
		4-3	19.95	10.02	78.85	4.63	18.30	
		4-4	20.10	10.10	80.12	3.72	14.83	
5	SACYR 5	5-1	20.00	10.20	81.71	1.60	6.54	6.32
		5-19	20.10	10.15	80.91	1.58	6.36	
		5-22	20.00	10.15	80.91	1.50	6.07	
		5-55	20.00	10.02	78.85	1.60	6.31	
6	SACYR 6	6-1	20.00	10.07	79.64	1.74	6.93	7.19
		6-2	20.00	10.15	80.91	1.89	7.65	
		6-3	19.95	10.10	80.12	1.73	6.95	
		6-4	20.00	10.10	80.12	1.81	7.25	



**Tabla 44.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 29 días de edad – Cementera B.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 29 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) (p) K $\Omega$ .cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
1	SACYR 1	1-1	20.00	10.00	78.54	10.00	39.27	40.40
		1-2	20.00	10.10	80.12	10.45	41.86	
		1-3	20.05	10.05	79.33	9.97	39.45	
		1-4	20.00	10.17	81.23	10.10	41.02	
2	SACYR 2	2-1	20.00	10.07	79.64	6.32	25.17	24.49
		2-2	20.00	10.10	80.12	6.30	25.24	
		2-3	19.95	10.02	78.85	6.00	23.72	
		2-4	20.00	10.10	80.12	5.95	23.84	
3	SACYR 3	3-1	20.00	10.00	78.54	4.40	17.28	17.49
		3-2	20.15	10.17	81.23	4.65	18.75	
		3-3	20.00	10.00	78.54	4.10	16.10	
		3-4	19.70	9.95	77.76	4.52	17.84	
4	SACYR 4	4-1	20.00	10.07	79.64	6.38	25.41	27.65
		4-2	20.00	10.05	79.33	7.35	29.15	
		4-3	19.95	10.02	78.85	7.60	30.04	
		4-4	20.10	10.10	80.12	6.52	25.99	
5	SACYR 5	5-1	20.00	10.20	81.71	2.30	9.40	9.26
		5-19	20.10	10.15	80.91	2.32	9.34	
		5-22	20.00	10.15	80.91	2.23	9.02	
		5-55	20.00	10.02	78.85	2.35	9.27	
6	SACYR 6	6-1	20.00	10.07	79.64	3.14	12.50	13.30
		6-2	20.00	10.15	80.91	3.40	13.76	
		6-3	19.95	10.10	80.12	3.32	13.33	
		6-4	20.00	10.10	80.12	3.40	13.62	



**Tabla 45.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 51 días de edad – Cementera B.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 51 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) (p) K $\Omega$ .cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
1	SACYR 1	1-1	20.00	10.00	78.54	15.00	58.90	61.72
		1-2	20.00	10.10	80.12	16.10	64.50	
		1-3	20.05	10.05	79.33	15.40	60.93	
		1-4	20.00	10.17	81.23	15.40	62.55	
2	SACYR 2	2-1	20.00	10.07	79.64	10.23	40.74	38.34
		2-2	20.00	10.10	80.12	9.64	38.62	
		2-3	19.95	10.02	78.85	9.45	37.35	
		2-4	20.00	10.10	80.12	9.15	36.65	
3	SACYR 3	3-1	20.00	10.00	78.54	14.40	56.55	57.01
		3-2	20.15	10.17	81.23	14.90	60.07	
		3-3	20.00	10.00	78.54	14.00	54.98	
		3-4	19.70	9.95	77.76	14.30	56.44	
4	SACYR 4	4-1	20.00	10.07	79.64	9.99	39.78	40.36
		4-2	20.00	10.05	79.33	10.04	39.82	
		4-3	19.95	10.02	78.85	11.00	43.48	
		4-4	20.10	10.10	80.12	9.62	38.35	
5	SACYR 5	5-1	20.00	10.20	81.71	4.20	17.16	16.95
		5-19	20.10	10.15	80.91	4.22	16.99	
		5-22	20.00	10.15	80.91	4.13	16.71	
		5-55	20.00	10.02	78.85	4.30	16.95	
6	SACYR 6	6-1	20.00	10.07	79.64	6.82	27.16	27.35
		6-2	20.00	10.15	80.91	7.04	28.48	
		6-3	19.95	10.10	80.12	6.55	26.30	
		6-4	20.00	10.10	80.12	6.85	27.44	



**Tabla 46.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 56 días de edad – Cementera B.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 56 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) (p) K $\Omega$ .cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
1	SACYR 1	1-1	20.00	10.00	78.54	18.00	70.69	73.49
		1-2	20.00	10.10	80.12	18.50	74.11	
		1-3	20.05	10.05	79.33	18.20	72.01	
		1-4	20.00	10.17	81.23	19.00	77.17	
2	SACYR 2	2-1	20.00	10.07	79.64	11.30	45.00	43.35
		2-2	20.00	10.10	80.12	11.00	44.07	
		2-3	19.95	10.02	78.85	10.70	42.29	
		2-4	20.00	10.10	80.12	10.50	42.06	
3	SACYR 3	3-1	20.00	10.00	78.54	17.40	68.33	69.18
		3-2	20.15	10.17	81.23	18.00	72.57	
		3-3	20.00	10.00	78.54	17.00	66.76	
		3-4	19.70	9.95	77.76	17.50	69.07	
4	SACYR 4	4-1	20.00	10.07	79.64	12.60	50.18	54.80
		4-2	20.00	10.05	79.33	13.80	54.74	
		4-3	19.95	10.02	78.85	15.50	61.27	
		4-4	20.10	10.10	80.12	13.30	53.01	
5	SACYR 5	5-1	20.00	10.20	81.71	6.00	24.51	24.40
		5-19	20.10	10.15	80.91	6.50	26.17	
		5-22	20.00	10.15	80.91	5.75	23.26	
		5-55	20.00	10.02	78.85	6.00	23.66	
6	SACYR 6	6-1	20.00	10.07	79.64	9.60	38.23	39.97
		6-2	20.00	10.15	80.91	10.10	40.86	
		6-3	19.95	10.10	80.12	9.94	39.92	
		6-4	20.00	10.10	80.12	10.20	40.86	



**Tabla 47.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 67 días de edad – Cementera B.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 67 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) (p) K $\Omega$ .cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
1	SACYR 1	1-1	20.00	10.00	78.54	21.50	84.43	86.75
		1-2	20.00	10.10	80.12	22.00	88.13	
		1-3	20.05	10.05	79.33	21.50	85.06	
		1-4	20.00	10.17	81.23	22.00	89.36	
2	SACYR 2	2-1	20.00	10.07	79.64	12.50	49.78	48.84
		2-2	20.00	10.10	80.12	12.50	50.07	
		2-3	19.95	10.02	78.85	12.00	47.43	
		2-4	20.00	10.10	80.12	12.00	48.07	
3	SACYR 3	3-1	20.00	10.00	78.54	17.50	68.72	73.24
		3-2	20.15	10.17	81.23	19.00	76.60	
		3-3	20.00	10.00	78.54	18.50	72.65	
		3-4	19.70	9.95	77.76	19.00	74.99	
4	SACYR 4	4-1	20.00	10.07	79.64	13.50	53.76	58.08
		4-2	20.00	10.05	79.33	15.00	59.50	
		4-3	19.95	10.02	78.85	16.00	63.24	
		4-4	20.10	10.10	80.12	14.00	55.80	
5	SACYR 5	5-1	20.00	10.20	81.71	6.60	26.97	26.43
		5-19	20.10	10.15	80.91	6.60	26.57	
		5-22	20.00	10.15	80.91	6.35	25.69	
		5-55	20.00	10.02	78.85	6.72	26.50	
6	SACYR 6	6-1	20.00	10.07	79.64	10.70	42.61	44.54
		6-2	20.00	10.15	80.91	11.00	44.50	
		6-3	19.95	10.10	80.12	11.20	44.98	
		6-4	20.00	10.10	80.12	11.50	46.07	



**Tabla 48.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 71 días de edad – Cementera B.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 71 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) (p) K $\Omega$ .cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
1	SACYR 1	1-1	20.00	10.00	78.54	21.50	84.43	85.83
		1-2	20.00	10.10	80.12	21.80	87.33	
		1-3	20.05	10.05	79.33	21.50	85.06	
		1-4	20.00	10.17	81.23	21.30	86.51	
2	SACYR 2	2-1	20.00	10.07	79.64	13.00	51.77	48.43
		2-2	20.00	10.10	80.12	12.00	48.07	
		2-3	19.95	10.02	78.85	12.00	47.43	
		2-4	20.00	10.10	80.12	11.60	46.47	
3	SACYR 3	3-1	20.00	10.00	78.54	17.00	66.76	68.68
		3-2	20.15	10.17	81.23	17.50	70.55	
		3-3	20.00	10.00	78.54	17.20	67.54	
		3-4	19.70	9.95	77.76	17.70	69.86	
4	SACYR 4	4-1	20.00	10.07	79.64	14.50	57.74	61.05
		4-2	20.00	10.05	79.33	16.50	65.44	
		4-3	19.95	10.02	78.85	16.50	65.22	
		4-4	20.10	10.10	80.12	14.00	55.80	
5	SACYR 5	5-1	20.00	10.20	81.71	6.60	26.97	26.56
		5-19	20.10	10.15	80.91	6.60	26.57	
		5-22	20.00	10.15	80.91	6.40	25.89	
		5-55	20.00	10.02	78.85	6.80	26.81	
6	SACYR 6	6-1	20.00	10.07	79.64	10.90	43.41	44.13
		6-2	20.00	10.15	80.91	10.50	42.48	
		6-3	19.95	10.10	80.12	11.00	44.18	
		6-4	20.00	10.10	80.12	11.60	46.47	



**Tabla 49.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 80 días de edad – Cementera B.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 80 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) (p) K $\Omega$ .cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
1	SACYR 1	1-1	20.00	10.00	78.54	24.00	94.25	97.51
		1-2	20.00	10.10	80.12	24.80	99.35	
		1-3	20.05	10.05	79.33	24.50	96.93	
		1-4	20.00	10.17	81.23	24.50	99.51	
2	SACYR 2	2-1	20.00	10.07	79.64	13.20	52.56	51.33
		2-2	20.00	10.10	80.12	13.00	52.08	
		2-3	19.95	10.02	78.85	12.80	50.59	
		2-4	20.00	10.10	80.12	12.50	50.07	
3	SACYR 3	3-1	20.00	10.00	78.54	19.00	74.61	77.00
		3-2	20.15	10.17	81.23	20.00	80.63	
		3-3	20.00	10.00	78.54	19.00	74.61	
		3-4	19.70	9.95	77.76	19.80	78.15	
4	SACYR 4	4-1	20.00	10.07	79.64	14.00	55.75	61.75
		4-2	20.00	10.05	79.33	16.00	63.46	
		4-3	19.95	10.02	78.85	17.20	67.98	
		4-4	20.10	10.10	80.12	15.00	59.79	
5	SACYR 5	5-1	20.00	10.20	81.71	7.90	32.28	31.38
		5-19	20.10	10.15	80.91	7.92	31.88	
		5-22	20.00	10.15	80.91	7.50	30.34	
		5-55	20.00	10.02	78.85	7.87	31.03	
6	SACYR 6	6-1	20.00	10.07	79.64	12.50	49.78	51.97
		6-2	20.00	10.15	80.91	13.00	52.59	
		6-3	19.95	10.10	80.12	13.30	53.41	
		6-4	20.00	10.10	80.12	13.00	52.08	



**Tabla 50.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 91 días de edad – Cementera B.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 91 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) (p) K $\Omega$ .cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
1	SACYR 1	1-1	20.00	10.00	78.54	25.00	98.17	102.60
		1-2	20.00	10.10	80.12	26.20	104.96	
		1-3	20.05	10.05	79.33	25.70	101.68	
		1-4	20.00	10.17	81.23	26.00	105.60	
2	SACYR 2	2-1	20.00	10.07	79.64	14.50	57.74	55.81
		2-2	20.00	10.10	80.12	14.00	56.08	
		2-3	19.95	10.02	78.85	13.80	54.55	
		2-4	20.00	10.10	80.12	13.70	54.88	
3	SACYR 3	3-1	20.00	10.00	78.54	20.00	78.54	79.21
		3-2	20.15	10.17	81.23	20.05	80.83	
		3-3	20.00	10.00	78.54	20.00	78.54	
		3-4	19.70	9.95	77.76	20.00	78.94	
4	SACYR 4	4-1	20.00	10.07	79.64	15.00	59.73	65.02
		4-2	20.00	10.05	79.33	16.50	65.44	
		4-3	19.95	10.02	78.85	18.20	71.94	
		4-4	20.10	10.10	80.12	15.80	62.98	
5	SACYR 5	5-1	20.00	10.20	81.71	9.90	40.45	39.62
		5-19	20.10	10.15	80.91	9.98	40.18	
		5-22	20.00	10.15	80.91	9.50	38.43	
		5-55	20.00	10.02	78.85	10.00	39.43	
6	SACYR 6	6-1	20.00	10.07	79.64	15.00	59.73	62.70
		6-2	20.00	10.15	80.91	15.80	63.92	
		6-3	19.95	10.10	80.12	15.50	62.25	
		6-4	20.00	10.10	80.12	16.20	64.90	



**Tabla 51.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 108 días de edad – Cementera B.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 108 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) (p) K $\Omega$ .cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
1	SACYR 1	1-1	20.00	10.00	78.54	27.00	106.03	110.59
		1-2	20.00	10.10	80.12	28.20	112.97	
		1-3	20.05	10.05	79.33	27.30	108.01	
		1-4	20.00	10.17	81.23	28.40	115.35	
2	SACYR 2	2-1	20.00	10.07	79.64	16.30	64.91	62.30
		2-2	20.00	10.10	80.12	16.00	64.09	
		2-3	19.95	10.02	78.85	15.00	59.29	
		2-4	20.00	10.10	80.12	15.20	60.89	
3	SACYR 3	3-1	20.00	10.00	78.54	22.30	87.57	88.58
		3-2	20.15	10.17	81.23	23.00	92.72	
		3-3	20.00	10.00	78.54	21.80	85.61	
		3-4	19.70	9.95	77.76	22.40	88.41	
4	SACYR 4	4-1	20.00	10.07	79.64	17.00	67.70	72.27
		4-2	20.00	10.05	79.33	18.30	72.58	
		4-3	19.95	10.02	78.85	20.00	79.05	
		4-4	20.10	10.10	80.12	17.50	69.75	
5	SACYR 5	5-1	20.00	10.20	81.71	12.00	49.03	49.62
		5-19	20.10	10.15	80.91	12.50	50.32	
		5-22	20.00	10.15	80.91	13.00	52.59	
		5-55	20.00	10.02	78.85	11.80	46.52	
6	SACYR 6	6-1	20.00	10.07	79.64	17.00	67.70	70.62
		6-2	20.00	10.15	80.91	17.50	70.80	
		6-3	19.95	10.10	80.12	17.70	71.08	
		6-4	20.00	10.10	80.12	18.20	72.91	



**Tabla 52.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 120 días de edad – Cementera B.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 120 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) (p) K $\Omega$ .cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
1	SACYR 1	1-1	20.00	10.00	78.54	27.00	106.03	113.40
		1-2	20.00	10.10	80.12	29.00	116.17	
		1-3	20.05	10.05	79.33	28.20	111.57	
		1-4	20.00	10.17	81.23	29.50	119.82	
2	SACYR 2	2-1	20.00	10.07	79.64	15.00	59.73	60.50
		2-2	20.00	10.10	80.12	15.70	62.89	
		2-3	19.95	10.02	78.85	15.00	59.29	
		2-4	20.00	10.10	80.12	15.00	60.09	
3	SACYR 3	3-1	20.00	10.00	78.54	20.02	78.62	79.34
		3-2	20.15	10.17	81.23	20.05	80.83	
		3-3	20.00	10.00	78.54	20.03	78.66	
		3-4	19.70	9.95	77.76	20.08	79.26	
4	SACYR 4	4-1	20.00	10.07	79.64	16.50	65.71	71.18
		4-2	20.00	10.05	79.33	18.00	71.39	
		4-3	19.95	10.02	78.85	20.00	79.05	
		4-4	20.10	10.10	80.12	17.20	68.56	
5	SACYR 5	5-1	20.00	10.20	81.71	10.75	43.92	42.53
		5-19	20.10	10.15	80.91	10.72	43.15	
		5-22	20.00	10.15	80.91	10.00	40.46	
		5-55	20.00	10.02	78.85	10.80	42.58	
6	SACYR 6	6-1	20.00	10.07	79.64	17.00	67.70	69.72
		6-2	20.00	10.15	80.91	17.50	70.80	
		6-3	19.95	10.10	80.12	18.00	72.29	
		6-4	20.00	10.10	80.12	17.00	68.10	



**Tabla 53.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 139 días de edad – Cementera B.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 139 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) (p) K $\Omega$ .cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
1	SACYR 1	1-1	20.00	10.00	78.54	27.00	106.03	113.08
		1-2	20.00	10.10	80.12	29.20	116.97	
		1-3	20.05	10.05	79.33	28.50	112.76	
		1-4	20.00	10.17	81.23	28.70	116.57	
2	SACYR 2	2-1	20.00	10.07	79.64	15.60	62.12	60.90
		2-2	20.00	10.10	80.12	15.50	62.09	
		2-3	19.95	10.02	78.85	15.00	59.29	
		2-4	20.00	10.10	80.12	15.00	60.09	
3	SACYR 3	3-1	20.00	10.00	78.54	20.00	78.54	79.31
		3-2	20.15	10.17	81.23	20.05	80.83	
		3-3	20.00	10.00	78.54	20.02	78.62	
		3-4	19.70	9.95	77.76	20.08	79.26	
4	SACYR 4	4-1	20.00	10.07	79.64	17.00	67.70	72.37
		4-2	20.00	10.05	79.33	18.40	72.98	
		4-3	19.95	10.02	78.85	20.00	79.05	
		4-4	20.10	10.10	80.12	17.50	69.75	
5	SACYR 5	5-1	20.00	10.20	81.71	11.50	46.98	45.28
		5-19	20.10	10.15	80.91	11.20	45.09	
		5-22	20.00	10.15	80.91	11.00	44.50	
		5-55	20.00	10.02	78.85	11.30	44.55	
6	SACYR 6	6-1	20.00	10.07	79.64	18.80	74.86	74.01
		6-2	20.00	10.15	80.91	17.00	68.78	
		6-3	19.95	10.10	80.12	19.00	76.30	
		6-4	20.00	10.10	80.12	19.00	76.11	



**Tabla 54.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 153 días de edad – Cementera B.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 153 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) (p) K $\Omega$ .cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
1	SACYR 1	1-1	20.00	10.00	78.54	29.00	113.88	118.38
		1-2	20.00	10.10	80.12	30.00	120.18	
		1-3	20.05	10.05	79.33	29.70	117.51	
		1-4	20.00	10.17	81.23	30.03	121.97	
2	SACYR 2	2-1	20.00	10.07	79.64	17.00	67.70	66.48
		2-2	20.00	10.10	80.12	17.00	68.10	
		2-3	19.95	10.02	78.85	16.30	64.43	
		2-4	20.00	10.10	80.12	16.40	65.70	
3	SACYR 3	3-1	20.00	10.00	78.54	22.00	86.39	87.58
		3-2	20.15	10.17	81.23	22.30	89.90	
		3-3	20.00	10.00	78.54	22.00	86.39	
		3-4	19.70	9.95	77.76	22.20	87.62	
4	SACYR 4	4-1	20.00	10.07	79.64	18.00	71.68	77.44
		4-2	20.00	10.05	79.33	20.00	79.33	
		4-3	19.95	10.02	78.85	21.00	83.00	
		4-4	20.10	10.10	80.12	19.00	75.73	
5	SACYR 5	5-1	20.00	10.20	81.71	13.00	53.11	51.31
		5-19	20.10	10.15	80.91	13.00	52.33	
		5-22	20.00	10.15	80.91	12.00	48.55	
		5-55	20.00	10.02	78.85	13.00	51.26	
6	SACYR 6	6-1	20.00	10.07	79.64	20.20	80.44	82.76
		6-2	20.00	10.15	80.91	20.60	83.34	
		6-3	19.95	10.10	80.12	21.20	85.14	
		6-4	20.00	10.10	80.12	20.50	82.12	



**Tabla 55.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 177 días de edad – Cementera B.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 177 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) (p) K $\Omega$ .cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ .cm	
1	SACYR 1	1-1	20.00	10.00	78.54	28.00	109.96	116.67
		1-2	20.00	10.10	80.12	30.00	120.18	
		1-3	20.05	10.05	79.33	29.50	116.72	
		1-4	20.00	10.17	81.23	29.50	119.82	
2	SACYR 2	2-1	20.00	10.07	79.64	17.00	67.70	66.58
		2-2	20.00	10.10	80.12	17.00	68.10	
		2-3	19.95	10.02	78.85	16.50	65.22	
		2-4	20.00	10.10	80.12	16.30	65.30	
3	SACYR 3	3-1	20.00	10.00	78.54	20.05	78.74	80.34
		3-2	20.15	10.17	81.23	20.06	80.87	
		3-3	20.00	10.00	78.54	20.08	78.85	
		3-4	19.70	9.95	77.76	21.00	82.89	
4	SACYR 4	4-1	20.00	10.07	79.64	17.60	70.09	74.09
		4-2	20.00	10.05	79.33	19.00	75.36	
		4-3	19.95	10.02	78.85	20.03	79.17	
		4-4	20.10	10.10	80.12	18.00	71.75	
5	SACYR 5	5-1	20.00	10.20	81.71	13.00	53.11	51.91
		5-19	20.10	10.15	80.91	12.80	51.53	
		5-22	20.00	10.15	80.91	12.50	50.57	
		5-55	20.00	10.02	78.85	13.30	52.44	
6	SACYR 6	6-1	20.00	10.07	79.64	19.50	77.65	80.84
		6-2	20.00	10.15	80.91	20.05	81.12	
		6-3	19.95	10.10	80.12	21.00	84.34	
		6-4	20.00	10.10	80.12	20.03	80.24	



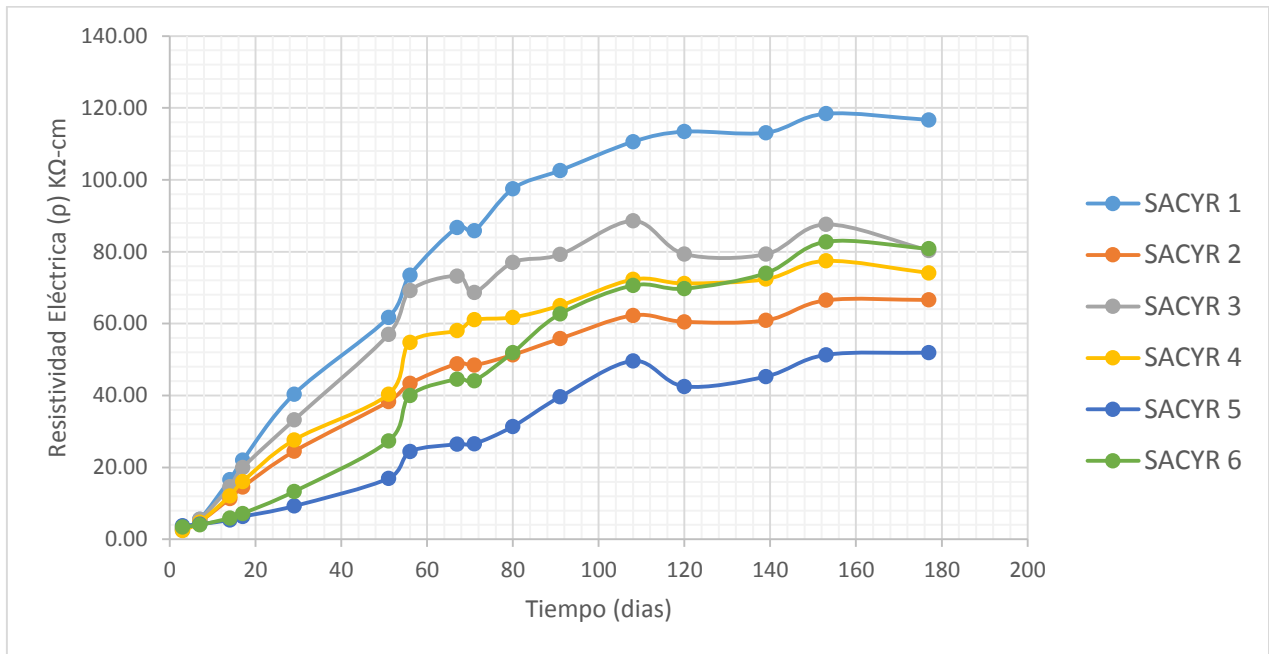
Como se puede observar en las tablas anteriores (Tabla 40 - Tabla 55), de cada mezcla de concreto se obtuvo un valor promedio de la resistividad eléctrica húmeda a los 3, 7, 14, 17, 29, 51, 56, 67, 71, 80, 91, 108, 120, 139, 153, y 177 días. Se muestran los valores promedios concentrados en la siguiente tabla:

Resistividad Eléctrica ( $\rho$ ) $K\Omega$ -cm (Laboratorio)									
Número	Mezcla	Días							
		3	7	14	17	29	51	56	67
1	SACYR 1	2.50	5.52	16.63	22.00	40.40	61.72	73.49	86.75
2	SACYR 2	3.13	4.92	11.36	14.56	24.49	38.34	43.35	48.84
3	SACYR 3	2.81	5.52	14.62	19.93	<b>33.22</b>	57.01	69.18	73.24
4	SACYR 4	2.44	4.76	12.08	16.06	27.65	40.36	54.80	58.08
5	SACYR 5	3.77	4.21	5.36	6.32	9.26	16.95	24.40	26.43
6	SACYR 6	3.43	4.01	5.91	7.19	13.30	27.35	39.97	44.54

Resistividad Eléctrica ( $\rho$ ) $K\Omega$ -cm (Laboratorio)									
Número	Mezcla	Días							
		71	80	91	108	120	139	153	177
1	SACYR 1	85.83	97.51	102.60	110.59	113.40	113.08	118.38	116.67
2	SACYR 2	48.43	51.33	55.81	62.30	60.50	60.90	66.48	66.58
3	SACYR 3	68.68	77.00	79.21	88.58	79.34	79.31	87.58	80.34
4	SACYR 4	61.05	61.75	65.02	72.27	71.18	72.37	77.44	74.09
5	SACYR 5	26.56	31.38	39.62	49.62	42.53	45.28	51.31	51.91
6	SACYR 6	44.13	51.97	62.70	70.62	69.72	74.01	82.76	80.84

**Tabla 56.** Valores promedios de la resistividad eléctrica húmeda a diferentes edades - Cementera B.

A partir de la tabla número cincuenta y seis, se elaboró una gráfica en la cual podemos observar el comportamiento a través del tiempo de los valores de resistividad eléctrica húmeda de cada una de las mezclas elaboradas, la cual se muestra a continuación.



**Gráfica 22.** Valores promedios de la resistividad eléctrica húmeda a diferentes edades – Cementera B.

Para el cálculo de la vida útil con base en la resistividad eléctrica, se necesita obtener el valor del factor edad “q” de cada una de las mezclas de concreto, ya que mediante este valor se puede determinar el tiempo de iniciación ( $T_i$ ), y por ende, obtener la vida útil de la mezcla de concreto (Andrade & Andrea, 2011).

En la gráfica veintidós se puede observar que la mezcla de concreto con un mayor valor de resistividad eléctrica húmeda al final de la prueba es la número 1 “SACYR 1”, se podría decir que, la mezcla número uno presentará un mejor desempeño en términos de durabilidad, la pregunta sería: ¿Cuál será el valor del periodo de Iniciación para la mezcla número 1?

Para responder la pregunta anterior se obtuvo el factor edad o envejecimiento “q” de cada una de las seis mezclas, para ello, se calculó gráficamente el valor de “q” donde la pendiente del ajuste obtenido al representar el logaritmo de la inversa de la resistividad frente al logaritmo del tiempo es el valor de “q” (Andrade & Andrea, 2011).

A continuación se muestran los valores de conductividad, los cuales se graficaron respecto al tiempo de curado.

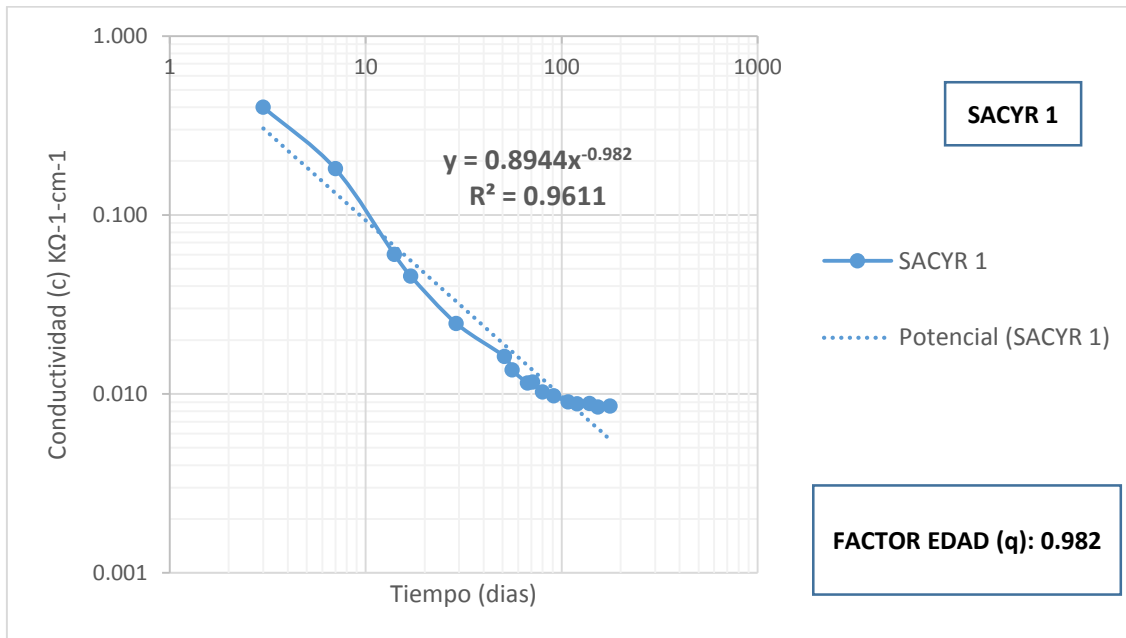


Conductividad (c) $K\Omega^{-1} - cm^{-1}$ (Laboratorio)									
Número	Mezcla	Días							
		3	7	14	17	29	51	56	67
1	SACYR 1	0.400	0.181	0.060	0.045	0.025	0.016	0.014	0.012
2	SACYR 2	0.320	0.203	0.088	0.069	0.041	0.026	0.023	0.020
3	SACYR 3	0.355	0.181	0.068	0.050	<b>0.030</b>	0.018	0.014	0.014
4	SACYR 4	0.410	0.210	0.083	0.062	0.036	0.025	0.018	0.017
5	SACYR 5	0.265	0.238	0.186	0.158	0.108	0.059	0.041	0.038
6	SACYR 6	0.291	0.249	0.169	0.139	0.075	0.037	0.025	0.022

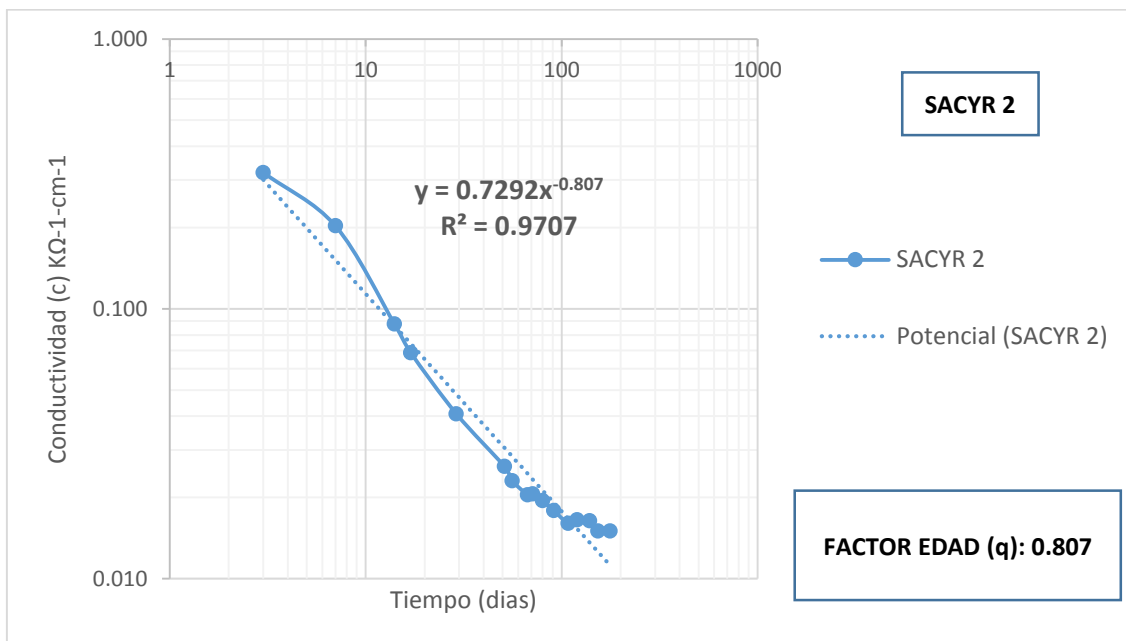
Conductividad (c) $K\Omega^{-1} - cm^{-1}$ (Laboratorio)									
Número	Mezcla	Días							
		71	80	91	108	120	139	153	177
1	SACYR 1	0.012	0.010	0.010	0.009	0.009	0.009	0.008	0.009
2	SACYR 2	0.021	0.019	0.018	0.016	0.017	0.016	0.015	0.015
3	SACYR 3	0.015	0.013	0.013	0.011	0.013	0.013	0.011	0.012
4	SACYR 4	0.016	0.016	0.015	0.014	0.014	0.014	0.013	0.013
5	SACYR 5	0.038	0.032	0.025	0.020	0.024	0.022	0.019	0.019
6	SACYR 6	0.023	0.019	0.016	0.014	0.014	0.014	0.012	0.012

**Tabla 57.** Valores promedios de la conductividad a diferentes edades – Cementera B.

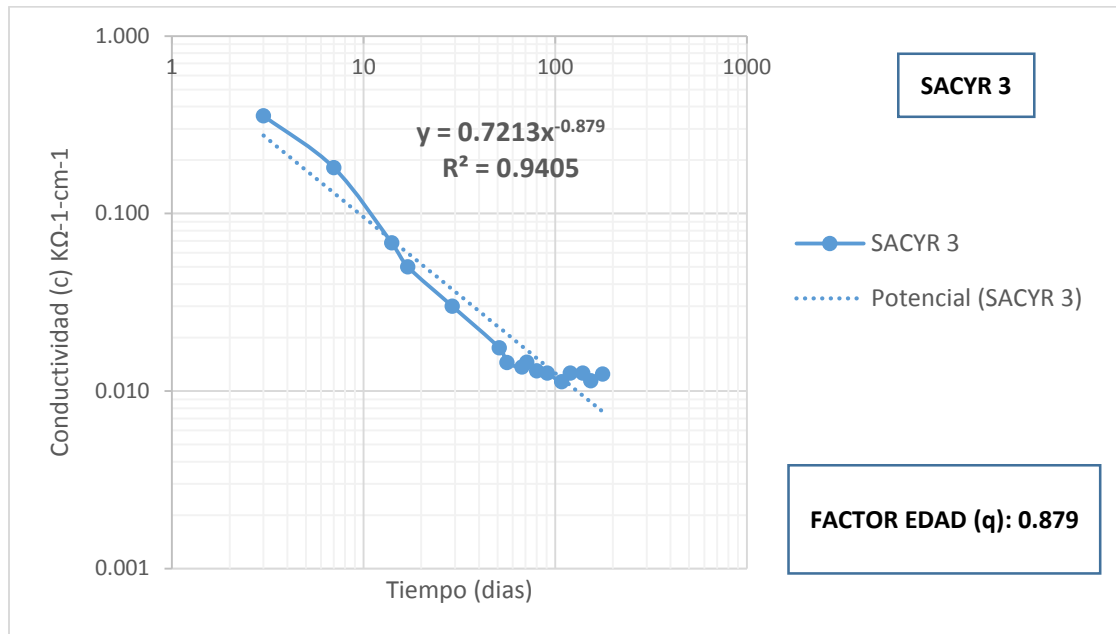
El factor edad “q” y su correspondiente gráfica de cada una de las seis mezclas de concreto se muestran a continuación.



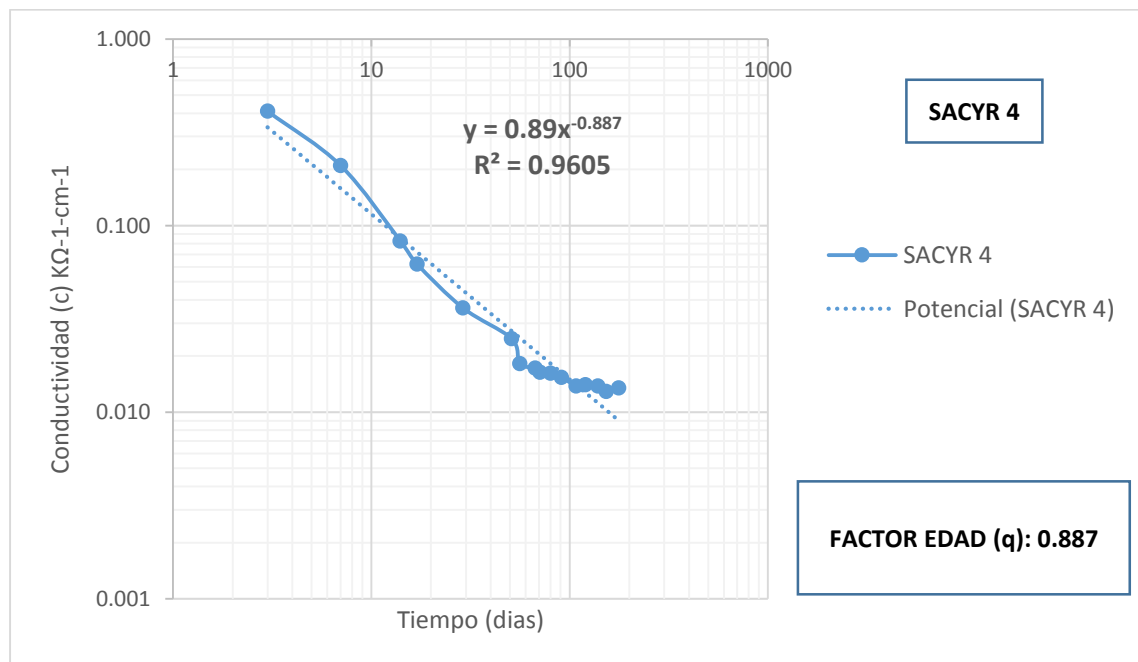
**Gráfica 23.** Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 1 (SACYR 1).



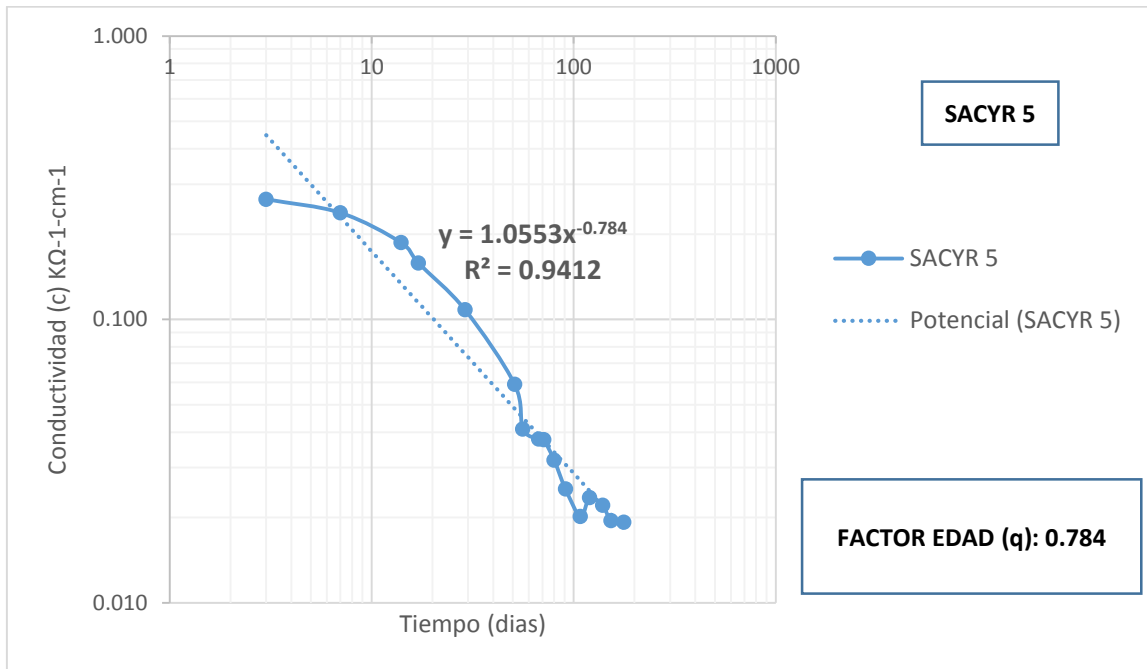
**Gráfica 24.** Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 2 (SACYR 2).



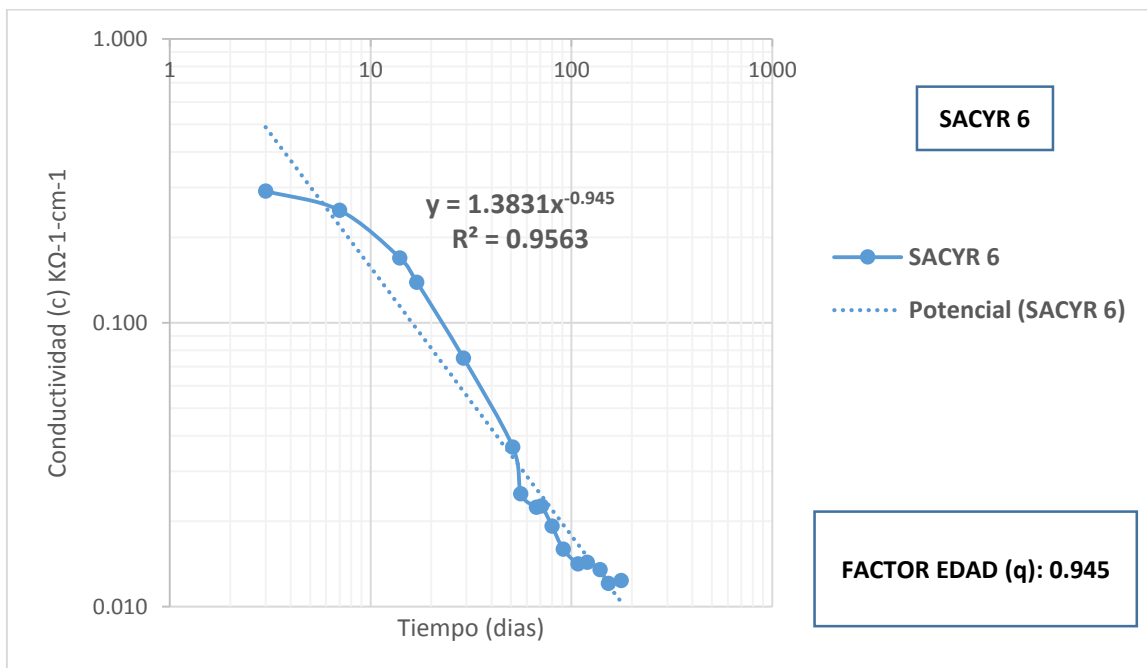
**Gráfica 25.** Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 3 (SACYR 3).



**Gráfica 26.** Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 4 (SACYR 4).



**Gráfica 27.** Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 5 (SACYR 5).



**Gráfica 28.** Conductividad y factor edad de la mezcla de concreto 6 (SACYR 6).



En las gráficas anteriores se puede observar el comportamiento de la conductividad a través del tiempo, cada una de las seis mezclas arroja un valor distinto respecto al factor edad “q”.

Sabemos que el valor del factor edad “q” representa la pendiente del ajuste logarítmico a la curva de la resistividad eléctrica húmeda o a la curva de la conductividad, por ende se podría concluir que, entre mayor sea la pendiente del ajuste logarítmico o el valor del factor edad “q” sea más grande, estaremos hablando de una mayor eficiencia en el proceso de hidratación del concreto.

Se podría realizar un análisis como el que se llevó a cabo en el apartado de resistividad eléctrica húmeda para las mezclas de concreto pertenecientes a la “Cementera A”, pero se propondrá una nueva hipótesis la cual se desarrollara en el capítulo denominado “Elaboración de un monograma para la determinación de la vida útil (tiempo de iniciación) de las mezclas de concreto a partir del parámetro “ $q_b$ ” (age factor before 28 days cured)”.

Primeramente, se mostrarán los resultados de la prueba de resistencia a la compresión simple y los resultados correspondientes a la prueba de velocidad de pulso ultrasónico de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera B.



#### 4.3.1. Comparativa de los resultados obtenidos con su correspondiente norma de durabilidad.

---

No existe un acuerdo de carácter general entre los diferentes investigadores acerca del nivel límite de resistividad eléctrica por encima del cual el riesgo de corrosión de las armaduras puede ser considerado despreciable. Sin embargo, la práctica ha demostrado que se puede utilizar como criterio general (DURAR, 2000):

Resistividad (k $\Omega$ -cm)	Riesgo de corrosión (RED DURAR)
$\rho > 200$	Bajo
$200 > \rho > 10$	Moderado
$\rho < 10$	Alto

**Tabla 58.** Criterios de evaluación de la resistividad (DURAR, 2000).

De acuerdo al manual de la Red DURAR (2000), la tabla cincuenta y nueve muestra el riesgo de daño por corrosión de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera B con base en la resistividad.

Número	Mezcla	Resistividad ( $\rho$ ) k $\Omega$ -cm (Última medición)	Riesgo de de corrosión
1	SACYR 1	116.67	Moderado
2	SACYR 2	66.58	Moderado
3	SACYR 3	80.34	Moderado
4	SACYR 4	74.09	Moderado
5	SACYR 5	51.91	Moderado
6	SACYR 6	80.84	Moderado

**Tabla 59.** Riesgo de corrosión de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera B, con base en los criterios de durabilidad establecidos por el manual de la Red DURAR (2000).

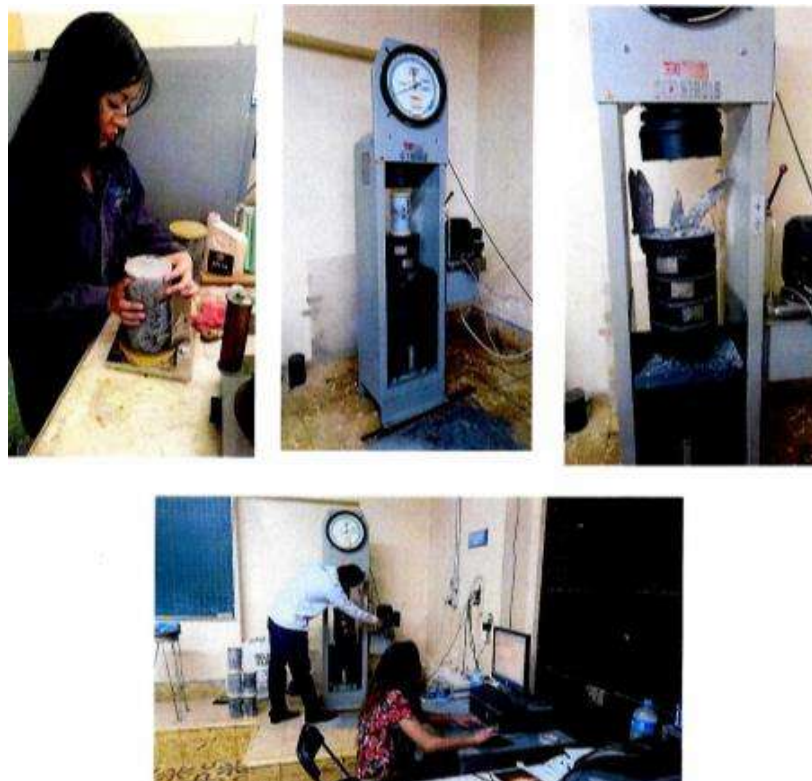


#### 4.4. Resistencia a la compresión.

---

La prueba de resistencia mecánica a la compresión directa se realizó en las instalaciones de una cierta universidad de la ciudad de Querétaro, la cual posee un laboratorio de materiales de construcción con una máquina universal calibrada.

Previo a las pruebas de compresión axial, se cabecearon los cilindros con azufre y se esperó un periodo entre 4 y 6 horas para realizar las pruebas. La siguiente ilustración muestra fotografías del procedimiento experimental de esta prueba.



**Ilustración 13.** Evidencia fotográfica de la prueba de resistencia a la compresión axial.

Las pruebas de compresión axial se realizaron a los **3, 7, 28, 56, 90 y 120** días a partir de la elaboración de las mezclas de concreto.



Los resultados de esta prueba se muestran a continuación:

**Tabla 60.** Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 3 días de edad – Cementera B.

Resistencia a la Compresión (f'c) a los 3 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la Compresión		f'c (MPa)
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Fuerza máxima (KN)	f'c (MPa)	
1	SACYR 1	5	20.00	10.00	78.54	37410	46.71	47.35
		6	20.00	10.00	78.54	38440	48.00	
2	SACYR 2	5	20.00	10.00	78.54	44450	55.50	55.75
		6	20.00	10.00	78.54	44850	56.00	
3	SACYR 3	5	20.00	10.00	78.54	44580	55.66	56.23
		6	20.00	10.00	78.54	45480	56.79	
4	SACYR 4	5	20.00	10.00	78.54	38840	48.50	47.23
		6	20.00	10.00	78.54	36820	45.97	
5	SACYR 5	5	20.00	10.00	78.54	35560	44.40	44.36
		6	20.00	10.00	78.54	35500	44.33	
6	SACYR 6	5	20.00	10.00	78.54	21840	27.27	30.50
		6	20.00	10.00	78.54	27020	33.74	



**Tabla 61.** Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 7 días de edad – Cementera B.

Resistencia a la Compresión (f'c) a los 7 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la Compresión		f'c (MPa)
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Fuerza máxima (KN)	f'c (MPa)	
1	SACYR 1	7	20.00	10.00	78.54	45820	57.21	59.28
		8	20.00	10.00	78.54	49140	61.36	
2	SACYR 2	7	20.00	10.00	78.54	51350	64.12	65.03
		8	20.00	10.00	78.54	52820	65.95	
3	SACYR 3	7	20.00	10.00	78.54	55180	68.90	67.81
		8	20.00	10.00	78.54	53440	66.73	
4	SACYR 4	8	20.00	10.00	78.54	50220	62.71	62.28
		9	20.00	10.00	78.54	49540	61.86	
5	SACYR 5	7	20.00	10.00	78.54	41530	51.85	54.02
		8	20.00	10.00	78.54	45000	56.19	
6	SACYR 6	7	20.00	10.00	78.54	32840	41.00	37.70
		8	20.00	10.00	78.54	27540	34.39	



**Tabla 62.** Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 28 días de edad – Cementera B.

Resistencia a la Compresión (f'c) a los 28 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la Compresión		f'c (MPa)
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Fuerza máxima (KN)	f'c (MPa)	
1	SACYR 1	39	20.00	10.00	78.54	63230	78.95	<b>79.74</b>
		40	20.00	10.00	78.54	65190	81.40	
		41	20.00	10.00	78.54	63170	78.87	
2	SACYR 2	39	20.00	10.00	78.54	61870	77.25	<b>80.91</b>
		40	20.00	10.00	78.54	68600	85.65	
		41	20.00	10.00	78.54	63930	79.82	
3	SACYR 3	39	20.00	10.00	78.54	66300	82.78	<b>81.77</b>
		40	20.00	10.00	78.54	65960	82.36	
		41	20.00	10.00	78.54	64200	80.16	
4	SACYR 4	39	20.00	10.00	78.54	61470	76.75	<b>79.20</b>
		40	20.00	10.00	78.54	66570	83.12	
		41	20.00	10.00	78.54	62260	77.74	
5	SACYR 5	39	20.00	10.00	78.54	53330	66.59	<b>68.95</b>
		40	20.00	10.00	78.54	55370	69.14	
		41	20.00	10.00	78.54	56970	71.13	
6	SACYR 6	39	20.00	10.00	78.54	40250	50.26	<b>54.26</b>
		40	20.00	10.00	78.54	48880	61.03	
		41	20.00	10.00	78.54	41240	51.49	



**Tabla 63.** Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 56 días de edad – Cementera B.

Resistencia a la Compresión (f'c) a los 56 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la Compresión		f'c (MPa)
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Fuerza máxima (KN)	f'c (MPa)	
1	SACYR 1	45	20.00	10.00	78.54	72260	90.22	<b>87.88</b>
		46	20.00	10.00	78.54	68370	85.37	
		47	20.00	10.00	78.54	70510	88.04	
2	SACYR 2	44	20.00	10.00	78.54	70510	88.04	<b>85.78</b>
		45	20.00	10.00	78.54	69550	86.84	
		46	20.00	10.00	78.54	66030	82.45	
3	SACYR 3	45	20.00	10.00	78.54	58210	72.68	<b>81.51</b>
		46	20.00	10.00	78.54	67630	84.44	
		47	20.00	10.00	78.54	70010	87.42	
4	SACYR 4	44	20.00	10.00	78.54	61690	77.03	<b>81.29</b>
		45	20.00	10.00	78.54	64830	80.95	
		46	20.00	10.00	78.54	68790	85.89	
5	SACYR 5	44	20.00	10.00	78.54	59920	74.82	<b>74.27</b>
		45	20.00	10.00	78.54	61870	77.25	
		46	20.00	10.00	78.54	56660	70.75	
6	SACYR 6	44	20.00	10.00	78.54	46380	57.91	<b>64.62</b>
		45	20.00	10.00	78.54	55210	68.94	
		46	20.00	10.00	78.54	53660	67.00	



**Tabla 64.** Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 90 días de edad – Cementera B.

Resistencia a la Compresión (f'c) a los 90 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la Compresión		f'c (MPa)
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Fuerza máxima (KN)	f'c (MPa)	
1	SACYR 1	52	20.00	10.00	78.54	71870	89.74	<b>86.04</b>
		54	20.00	10.00	78.54	66760	83.36	
		55	20.00	10.00	78.54	68090	85.02	
2	SACYR 2	50	20.00	10.00	78.54	63470	79.25	<b>79.80</b>
		51	20.00	10.00	78.54	68520	85.55	
		52	20.00	10.00	78.54	59750	74.60	
3	SACYR 3	51	20.00	10.00	78.54	69270	86.49	<b>87.46</b>
		52	20.00	10.00	78.54	70940	88.58	
		53	20.00	10.00	78.54	69920	87.30	
4	SACYR 4	49	20.00	10.00	78.54	74680	93.25	<b>91.11</b>
		50	20.00	10.00	78.54	73910	92.28	
		51	20.00	10.00	78.54	70320	87.80	
5	SACYR 5	51	20.00	10.00	78.54	56440	70.47	<b>69.02</b>
		52	20.00	10.00	78.54	54630	68.21	
		53	20.00	10.00	78.54	54760	68.37	
6	SACYR 6	52	20.00	10.00	78.54	60710	75.80	<b>67.85</b>
		53	20.00	10.00	78.54	46800	58.44	
		54	20.00	10.00	78.54	55500	69.30	



**Tabla 65.** Resultados de las prueba mecánicas en compresión simple a los 120 días de edad – Cementera B.

Resistencia a la Compresión (f'c) a los 120 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la Compresión		f'c (MPa)
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Fuerza máxima (KN)	f'c (MPa)	
1	SACYR 1	65	20.00	10.00	78.54	72856	90.97	90.78
		66	20.00	10.00	78.54	72551	90.59	
2	SACYR 2	59	20.00	10.00	78.54	75254	93.96	91.37
		60	20.00	10.00	78.54	71093	88.77	
3	SACYR 3	59	20.00	10.00	78.54	70710	88.29	85.52
		60	20.00	10.00	78.54	66272	82.75	
4	SACYR 4	58	20.00	10.00	78.54	72246	90.21	91.53
		59	20.00	10.00	78.54	74364	92.85	
5	SACYR 5	59	20.00	10.00	78.54	62136	77.58	76.30
		60	20.00	10.00	78.54	60080	75.02	
6	SACYR 6	65	20.00	10.00	78.54	47416	59.20	62.99
		64	20.00	10.00	78.54	53481	66.78	

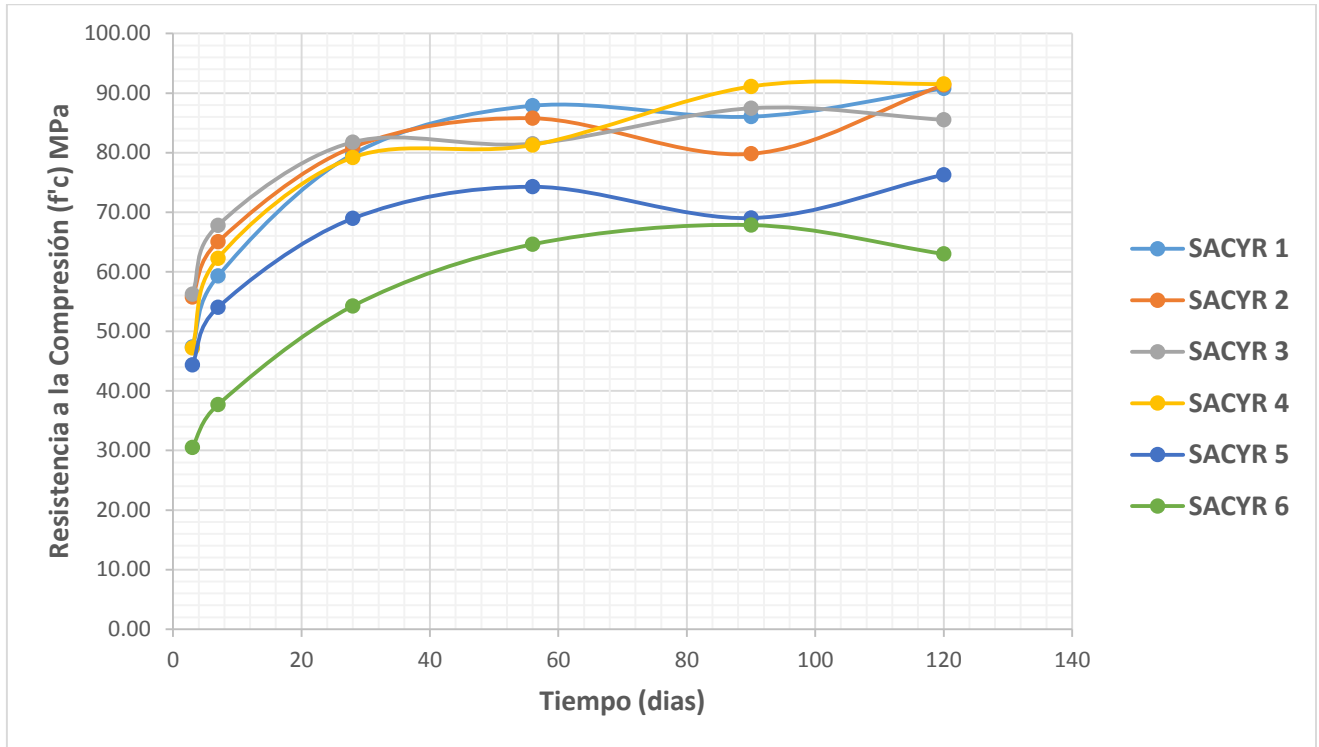
Se obtuvo un valor promedio de las pruebas de compresión axial realizadas a cada una de las mezclas de concreto elaboradas por la “Cementera B” a los 3, 7, 28, 56, 90 y 120 días. En la siguiente tabla se muestran los valores promedios obtenidos:

Resistencia a la Compresión - f'c (MPa)							
Número	Mezcla	Días					
		3	7	28	56	90	120
1	SACYR 1	47.35	59.28	79.74	87.88	86.04	90.78
2	SACYR 2	55.75	65.03	80.91	85.78	79.80	91.37
3	SACYR 3	56.23	67.81	81.77	81.51	87.46	85.52
4	SACYR 4	47.23	62.28	79.20	81.29	91.11	91.53
5	SACYR 5	44.36	54.02	68.95	74.27	69.02	76.30
6	SACYR 6	30.50	37.70	54.26	64.62	67.85	62.99

**Tabla 66.** Valores promedios de la prueba de compresión simple a diferentes edades – Cementera B.



Con base en los valores contenidos en la tabla sesenta y seis se elaboró la gráfica veintinueve, en la cual podemos observar el comportamiento o evolución de la resistencia a compresión axial a través del tiempo de cada una de las mezclas elaboradas.



**Gráfica 29.** Valores promedios de la prueba mecánica de compresión simple a diferentes edades – Cementera B.



#### 4.4.1. Comparativa de los resultados obtenidos con su correspondiente norma de durabilidad.

El criterio de evaluación de los resultados de la prueba de compresión simple se lleva a cabo con base en (DURAR, 2000):

- Con base en el diseño estructural:* El valor del  $f'c$  obtenido en la prueba de compresión simple debe ser mayor o igual a la resistencia a la compresión característica del concreto especificada en el diseño estructural.
- En base a la durabilidad:* El valor de la resistencia mecánica, por sí solo, no es indicativo de la durabilidad del concreto, ya que dependerá de varios factores entre los cuales se puede mencionar: la relación a/c, la dosificación, el tipo de cemento, el espesor de recubrimiento de la armadura, etc. Sin embargo, en general se acepta lo siguiente:

Resistencia a la compresión (MPa)	Calidad del concreto (RED DURAR)
$f'c > 45$	Durable
$f'c < 20$	Baja durabilidad

**Tabla 67.** Criterios de evaluación en función de la resistencia mecánica (DURAR, 2000).

De acuerdo al manual de la Red DURAR (2000), la tabla sesenta y ocho muestra la calidad de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera B con base en la resistencia mecánica.

Número	Mezcla	Resistencia a la compresión ( $f'c$ ) (MPa) (Última medición)	Calidad del concreto
1	SACYR 1	90.78	Durable
2	SACYR 2	91.37	Durable
3	SACYR 3	85.52	Durable
4	SACYR 4	91.53	Durable
5	SACYR 5	76.30	Durable
6	SACYR 6	62.99	Durable

**Tabla 68.** Calidad de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera B, con base en los criterios de durabilidad establecidos por el manual de la Red DURAR (2000).



#### 4.5. Velocidad de pulso ultrasónico.

---

Una vez terminadas las mediciones de resistividad, se procedió a las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico en cada probeta ensayada, los valores que se muestran más adelante son los de cada cilindro medido y el promedio obtenido de cada mezcla. La siguiente ilustración muestra una fotografía del procedimiento experimental de esta prueba.



*Ilustración 14. Evidencia fotográfica de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico.*

Las pruebas de velocidad de pulso ultrasónico se realizaron a los **3, 7, 28, 56, 90** y **120** días a partir de la elaboración de las mezclas de concreto.



Los resultados de esta prueba se muestran a continuación:

**Tabla 69.** Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 3 días de edad – Cementera B.

Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) a los 3 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	VPU		Km/s
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		t (μ seg)	km/s	
1	SACYR 1	1	20.0	10.00	78.54	50.20	3.98	4.12
		2	20.0	10.10	80.12	48.90	4.09	
		3	20.1	10.05	79.33	48.50	4.13	
		4	20.0	10.17	81.23	46.80	4.27	
2	SACYR 2	1	20.0	10.07	79.64	45.30	4.42	4.44
		2	20.0	10.10	80.12	44.70	4.47	
		3	20.0	10.02	78.85	45.20	4.41	
		4	20.0	10.10	80.12	45.00	4.44	
3	SACYR 3	1	20.0	10.00	78.54	45.50	4.40	4.47
		2	20.2	10.17	81.23	45.70	4.41	
		3	20.0	10.00	78.54	44.40	4.50	
		4	19.7	9.95	77.76	43.10	4.57	
4	SACYR 4	1	20.0	10.07	79.64	51.10	3.91	4.07
		2	20.0	10.05	79.33	46.50	4.30	
		3	20.0	10.02	78.85	48.20	4.14	
		4	20.1	10.10	80.12	51.10	3.93	
5	SACYR 5	1	20.0	10.20	81.71	45.50	4.40	4.26
		19	20.1	10.15	80.91	47.70	4.21	
		22	20.0	10.15	80.91	47.70	4.19	
		55	20.0	10.02	78.85	47.00	4.26	
6	SACYR 6	1	20.0	10.07	79.64	45.50	4.40	4.33
		2	20.0	10.15	80.91	46.30	4.32	
		3	20.0	10.10	80.12	46.50	4.29	
		4	20.0	10.10	80.12	46.40	4.31	



**Tabla 70.** Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 7 días de edad – Cementera B.

Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) a los 7 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	VPU		km/s
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		t (μ seg)	km/s	
1	SACYR 1	9	20.1	10.10	80.12	44.80	4.50	4.34
		2	20.0	10.10	80.12	46.70	4.28	
		3	20.1	10.05	79.33	46.70	4.29	
		4	20.0	10.17	81.23	46.80	4.27	
2	SACYR 2	1	20.0	10.07	79.64	45.70	4.38	4.43
		2	20.0	10.10	80.12	44.30	4.51	
		3	20.0	10.02	78.85	45.00	4.43	
		4	20.0	10.10	80.12	45.50	4.40	
3	SACYR 3	1	20.0	10.00	78.54	44.40	4.50	4.48
		2	20.2	10.17	81.23	46.20	4.36	
		3	20.0	10.00	78.54	44.60	4.48	
		4	19.7	9.95	77.76	43.00	4.58	
4	SACYR 4	1	20.0	10.07	79.64	44.90	4.45	4.37
		2	20.0	10.05	79.33	45.50	4.40	
		7	20.4	10.02	78.85	47.20	4.32	
		4	20.1	10.10	80.12	46.70	4.30	
5	SACYR 5	1	20.0	10.20	81.71	45.40	4.41	4.41
		19	20.1	10.15	80.91	47.00	4.28	
		22	20.0	10.15	80.91	45.20	4.42	
		55	20.0	10.02	78.85	44.00	4.55	
6	SACYR 6	1	20.0	10.07	79.64	44.60	4.48	4.41
		2	20.0	10.15	80.91	43.80	4.57	
		3	20.0	10.10	80.12	49.20	4.05	
		4	20.0	10.10	80.12	44.20	4.52	



**Tabla 71.** Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días de edad – Cementera B.

Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) a los 28 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	VPU		Km/s
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		t (μ seg)	km/s	
1	SACYR 1	9	20.1	10.10	80.12	44.20	4.56	4.53
		2	20.0	10.10	80.12	44.70	4.47	
		3	20.1	10.05	79.33	43.70	4.59	
		4	20.0	10.17	81.23	44.30	4.51	
2	SACYR 2	1	20.0	10.07	79.64	43.70	4.58	4.68
		2	20.0	10.10	80.12	41.20	4.85	
		3	20.0	10.02	78.85	42.90	4.65	
		4	20.0	10.10	80.12	43.20	4.63	
3	SACYR 3	1	20.0	10.00	78.54	45.20	4.42	4.64
		2	20.2	10.17	81.23	43.50	4.63	
		3	20.0	10.00	78.54	41.90	4.77	
		4	19.7	9.95	77.76	41.70	4.72	
4	SACYR 4	1	20.0	10.07	79.64	45.20	4.42	4.46
		2	20.0	10.05	79.33	44.30	4.51	
		7	20.4	10.02	78.85	44.50	4.58	
		4	20.1	10.10	80.12	46.70	4.30	
5	SACYR 5	1	20.0	10.20	81.71	44.30	4.51	4.54
		19	20.1	10.15	80.91	43.70	4.60	
		22	20.0	10.15	80.91	44.50	4.49	
		55	20.0	10.02	78.85	43.80	4.57	
6	SACYR 6	1	20.0	10.07	79.64	45.30	4.42	4.56
		2	20.0	10.15	80.91	43.40	4.61	
		3	20.0	10.10	80.12	43.20	4.62	
		4	20.0	10.10	80.12	43.50	4.60	



**Tabla 72.** Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 56 días de edad – Cementera B.

Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) a los 56 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	VPU		Km/s
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		t (μ seg)	km/s	
1	SACYR 1	9	20.1	10.10	80.12	45.60	4.42	4.33
		2	20.0	10.10	80.12	46.50	4.30	
		3	20.1	10.05	79.33	46.20	4.34	
		4	20.0	10.17	81.23	46.80	4.27	
2	SACYR 2	1	20.0	10.07	79.64	46.90	4.26	4.34
		2	20.0	10.10	80.12	46.60	4.29	
		3	20.0	10.02	78.85	45.30	4.40	
		4	20.0	10.10	80.12	45.50	4.40	
3	SACYR 3	1	20.0	10.00	78.54	44.40	4.50	4.54
		2	20.2	10.17	81.23	45.70	4.41	
		3	20.0	10.00	78.54	43.50	4.60	
		4	19.7	9.95	77.76	42.40	4.65	
4	SACYR 4	1	20.0	10.07	79.64	43.60	4.59	4.54
		2	20.0	10.05	79.33	43.10	4.64	
		7	20.4	10.02	78.85	46.80	4.36	
		4	20.1	10.10	80.12	44.10	4.56	
5	SACYR 5	1	20.0	10.20	81.71	43.60	4.59	4.40
		19	20.1	10.15	80.91	48.10	4.18	
		22	20.0	10.15	80.91	46.20	4.33	
		55	20.0	10.02	78.85	44.20	4.52	
6	SACYR 6	1	20.0	10.07	79.64	45.40	4.41	4.38
		2	20.0	10.15	80.91	43.00	4.65	
		3	20.0	10.10	80.12	46.50	4.29	
		4	20.0	10.10	80.12	48.00	4.17	



**Tabla 73.** Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 90 días de edad – Cementera B.

Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) a los 90 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	VPU		Km/s
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		t (μ seg)	km/s	
1	SACYR 1	9	20.1	10.10	80.12	42.70	4.72	4.64
		2	20.0	10.10	80.12	43.50	4.60	
		3	20.1	10.05	79.33	43.80	4.58	
		4	20.0	10.17	81.23	42.80	4.67	
2	SACYR 2	1	20.0	10.07	79.64	42.10	4.75	4.77
		2	20.0	10.10	80.12	41.70	4.80	
		3	20.0	10.02	78.85	41.20	4.84	
		4	20.0	10.10	80.12	42.60	4.69	
3	SACYR 3	1	20.0	10.00	78.54	42.40	4.72	4.77
		2	20.2	10.17	81.23	42.90	4.70	
		3	20.0	10.00	78.54	41.60	4.81	
		4	19.7	9.95	77.76	40.70	4.84	
4	SACYR 4	1	20.0	10.07	79.64	44.70	4.47	4.59
		2	20.0	10.05	79.33	43.60	4.59	
		7	20.4	10.02	78.85	45.20	4.51	
		4	20.1	10.10	80.12	42.10	4.77	
5	SACYR 5	1	20.0	10.20	81.71	42.70	4.68	4.58
		19	20.1	10.15	80.91	43.00	4.67	
		22	20.0	10.15	80.91	45.00	4.44	
		55	20.0	10.02	78.85	44.20	4.52	
6	SACYR 6	1	20.0	10.07	79.64	42.70	4.68	4.64
		2	20.0	10.15	80.91	43.70	4.58	
		3	20.0	10.10	80.12	42.00	4.75	
		4	20.0	10.10	80.12	44.00	4.55	



**Tabla 74.** Resultados de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a los 120 días de edad – Cementera B.

Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) a los 120 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	VPU		Km/s
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		t (μ seg)	km/s	
1	SACYR 1	9	20.1	10.10	80.12	44.00	4.58	4.57
		2	20.0	10.10	80.12	43.60	4.59	
		3	20.1	10.05	79.33	43.70	4.59	
		4	20.0	10.17	81.23	44.10	4.54	
2	SACYR 2	1	20.0	10.07	79.64	45.40	4.41	4.66
		2	20.0	10.10	80.12	42.10	4.75	
		3	20.0	10.02	78.85	41.70	4.78	
		4	20.0	10.10	80.12	42.70	4.68	
3	SACYR 3	1	20.0	10.00	78.54	44.10	4.54	4.58
		2	20.2	10.17	81.23	45.50	4.43	
		3	20.0	10.00	78.54	42.70	4.68	
		4	19.7	9.95	77.76	42.10	4.68	
4	SACYR 4	1	20.0	10.07	79.64	43.90	4.56	4.66
		2	20.0	10.05	79.33	44.00	4.55	
		7	20.4	10.02	78.85	42.20	4.83	
		4	20.1	10.10	80.12	42.70	4.71	
5	SACYR 5	1	20.0	10.20	81.71	42.00	4.76	4.72
		19	20.1	10.15	80.91	43.70	4.60	
		22	20.0	10.15	80.91	42.20	4.74	
		55	20.0	10.02	78.85	41.80	4.78	
6	SACYR 6	1	20.0	10.07	79.64	41.60	4.81	4.80
		2	20.0	10.15	80.91	41.70	4.80	
		3	20.0	10.10	80.12	41.60	4.80	
		4	20.0	10.10	80.12	41.60	4.81	

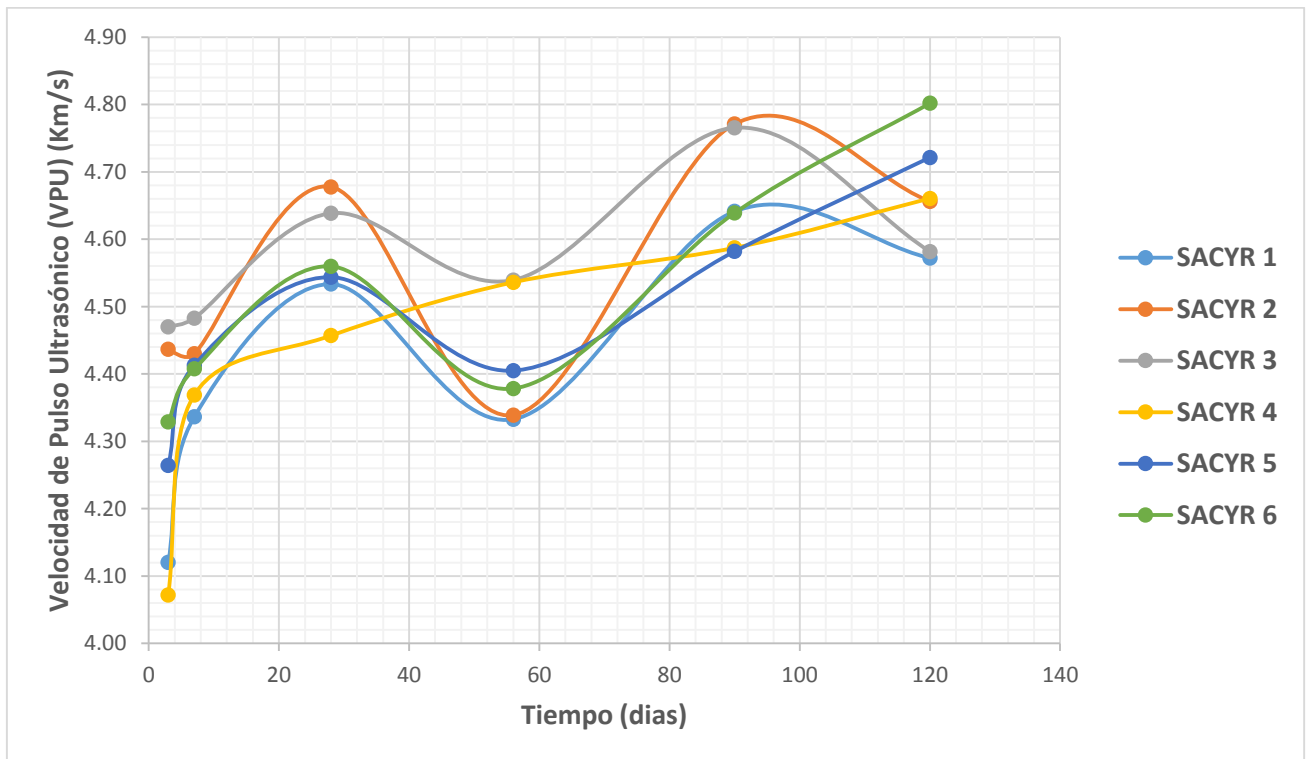


Se obtuvo un valor promedio de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico de cada cilindro medido y el promedio obtenido de cada mezcla se muestra en la tabla setenta y cinco.

Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) (Km/s)							
Número	Mezcla	Días					
		3	7	28	56	90	120
1	SACYR 1	4.12	4.34	4.53	4.33	4.64	4.57
2	SACYR 2	4.44	4.43	4.68	4.34	4.77	4.66
3	SACYR 3	4.47	4.48	4.64	4.54	4.77	4.58
4	SACYR 4	4.07	4.37	4.46	4.54	4.59	4.66
5	SACYR 5	4.26	4.41	4.54	4.40	4.58	4.72
6	SACYR 6	4.33	4.41	4.56	4.38	4.64	4.80

**Tabla 75.** Valores promedios de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico a diferentes edades – Cementera B.

Con base en los valores de la tabla setenta y cinco se elaboró la gráfica treinta, en la cual podemos observar el comportamiento o evolución de los valores promedios de la velocidad de pulso ultrasónico a través del tiempo.



**Gráfica 30.** Valores promedios de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico a diferentes edades – Cementera B.



#### 4.5.1. Comparativa de los resultados obtenidos con su correspondiente norma de durabilidad.

---

Es posible expresar la homogeneidad del concreto en forma de parámetros estadísticos, tales como la desviación estándar o el coeficiente de variación de las medidas de velocidad de propagación de ondas ultrasónicas en el concreto, tales parámetros solo pueden ser usados para comparar variaciones en la composición de concretos similares, debiendo ser considerados ciertos factores (DURAR, 2000).

Existe diversos criterios de evaluación, uno de ellos puede ser:

Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	Calidad del concreto (RED DURAR)
$V > 4000$	Durable
$4000 > V > 3001$	Alta
$3000 > V > 2001$	Normal
$V < 2000$	Deficiente

**Tabla 76.** Criterios para la velocidad de pulso ultrasónico (DURAR, 2000).

De acuerdo al manual de la Red DURAR (2000), la tabla setenta y siete muestra la calidad de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera B con base en la velocidad de pulso ultrasónico.

Número	Mezcla	Velocidad de Pulso Ultrasónico (V) (m/s) (Última medición)	Calidad del concreto
1	SACYR 1	4,571.92	Durable
2	SACYR 2	4,655.97	Durable
3	SACYR 3	4,581.72	Durable
4	SACYR 4	4,660.66	Durable
5	SACYR 5	4,721.37	Durable
6	SACYR 6	4,801.81	Durable

**Tabla 77.** Calidad de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera B, con base en los criterios de durabilidad establecidos por el manual de la Red DURAR (2000).



## **CAPITULO V. ELABORACIÓN DE UN MONOGRAMA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VIDA ÚTIL (TIEMPO DE INICIACIÓN) DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO A PARTIR DEL PARÁMETRO “ $q_b$ ” (AGE FACTOR BEFORE 28 DAYS CURED).**

---

Esta idea nace a partir de la siguiente premisa: “La resistencia a los 7 días normalmente se estima como 75% de la resistencia a los 28 días y las resistencias a los 56 y 90 días son aproximadamente 10% y 15% mayores que la resistencia a los 28 días” (*Kosmatka et al., 2004*), de lo anterior se podría decir que, el concreto adquiere o gana el mayor porcentaje de resistencia a la compresión durante los primeros 28 días de curado, después de este tiempo el concreto sigue adquiriendo mayor resistencia pero ya es mínima.

La resistencia a la compresión del concreto está íntimamente ligada con la porosidad de este, y la porosidad está ligada a su vez con los valores de resistividad eléctrica húmeda, es decir, cuanto mayor sea la resistencia del concreto a la compresión menor será la porosidad y por lo tanto los valores de resistividad eléctrica húmeda serán altos.

Entonces, antes y después de los 28 días de curado el incremento en los valores de resistividad eléctrica húmeda con respecto al tiempo serán totalmente diferentes. Es por ello que no es adecuado que un solo valor del factor edad “ $q$ ” represente el comportamiento de la curva de la resistividad eléctrica húmeda a través del tiempo.

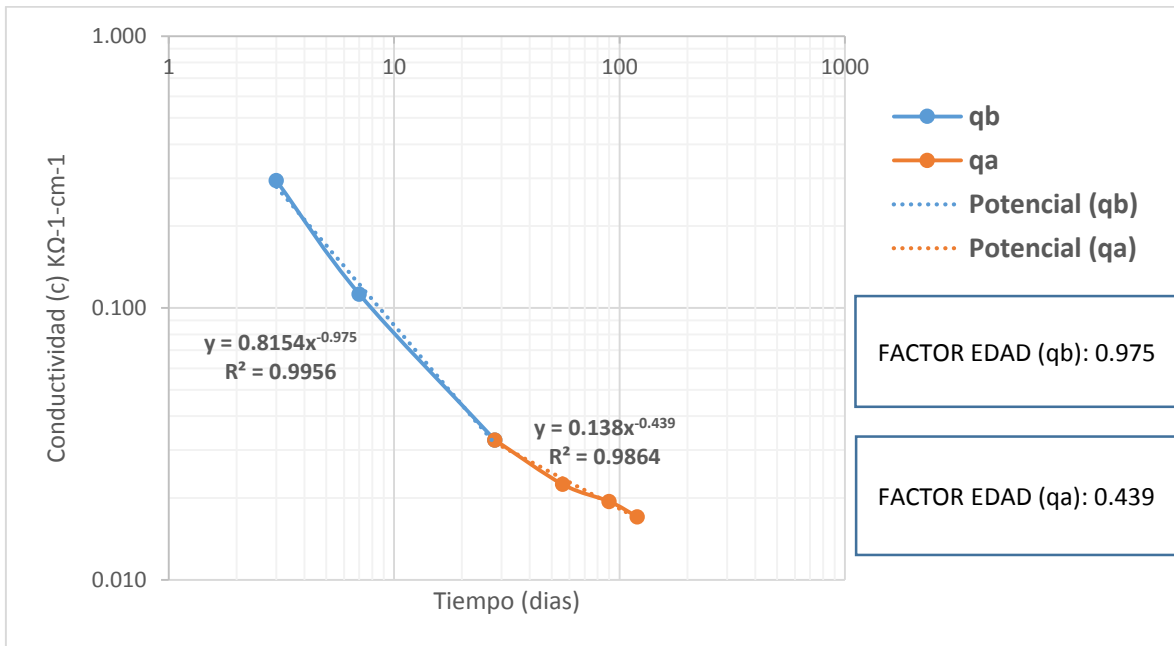
De acuerdo a lo anterior se propuso que:

- a) Cálculo del factor edad durante los primeros 28 días de curado de la mezcla de concreto “ $q_b$ ” (**Age Factor Before 28 Days Cured**), el cual se obtiene gráficamente, donde la pendiente del ajuste obtenido al representar el logaritmo de la inversa de la resistividad frente al logaritmo del tiempo (3 a 28 días) es el valor de “ $q_b$ ”.
- b) Cálculo del factor edad a partir del día número 28 de curado de la mezcla de concreto hasta el último día de medición “ $q_a$ ” (**Age Factor After 28 Days Cured**), el cual se obtiene gráficamente, donde la pendiente del ajuste obtenido al representar el logaritmo de la inversa de la resistividad frente al logaritmo del tiempo (28 a “ $n$ ” días) es el valor de “ $q_a$ ”.

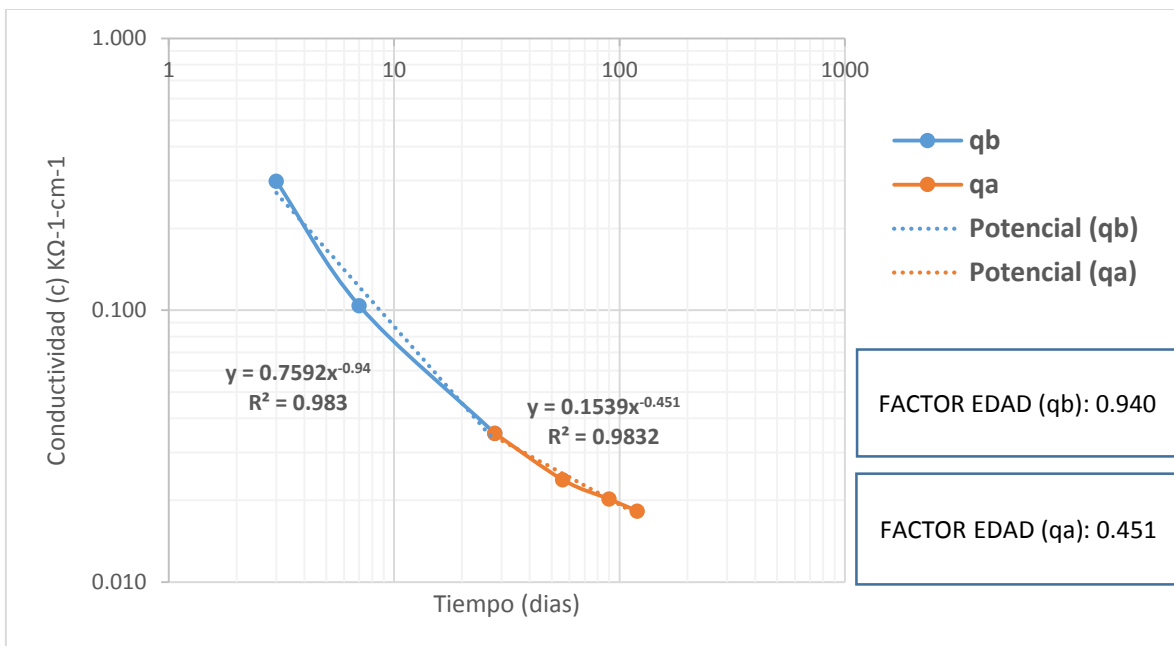
A continuación se muestran los valores de los factores “ $q_b$ ” y “ $q_a$ ” para las 7 mezclas de concreto elaboradas por la cementera A, más adelante se mostrarán los valores de los factores “ $q_b$ ” y “ $q_a$ ” para las 6 mezclas de concreto elaboradas por la cementera B.



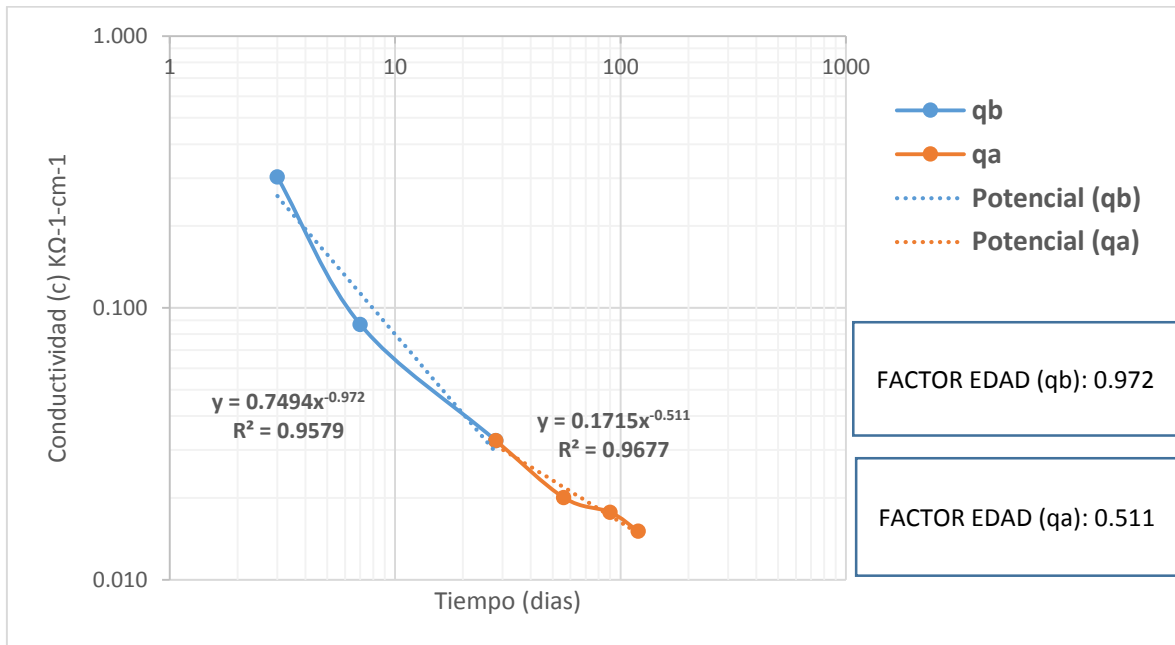
5.1. Valores de “q<sub>b</sub>” y “q<sub>a</sub>” para las mezcla elaboradas por la Cementara A.



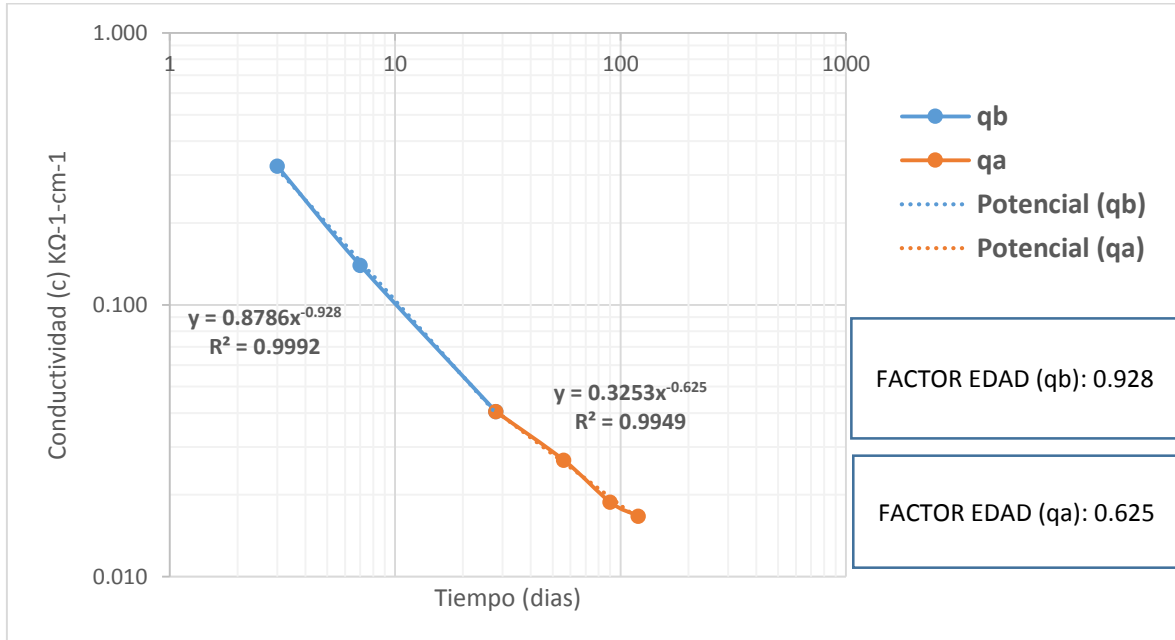
Gráfica 31. Factor edad q<sub>b</sub> y q<sub>a</sub> de la mezcla de concreto 1 (M-151).



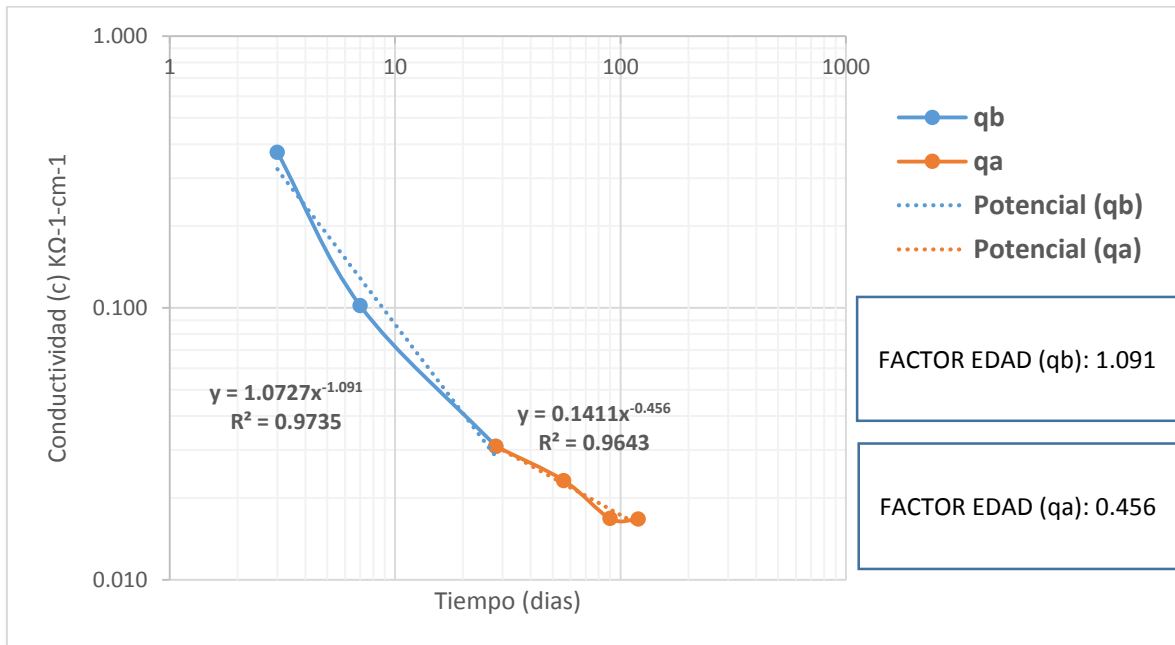
Gráfica 32. Factor edad q<sub>b</sub> y q<sub>a</sub> de la mezcla de concreto 2 (M-155).



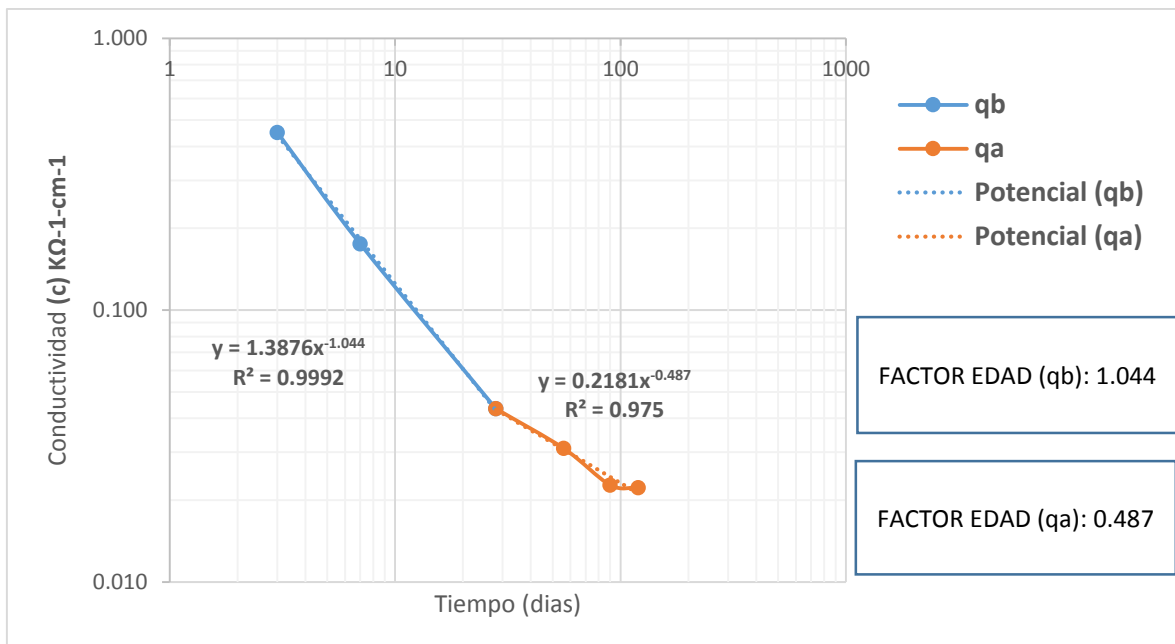
**Gráfica 33.** Factor edad  $q_b$  y  $q_a$  de la mezcla de concreto 3 (M-156).



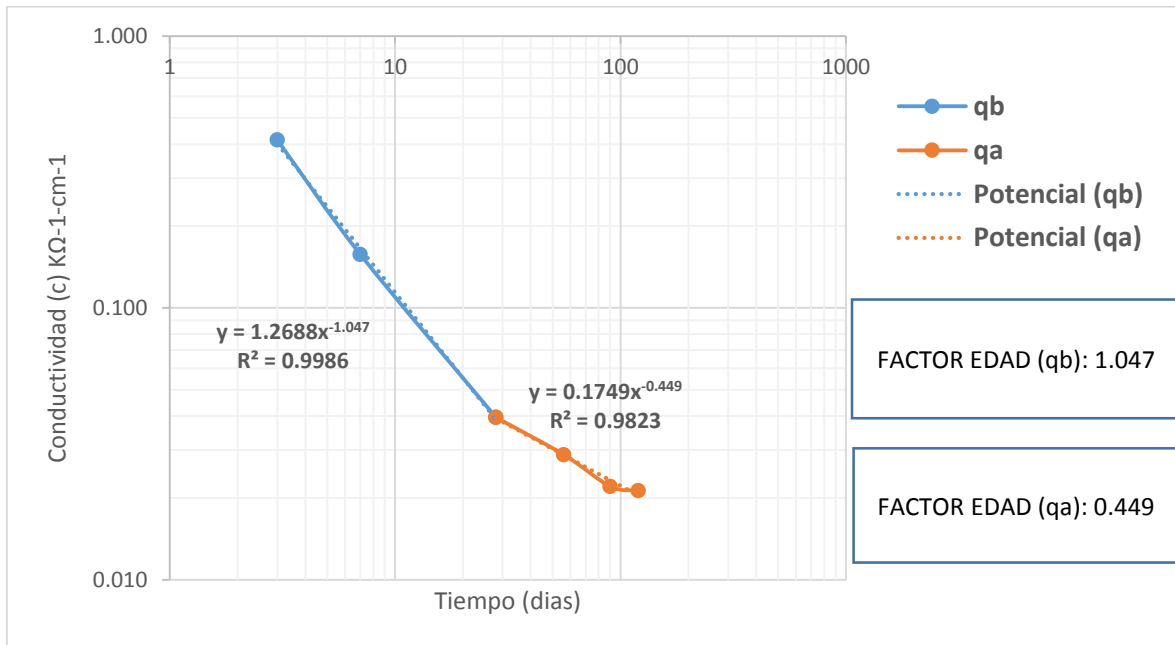
**Gráfica 34.** Factor edad  $q_b$  y  $q_a$  de la mezcla de concreto 4 (M-153).



**Gráfica 35.** Factor edad  $q_b$  y  $q_a$  de la mezcla de concreto 5 (M-153 B).



**Gráfica 36.** Factor edad  $q_b$  y  $q_a$  de la mezcla de concreto 6 (M-158).



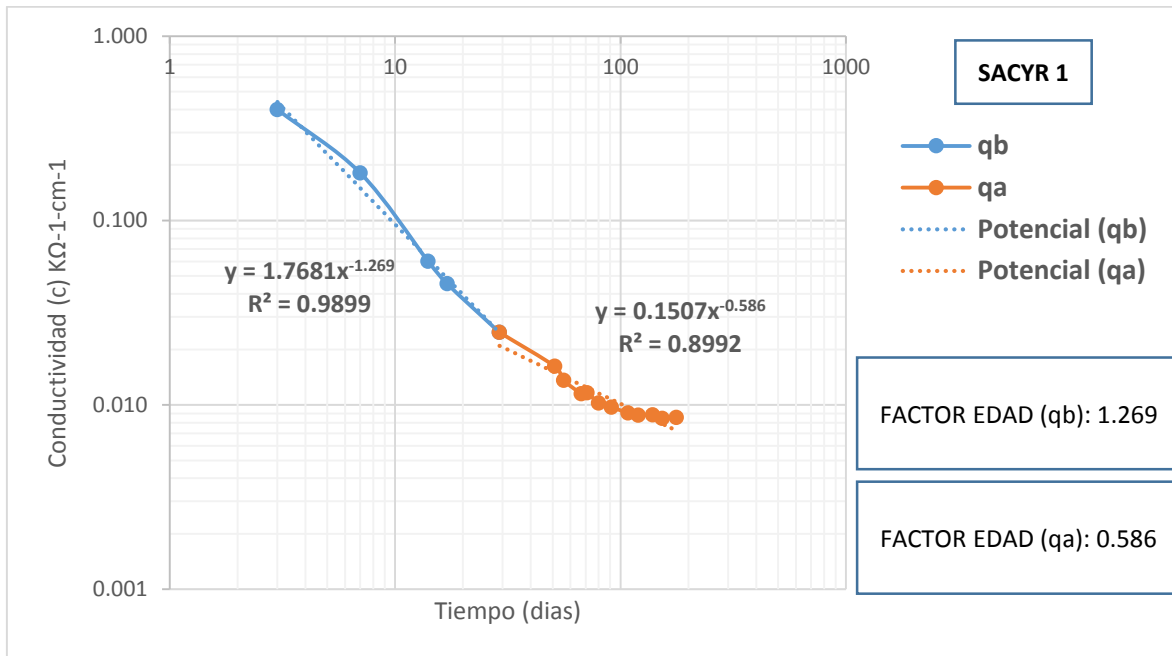
**Gráfica 37.** Factor edad  $q_b$  y  $q_a$  de la mezcla de concreto 7 (M-157).

Valores de "qb" y "qa" - Cementera A					
Número	Mezcla	Ecuación (qb)	Ecuación (qa)	qb	qa
1	M-151	$0.8154x^{-0.975}$	$0.138x^{-0.439}$	0.975	0.439
2	M-155	$0.7592x^{-0.94}$	$0.1539x^{-0.451}$	0.940	0.451
3	M-156	$0.7494x^{-0.972}$	$0.1715x^{-0.511}$	0.972	0.511
4	M-153	$0.8786x^{-0.928}$	$0.3253x^{-0.625}$	0.928	0.625
5	M-153 B	$1.0727x^{-1.091}$	$0.1411x^{-0.456}$	1.091	0.456
6	M-158	$1.3876x^{-1.044}$	$0.2181x^{-0.487}$	1.044	0.487
7	M-157	$1.2688x^{-1.047}$	$0.1749x^{-0.449}$	1.047	0.449

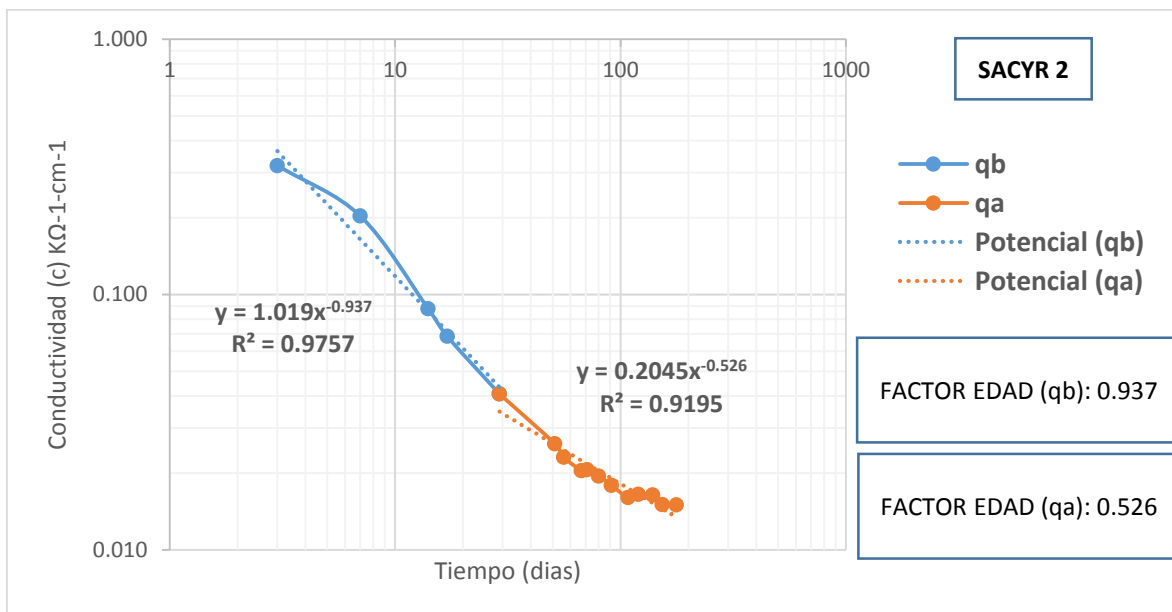
**Tabla 78.** Valores de "qb" y "qa" - Cementera A.



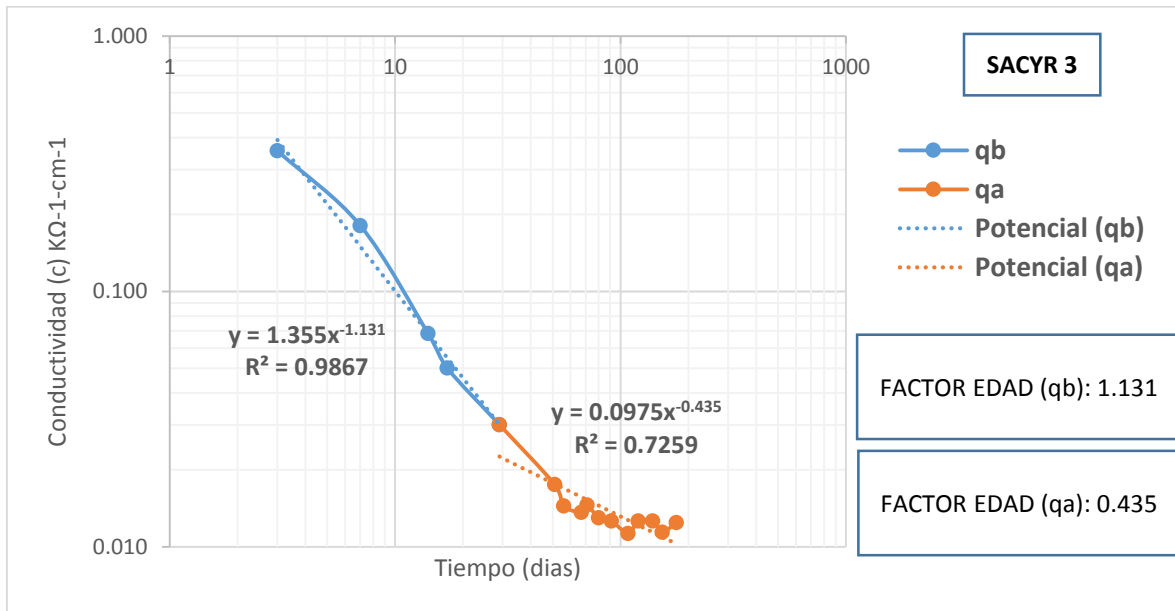
### 5.2. Valores de “q<sub>b</sub>” y “q<sub>a</sub>” para las mezcla elaboradas por la Cementara B.



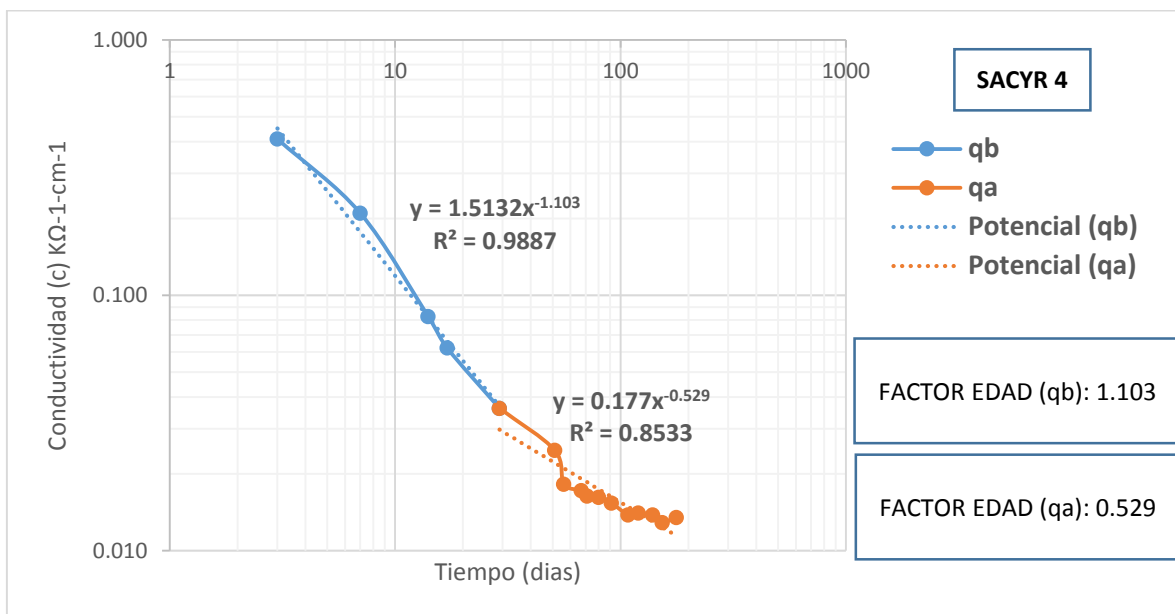
**Gráfica 38.** Factor edad q<sub>b</sub> y q<sub>a</sub> de la mezcla de concreto 1 (SACYR 1).



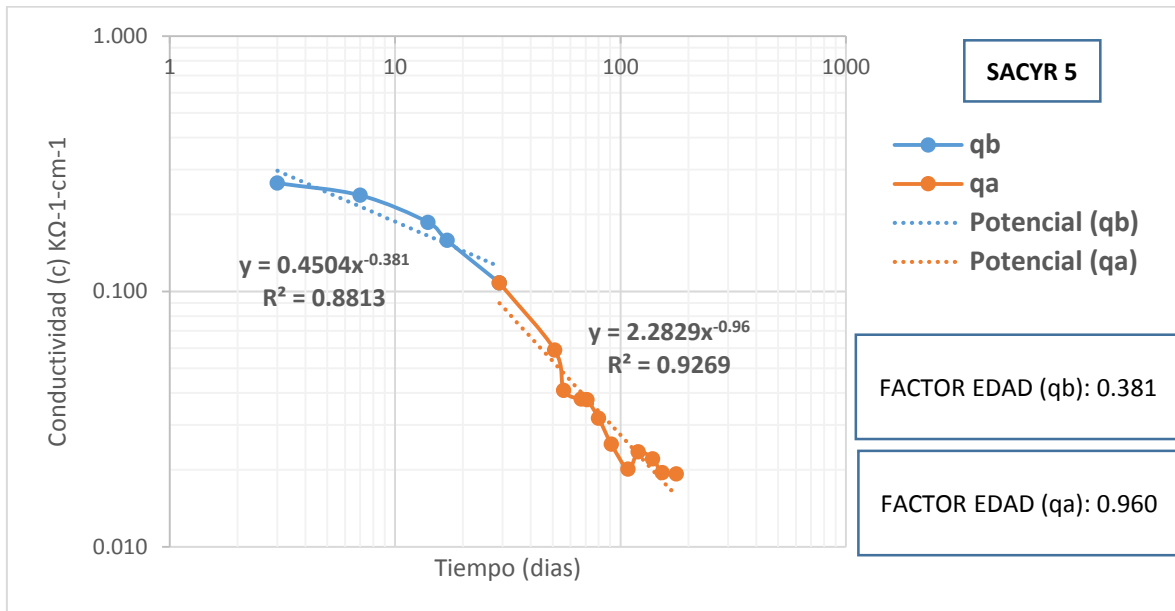
**Gráfica 39.** Factor edad q<sub>b</sub> y q<sub>a</sub> de la mezcla de concreto 2 (SACYR 2).



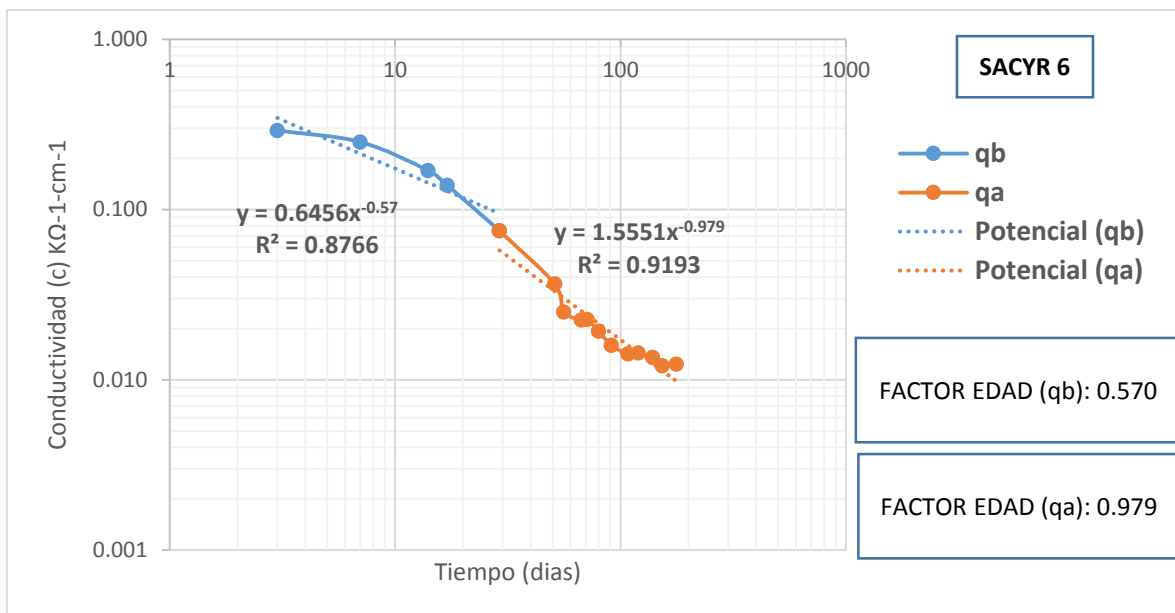
**Gráfica 40.** Factor edad  $q_b$  y  $q_a$  de la mezcla de concreto 3 (SACYR 3).



**Gráfica 41.** Factor edad  $q_b$  y  $q_a$  de la mezcla de concreto 4 (SACYR 4).



**Gráfica 42.** Factor edad  $q_b$  y  $q_a$  de la mezcla de concreto 5 (SACYR 5).



**Gráfica 43.** Factor edad  $q_b$  y  $q_a$  de la mezcla de concreto 6 (SACYR 6).



Valores de "q <sub>b</sub> " y "q <sub>a</sub> " - Cementera B					
Número	Mezcla	Ecuación (q <sub>b</sub> )	Ecuación (q <sub>a</sub> )	q <sub>b</sub>	q <sub>a</sub>
1	SACYR 1	$1.7681x^{-1.269}$	$0.1507x^{-0.586}$	1.269	0.586
2	SACYR 2	$1.019x^{-0.937}$	$0.2045x^{-0.526}$	0.937	0.526
3	SACYR 3	$1.355x^{-1.131}$	$0.0975x^{-0.435}$	1.131	0.435
4	SACYR 4	$1.5132x^{-1.103}$	$0.177x^{-0.529}$	1.103	0.529
5	SACYR 5	$0.4504x^{-0.381}$	$2.2829x^{-0.960}$	0.381	0.960
6	SACYR 6	$0.6456x^{-0.570}$	$1.5551x^{-0.979}$	0.570	0.979

**Tabla 79.** Valores de "q<sub>b</sub>" y "q<sub>a</sub>" - Cementera B.

Si analizamos los valores de los factores de edad q<sub>b</sub> y q<sub>a</sub> de las trece mezclas de concreto, nos percatamos que las mezclas cinco (SACYR 5) y seis (SACYR 6) pertenecientes a la cementera B son la únicas en donde el valor de q<sub>a</sub> es mayor que el valor de q<sub>b</sub>, esto resulta muy interesante debido al comportamiento que muestran dichas mezclas antes de los 28 días de curado, se podría decir que el proceso de hidratación es mucho más eficiente después de los 28 días de curado.

Para las mezclas de concreto SACYR 5 y SACYR 6 el incremento en cuanto al valor de resistividad eléctrica húmeda a partir de los 28 días de curado ronda entre 400 a 500% con respecto al último dato de resistividad eléctrica húmeda obtenido (t = "n").

En la tabla ochenta se muestran los porcentajes de resistividad eléctrica húmeda alcanzados por cada una de las 13 mezclas a los 28 días de curado, tomando en cuenta que la resistividad eléctrica húmeda total fue alcanzada a los 120 días de curado.



	Resistividad ( $\rho$ ) $K\Omega$ -cm (Laboratorio)				Resistividad desarrollada a los 28 días de curado (%)
	Número	Mezcla	Días		
			28	120	
Cementera A	1	M-151	30.60	58.65	52.18
	2	M-155	28.39	54.78	51.82
	3	M-156	30.80	66.35	46.43
	4	M-153	24.71	59.85	41.29
	5	M-153 B	32.33	59.78	54.08
	6	M-158	23.05	44.92	51.32
	7	M-157	25.28	47.06	53.73
Cementera B	1	SACYR 1	38.81	113.40	34.22
	2	SACYR 2	22.27	60.50	36.82
	3	SACYR 3	31.97	79.34	40.30
	4	SACYR 4	26.08	71.18	36.64
	5	SACYR 5	7.90	42.53	<b>18.58</b>
	6	SACYR 6	10.35	69.72	<b>14.84</b>

**Tabla 80.** Porcentaje de resistividad eléctrica húmeda obtenido a los 28 días de curado – Cementera A y B.

Como se mencionó con anterioridad, el porcentaje alcanzado por las mezclas 5 (SACYR 5) y 6 (SACYR 6) es muy bajo (alrededor del 16%) con respecto al alcanzado por las mezclas restantes. La resistividad eléctrica húmeda está relacionada con la porosidad (mediante la conductividad), por tal motivo se presentó una mayor reducción en la conductividad después de los 28 días de curado, donde el valor de  $q_a$  es mayor que el valor de  $q_b$  (observe la tabla setenta y nueve) por tanto, la “*velocidad de hidratación*” es mucho mayor en el periodo que abarca los 28 y 120 días de curado.

La determinación de la vida útil (Tiempo de iniciación) de las trece mezclas de concreto estará basada en el valor del factor “ $q_b$ ”, por tanto, este factor deberá representar de la manera más exacta el comportamiento de la curva de resistividad eléctrica húmeda o de la curva de conductividad a través del tiempo de curado.

Cuando nos referimos a representar de la manera más exacta el comportamiento de la curva ya sea de resistividad eléctrica húmeda o de conductividad es que la línea de tendencia potencial se ajuste lo más posible a los datos obtenidos en laboratorio.

Anteriormente solo calculábamos un factor edad “ $q$ ” para cada curva de resistividad eléctrica húmeda o de conductividad, es decir, solo se obtenía una pendiente para todo el tiempo de curado.



En la propuesta se maneja dividir en dos pendientes (factor edad es la pendiente de la curva de resistividad o conductividad a través del tiempo de curado representada en escala logarítmica base 10) la curva de resistividad o de conductividad, un factor que defina el comportamiento antes de los 28 días de curado “ $q_b$ ” y otro factor que defina el comportamiento de la curva después de los 28 días de curado hasta el último día de medición “ $q_a$ ”.

Con base en lo anterior, surge la siguiente pregunta:

- a) ¿Cuál de las dos formas (“ $q$ ” o “ $q_b$  y  $q_a$ ”) representará de la manera más exacta el comportamiento de la curva de resistividad o de conductividad? es decir que, la línea de tendencia potencial se ajuste lo más posible a los datos obtenidos en laboratorio, ya que un mejor ajuste a los datos de laboratorio se traduce en valores mucho más confiables del factor edad y por ende valores de vida útil más apegados a la realidad.

Para contestar la pregunta anterior se realizó una comparación entre los valores de resistividad eléctrica húmeda obtenidos en laboratorio y los obtenidos mediante:

- a) Cálculo de un solo factor edad “ $q$ ”.
- b) Cálculo de dos factores de edad ( $q_b$  y  $q_a$ ).

A partir de estas diferencias, se calculó el porcentaje de error de cada una de ellas para luego hacer una comparativa de cuál de las dos formas nos generaría un menor porcentaje de error.

### 5.3. Cálculo del Porcentaje de Error para las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera A.

Resistividad ( $\rho$ ) $K\Omega$ -cm (Medida en Laboratorio)							
Número	Mezcla	Días					
		3	7	28	56	90	120
1	M-151	3.40	8.88	30.60	44.55	51.47	58.65
2	M-155	3.35	9.61	28.39	42.03	49.49	54.78
3	M-156	3.30	11.50	30.80	49.90	56.46	66.35
4	M-153	3.09	7.16	24.71	37.29	53.20	59.85
5	M-153 B	2.67	9.82	32.33	43.15	59.57	59.78
6	M-158	2.22	5.70	23.05	32.27	43.97	44.92
7	M-157	2.41	6.35	25.28	34.68	45.35	47.06

**Tabla 81.** Valores de resistividad eléctrica húmeda obtenidos en laboratorio – Cementera A.



Resistividad (R) KΩ-cm (Calculada con el factor q)								
Número	Mezcla	Ecuación	Días					
			3	7	28	56	90	120
1	M-151	$0.5571x^{-0.768}$	4.17	8.00	23.20	39.51	56.88	70.94
2	M-155	$0.5286x^{-0.743}$	4.28	8.03	22.50	37.65	53.56	66.33
3	M-156	$0.5233x^{-0.778}$	4.49	8.68	25.54	43.79	63.34	79.22
4	M-153	$0.7061x^{-0.808}$	3.44	6.82	20.91	36.62	53.72	67.78
5	M-153 B	$0.6575x^{-0.821}$	3.75	7.52	23.45	41.43	61.17	77.47
6	M-158	$0.9379x^{-0.831}$	2.66	5.37	17.00	30.24	44.86	56.97
7	M-157	$0.8311x^{-0.816}$	2.95	5.89	18.25	32.13	47.32	59.84

**Tabla 82.** Valores de Resistividad Eléctrica Húmeda obtenidos a partir de una sola Línea de Tendencia Potencial “q”- Cementera A.

"Porcentaje de Error" Resistividad (ρ) KΩ-cm (Diferencia entre Laboratorio y factor q)								Error Promedio (%)
Número	Mezcla	Días						
		3	7	28	56	90	120	
1	M-151	22.79	9.95	24.19	11.32	10.50	20.96	<b>16.62</b>
2	M-155	27.76	16.47	20.76	10.43	8.23	21.07	<b>17.45</b>
3	M-156	36.22	24.51	17.10	12.25	12.18	19.41	<b>20.28</b>
4	M-153	11.44	4.70	15.38	1.79	0.99	13.25	<b>7.93</b>
5	M-153 B	40.13	23.47	27.45	3.98	2.69	29.59	<b>21.22</b>
6	M-158	19.77	5.83	26.26	6.28	2.01	26.82	<b>14.50</b>
7	M-157	22.29	7.34	27.82	7.35	4.33	27.16	<b>16.05</b>

**Tabla 83.** Porcentaje de error entre los valores de laboratorio y los obtenidos a partir del factor q – Cementera A.



Resistividad (R) KΩ-cm (Calculada con el factor qb y qa)										
Número	Mezcla	Ecuación (qb)	Ecuación (qa)	Días						
				3	7	28	28	56	90	120
1	M-151	$0.8154x^{-0.975}$	$0.138x^{-0.439}$	3.58	8.18	31.59	31.29	42.42	52.24	59.28
2	M-155	$0.7592x^{-0.94}$	$0.1539x^{-0.451}$	3.70	8.20	30.20	29.20	39.92	49.45	56.30
3	M-156	$0.7494x^{-0.972}$	$0.1715x^{-0.511}$	3.88	8.85	34.03	32.01	45.61	58.12	67.33
4	M-153	$0.8786x^{-0.928}$	$0.3253x^{-0.625}$	3.15	6.93	25.07	24.67	38.05	51.18	61.26
5	M-153 B	$1.0727x^{-1.091}$	$0.1411x^{-0.456}$	3.09	7.79	35.35	32.39	44.43	55.16	62.89
6	M-158	$1.3876x^{-1.044}$	$0.2181x^{-0.487}$	2.27	5.50	23.37	23.23	32.56	41.03	47.20
7	M-157	$1.2688x^{-1.047}$	$0.1749x^{-0.449}$	2.49	6.05	25.81	25.53	34.85	43.12	49.06

**Tabla 84.** Valores de Resistividad Eléctrica Húmeda obtenidos a partir de dos Líneas de Tendencia Potencial “qb” y “qa” – Cementera A.

"Porcentaje de Error" Resistividad (ρ) KΩ-cm (Diferencia entre Laboratorio y factor qb y qa)										Error Promedio (%)
Número	Mezcla	Días								
		3	7	28	28	56	90	120		
1	M-151	5.31	7.96	3.24	2.25	4.78	1.50	1.07	<b>3.73</b>	
2	M-155	10.45	14.67	6.37	2.87	5.03	0.09	2.76	<b>6.03</b>	
3	M-156	17.72	23.10	10.49	3.91	8.59	2.95	1.48	<b>9.75</b>	
4	M-153	2.18	3.26	1.45	0.17	2.05	3.79	2.36	<b>2.18</b>	
5	M-153 B	15.55	20.67	9.34	0.18	2.95	7.40	5.21	<b>8.76</b>	
6	M-158	2.30	3.66	1.35	0.78	0.91	6.70	5.06	<b>2.97</b>	
7	M-157	3.24	4.86	2.09	0.97	0.49	4.92	4.27	<b>2.98</b>	

**Tabla 85.** Porcentaje de error entre los valores de laboratorio y los obtenidos a partir de los factores “qb” y “qa” – Cementera A.



CEMENTERA A				
Número	Mezcla	Error Promedio (q) (%)	Error Promedio (qa y qb) (%)	Reducción de Error (%)
1	M-151	16.62	3.73	<b>77.55</b>
2	M-155	17.45	6.03	<b>65.42</b>
3	M-156	20.28	9.75	<b>51.92</b>
4	M-153	7.93	2.18	<b>72.50</b>
5	M-153 B	21.22	8.76	<b>58.73</b>
6	M-158	14.50	2.97	<b>79.53</b>
7	M-157	16.05	2.98	<b>81.45</b>

**Tabla 86.** Reducción del error de aproximación – Cementera A.



**5.4. Cálculo del Porcentaje de Error para las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera B.**

Resistividad Eléctrica ( $\rho$ ) K $\Omega$ -cm (Laboratorio)									
Número	Mezcla	Días							
		3	7	14	17	29	51	56	67
1	SACYR 1	2.50	5.52	16.63	22.00	40.40	61.72	73.49	86.75
2	SACYR 2	3.13	4.92	11.36	14.56	24.49	38.34	43.35	48.84
3	SACYR 3	2.81	5.52	14.62	19.93	<b>33.22</b>	57.01	69.18	73.24
4	SACYR 4	2.44	4.76	12.08	16.06	27.65	40.36	54.80	58.08
5	SACYR 5	3.77	4.21	5.36	6.32	9.26	16.95	24.40	26.43
6	SACYR 6	3.43	4.01	5.91	7.19	13.30	27.35	39.97	44.54

**Tabla 87.** Valores de Resistividad Eléctrica Húmeda obtenidos en laboratorio – Cementera B.

Resistividad Eléctrica ( $\rho$ ) K $\Omega$ -cm (Laboratorio)									
Número	Mezcla	Días							
		71	80	91	108	120	139	153	177
1	SACYR 1	85.83	97.51	102.60	110.59	113.40	113.08	118.38	116.67
2	SACYR 2	48.43	51.33	55.81	62.30	60.50	60.90	66.48	66.58
3	SACYR 3	68.68	77.00	79.21	88.58	79.34	79.31	87.58	80.34
4	SACYR 4	61.05	61.75	65.02	72.27	71.18	72.37	77.44	74.09
5	SACYR 5	26.56	31.38	39.62	49.62	42.53	45.28	51.31	51.91
6	SACYR 6	44.13	51.97	62.70	70.62	69.72	74.01	82.76	80.84

**Tabla 88.** Valores de Resistividad Eléctrica Húmeda obtenidos en laboratorio – Cementera B.



Resistividad (R) KΩ-cm (Calculada con el factor q)										
Número	Mezcla	Ecuación (q)	Días							
			3	7	14	17	29	51	56	67
1	SACYR 1	$0.8944x^{-0.982}$	3.29	7.56	14.93	18.06	30.52	53.13	58.24	69.45
2	SACYR 2	$0.7292x^{-0.807}$	3.33	6.59	11.54	13.49	20.76	32.75	35.31	40.81
3	SACYR 3	$0.7213x^{-0.879}$	3.64	7.67	14.10	16.73	26.75	43.94	47.70	55.85
4	SACYR 4	$0.89x^{-0.887}$	2.98	6.31	11.67	13.87	22.27	36.75	39.93	46.81
5	SACYR 5	$1.0553x^{-0.784}$	2.24	4.36	7.50	8.74	13.28	20.67	22.24	25.60
6	SACYR 6	$1.3831x^{-0.945}$	2.04	4.55	8.75	10.52	17.42	29.70	32.45	38.44

**Tabla 89.** Valores de Resistividad Eléctrica Húmeda obtenidos a partir de una sola Línea de Tendencia Potencial “q” – Cementera B.

Resistividad (R) KΩ-cm (Calculada con el factor q)										
Número	Mezcla	Ecuación (q)	Días							
			71	80	91	108	120	139	153	177
1	SACYR 1	$0.8944x^{-0.982}$	73.52	82.66	93.81	110.99	123.09	142.20	156.26	180.29
2	SACYR 2	$0.7292x^{-0.807}$	42.77	47.09	52.25	60.00	65.32	73.55	79.47	89.39
3	SACYR 3	$0.7213x^{-0.879}$	58.77	65.27	73.09	84.97	93.21	106.07	115.41	131.18
4	SACYR 4	$0.89x^{-0.887}$	49.28	54.78	61.42	71.49	78.50	89.43	97.37	110.81
5	SACYR 5	$1.0553x^{-0.784}$	26.79	29.42	32.55	37.22	40.43	45.37	48.91	54.83
6	SACYR 6	$1.3831x^{-0.945}$	40.61	45.45	51.34	60.36	66.68	76.61	83.88	96.27

**Tabla 90.** Valores de Resistividad Eléctrica Húmeda obtenidos a partir de una sola Línea de Tendencia Potencial “q” – Cementera B.



"Porcentaje de Error" Resistividad (R) KΩ-cm (Calculada con el factor q)										
Número	Mezcla	Ecuación (q)	Días							
			3	7	14	17	29	51	56	67
1	SACYR 1	$0.8944x^{-0.982}$	31.52	36.90	10.25	17.92	24.46	13.92	20.76	19.94
2	SACYR 2	$0.7292x^{-0.807}$	6.45	33.93	1.54	7.33	15.21	14.59	18.55	16.43
3	SACYR 3	$0.7213x^{-0.879}$	29.43	38.88	3.52	16.07	19.48	22.93	31.05	23.75
4	SACYR 4	$0.89x^{-0.887}$	22.02	32.49	3.36	13.65	19.44	8.94	27.14	19.40
5	SACYR 5	$1.0553x^{-0.784}$	40.49	3.59	39.89	38.25	43.46	21.93	8.84	3.13
6	SACYR 6	$1.3831x^{-0.945}$	40.55	13.33	48.16	46.21	30.97	8.62	18.81	13.69

**Tabla 91.** Porcentaje de error entre los valores de laboratorio y los obtenidos a partir del factor q – Cementera B.

"Porcentaje de Error" Resistividad (R) KΩ-cm (Calculada con el factor q)											Promedio de Error (%)
Número	Mezcla	Ecuación (q)	Días								
			71	80	91	108	120	139	153	177	
1	SACYR 1	$0.8944x^{-0.982}$	14.35	15.23	8.57	0.36	8.55	25.75	31.99	54.54	<b>20.94</b>
2	SACYR 2	$0.7292x^{-0.807}$	11.70	8.25	6.38	3.69	7.97	20.77	19.54	34.26	<b>14.16</b>
3	SACYR 3	$0.7213x^{-0.879}$	14.43	15.24	7.72	4.07	17.49	33.74	31.77	63.28	<b>23.30</b>
4	SACYR 4	$0.89x^{-0.887}$	19.28	11.28	5.55	1.08	10.28	23.57	25.74	49.55	<b>18.30</b>
5	SACYR 5	$1.0553x^{-0.784}$	0.88	6.25	17.85	24.98	4.93	0.19	4.68	5.62	<b>16.56</b>
6	SACYR 6	$1.3831x^{-0.945}$	7.99	12.53	18.12	14.53	4.37	3.51	1.36	19.09	<b>18.86</b>

**Tabla 92.** Porcentaje de error entre los valores de laboratorio y los obtenidos a partir del factor q – Cementera B.



Resistividad (R) KΩ-cm (Calculada con el factor qb y qa)										
Número	Mezcla	Días								
		3	7	14	17	29	29	51	56	67
1	SACYR 1	2.28	6.68	16.10	20.60	40.58	47.74	66.45	70.20	77.98
2	SACYR 2	2.75	6.08	11.63	13.96	23.02	28.74	38.68	40.63	44.65
3	SACYR 3	2.56	6.67	14.60	18.18	33.27	44.38	56.73	59.08	63.88
4	SACYR 4	2.22	5.65	12.14	15.04	27.11	33.55	45.22	47.51	52.24
5	SACYR 5	3.37	4.66	6.07	6.53	8.01	11.10	19.09	20.88	24.81
6	SACYR 6	2.90	4.70	6.97	7.79	10.56	17.38	30.20	33.09	39.44

**Tabla 93.** Valores de Resistividad Eléctrica Húmeda obtenidos a partir de dos Líneas de Tendencia Potencial “q<sub>b</sub>” y “q<sub>a</sub>” – Cementera B.

Resistividad (R) KΩ-cm (Calculada con el factor qb y qa)									
Número	Mezcla	Días							
		71	80	91	108	120	139	153	177
1	SACYR 1	80.67	86.52	93.30	103.15	109.72	119.59	126.51	137.78
2	SACYR 2	46.03	49.02	52.45	57.40	60.67	65.54	68.94	74.43
3	SACYR 3	65.51	69.00	72.98	78.62	82.31	87.74	91.48	97.47
4	SACYR 4	53.87	57.38	61.43	67.25	71.11	76.86	80.86	87.34
5	SACYR 5	26.23	29.41	33.28	39.23	43.40	49.98	54.80	63.03
6	SACYR 6	41.75	46.92	53.23	62.95	69.78	80.58	88.52	102.10

**Tabla 94.** Valores de Resistividad Eléctrica Húmeda obtenidos a partir de dos Líneas de Tendencia Potencial “q<sub>b</sub>” y “q<sub>a</sub>” – Cementera B.



"Porcentaje de Error" Resistividad (R) KΩ-cm (Calculada con el factor qb y qa)										
Número	Mezcla	Días								
		3	7	14	17	29	29	51	56	67
1	SACYR 1	8.81	21.05	3.17	6.37	0.44	18.16	7.67	4.48	10.11
2	SACYR 2	12.13	23.42	2.40	4.16	6.00	17.37	0.89	6.28	8.58
3	SACYR 3	9.12	20.72	0.13	8.77	0.14	33.57	0.50	14.60	12.79
4	SACYR 4	9.01	18.64	0.51	6.35	1.94	21.34	12.05	13.29	10.04
5	SACYR 5	10.44	10.80	13.16	3.42	13.47	19.95	12.60	14.42	6.15
6	SACYR 6	15.64	17.04	17.98	8.26	20.63	30.61	10.42	17.20	11.44

**Tabla 95.** Porcentaje de error entre los valores de laboratorio y los obtenidos a partir de los factores “qb” y “qa” – Cementera B.

"Porcentaje de Error" Resistividad (R) KΩ-cm (Calculada con el factor qb y qa)										Promedio de Error (%)
Número	Mezcla	Días								
		71	80	91	108	120	139	153	177	
1	SACYR 1	6.01	11.27	9.07	6.73	3.24	5.75	6.86	18.10	<b>8.66</b>
2	SACYR 2	4.96	4.50	6.02	7.86	0.28	7.63	3.70	11.79	<b>7.53</b>
3	SACYR 3	4.62	10.39	7.87	11.24	3.74	10.63	4.46	21.32	<b>10.27</b>
4	SACYR 4	11.76	7.07	5.53	6.95	0.10	6.20	4.42	17.88	<b>9.00</b>
5	SACYR 5	1.26	6.29	16.00	20.94	2.06	10.38	6.81	21.42	<b>11.15</b>
6	SACYR 6	5.41	9.71	15.11	10.87	0.09	8.88	6.96	26.30	<b>13.68</b>

**Tabla 96.** Porcentaje de error entre los valores de laboratorio y los obtenidos a partir de los factores “qb” y “qa” – Cementera B.



CEMENTERA B				
Número	Mezcla	Error Promedio (q) (%)	Error Promedio (qa y qb) (%)	Reducción de Error (%)
1	SACYR 1	20.94	8.66	<b>58.62</b>
2	SACYR 2	14.16	7.53	<b>46.85</b>
3	SACYR 3	23.30	10.27	<b>55.93</b>
4	SACYR 4	18.30	9.00	<b>50.79</b>
5	SACYR 5	16.56	11.15	<b>32.67</b>
6	SACYR 6	18.86	13.68	<b>27.49</b>

**Tabla 97.** Reducción del error de aproximación – Cementera B.

Como se puede observar en las tablas ochenta y seis y noventa y siete, las líneas de tendencia potencial que nos producen un menor error son “q<sub>b</sub>” y “q<sub>a</sub>” con respecto al error que nos produce utilizar solamente el valor de “q”. Por tal motivo el obtener dos pendientes o dos líneas de tendencia potencial a través del tiempo (una línea de tendencia antes y después de los 28 días de curado) mejora significativamente el ajuste y por ende el valor del factor edad.

### 5.5. Cálculo del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo para un periodo de iniciación de 100 años.

Ahora bien, contamos con dos valores “q<sub>a</sub>” y “q<sub>b</sub>”, los cuales utilizaremos para el cálculo de la vida útil (Periodo de iniciación o Tiempo de Iniciación) empleando la siguiente fórmula:

**Periodo de Iniciación (T<sub>i</sub>).**

$$T_i = \frac{x^2 \rho_{ef,0} \left(\frac{t_n}{t_0}\right)^q}{F_{exp}} r_{cl} \quad (38)$$

Donde:

$x$  = Recubrimiento (cm).

$\rho_{ef,0}$  = Resistividad a la edad  $t_0$  (28 días) en  $\Omega - cm$ .



$t_0$  = Primera edad de medida de la resistividad para el factor de edad, 28 días.

$t_n$  = Edad última de medida para el factor de edad (días).

$q$  = factor de edad (adimensional).

$F_{exp}$  = Factor de exposición ambiental ( $\Omega - cm^3/año$ ).

$r_{cl}$  = Factor de retardo (adimensional).

Recordemos que el periodo de iniciación ( $T_i$ ) corresponde al tiempo en que el frente de cloruros tarda en atravesar el recubrimiento que protege al acero de refuerzo, el factor de retardo  $r_{cl}$  es un valor que toma en cuenta la cantidad de cloruros que quedan combinados en relación al flujo de iones cloruro, es decir, representa la cantidad de cloruros que no avanzan porque se combinan con las fases del cemento y el factor de exposición ambiental  $F_{exp}$  depende del clima (cantidad de cloruros), toma en cuenta el grado de agresividad ambiental (PNE 83994-2, 2016).

Para nuestro caso no sabemos con exactitud los valores del  $F_{exp}$  y del  $r_{cl}$ , para ello nos apoyaremos en las siguientes tablas:

CLORUROS	Tipo de Cemento	Factor de retardo
	Tipo I	1.30
	Tipo II y III/A	1.50
	Tipo III/B, III/C y IV	2.00

**Tabla 98.** Valores simplificados del factor de Retardo (PNE 83994-2, 2016).

Clase de exposición	$F_{exp,cl}$ ( $\Omega - cm^3/año$ )
XS1 - IIIa-aéreo (> 500 m de la costa)	5,000
XS1 - IIIa-aéreo (< 500 m de la costa)	10,000
XS2 - IIIb	17,000
XS3 - IIIc	25,000

**Tabla 99.** Valores del factor de exposición ambiental  $F_{cl}$  en función de la clase de ambiente (PNE 83994-2, 2016).



Podemos observar que los parámetros que se requieren para el cálculo del periodo de iniciación son siete. Los valores de los parámetros  $\rho_{ef,0}$ ,  $t_0$ ,  $t_n$  y  $q$  dependen del comportamiento de la curva de resistividad eléctrica húmeda o de la curva de conductividad, ya que de estas se desprenden los valores de “ $q_b$ ” y “ $q_a$ ”.

La fórmula para el cálculo del periodo de iniciación requiere el valor de “ $q$ ” que represente la edad última de medida, es por ello que se empleará el valor de “ $q_a$ ”.

El valor del parámetro  $x$  (recubrimiento del acero de refuerzo) será propuesto, el cual en función con los demás parámetros deberá garantizar un periodo de iniciación de por lo menos 100 años, es decir:

$$100 = \frac{x^2 \rho_{ef,0} \left(\frac{t_n}{t_0}\right) q_a}{F_{exp}} r_{cl} \quad (39)$$

En cuanto a los parámetros  $F_{exp}$  y  $r_{cl}$ , nos apoyaremos en los valores contenidos en las tablas noventa y ocho y noventa y nueve, pero ¿Qué combinaciones de valores de estos dos parámetros utilizar?, ¿Cuál combinación de valores nos producirá el menor espesor de recubrimiento y cuál combinación el mayor espesor de recubrimiento?, para ello, se realizó una tabla (tabla cien) que contiene todas las posibles combinaciones de valores de los parámetros  $F_{exp}$  y  $r_{cl}$ .

Si el valor del periodo de iniciación es constante (100 años), y se buscan las posibles combinaciones de valores de los parámetros  $F_{exp}$  y  $r_{cl}$ , entonces el espesor de recubrimiento  $x$  quedaría como la única variable de la ecuación, es por ello que:

$$x = \sqrt{\frac{100 F_{exp}}{\rho_{ef,0} \left(\frac{t_n}{t_0}\right) q_a r_{cl}}} \quad (40)$$

Se conocen los valores de  $\rho_{ef,0}$ ,  $t_0$ ,  $t_n$ ,  $q_a$  y  $T_i$  (Para este caso 100 años), por lo que obtenemos un nuevo factor:

$$E_{F_{exp}, r_{cl}} = \sqrt{\frac{F_{exp}}{r_{cl}}} \quad (41)$$

Entre mayor sea el valor del factor  $E_{F_{exp}, r_{cl}}$  mayor será el espesor de recubrimiento del acero de refuerzo, lo que nos lleva a pensar que la situación más desfavorable será cuando  $F_{exp} = 25,000$  y  $r_{cl} = 1.30$  (Ver tabla cien).

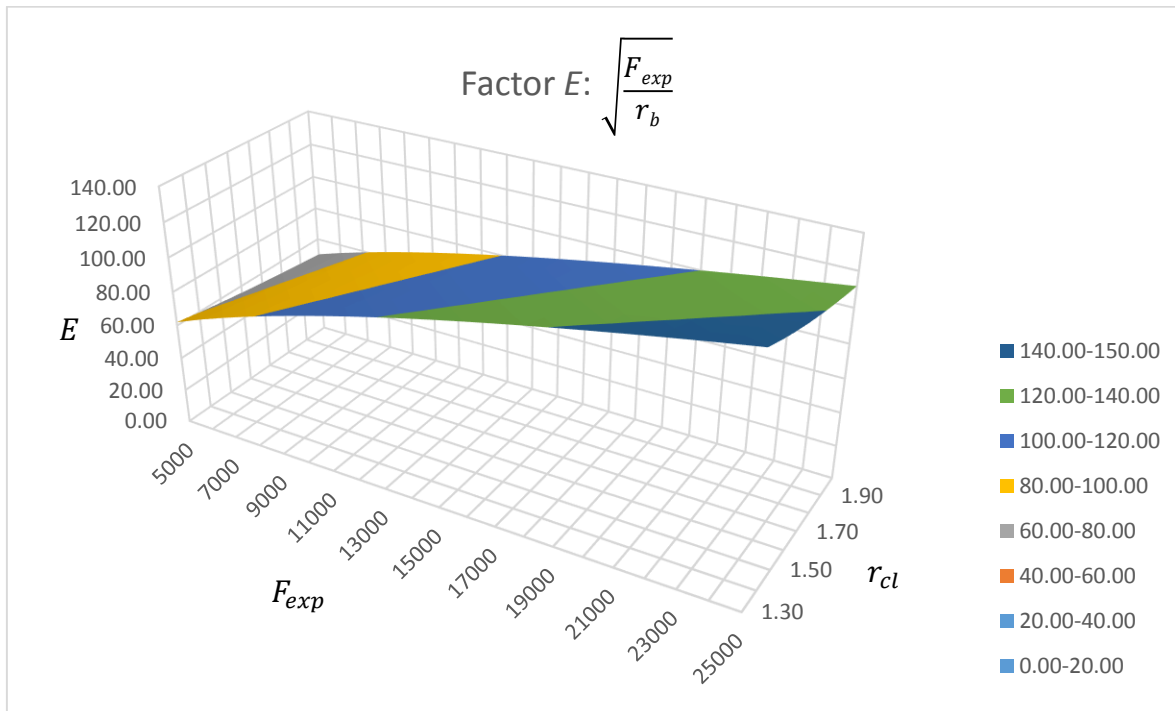


		(Factor de Retardo $r_{cl}$ )							
		1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00
$(F_{exp})$	5000	62.02	59.76	57.74	55.90	54.23	52.70	51.30	50.00
	6000	67.94	65.47	63.25	61.24	59.41	57.74	56.20	54.77
	7000	73.38	70.71	68.31	66.14	64.17	62.36	60.70	59.16
	8000	78.45	75.59	73.03	70.71	68.60	66.67	64.89	63.25
	9000	83.21	80.18	77.46	75.00	72.76	70.71	68.82	67.08
	10000	87.71	84.52	81.65	79.06	76.70	74.54	72.55	70.71
	11000	91.99	88.64	85.63	82.92	80.44	78.17	76.09	74.16
	12000	96.08	92.58	89.44	86.60	84.02	81.65	79.47	77.46
	13000	100.00	96.36	93.09	90.14	87.45	84.98	82.72	80.62
	14000	103.77	100.00	96.61	93.54	90.75	88.19	85.84	83.67
	15000	107.42	103.51	100.00	96.82	93.93	91.29	88.85	86.60
	16000	110.94	106.90	103.28	100.00	97.01	94.28	91.77	89.44
	17000	114.35	110.19	106.46	103.08	100.00	97.18	94.59	92.20
	18000	117.67	113.39	109.54	106.07	102.90	100.00	97.33	94.87
	19000	120.89	116.50	112.55	108.97	105.72	102.74	100.00	97.47
	20000	124.03	119.52	115.47	111.80	108.47	105.41	102.60	100.00
	21000	127.10	122.47	118.32	114.56	111.14	108.01	105.13	102.47
22000	130.09	125.36	121.11	117.26	113.76	110.55	107.61	104.88	
23000	133.01	128.17	123.83	119.90	116.32	113.04	110.02	107.24	
24000	135.87	130.93	126.49	122.47	118.82	115.47	112.39	109.54	
25000	138.68	133.63	129.10	125.00	121.27	117.85	114.71	111.80	

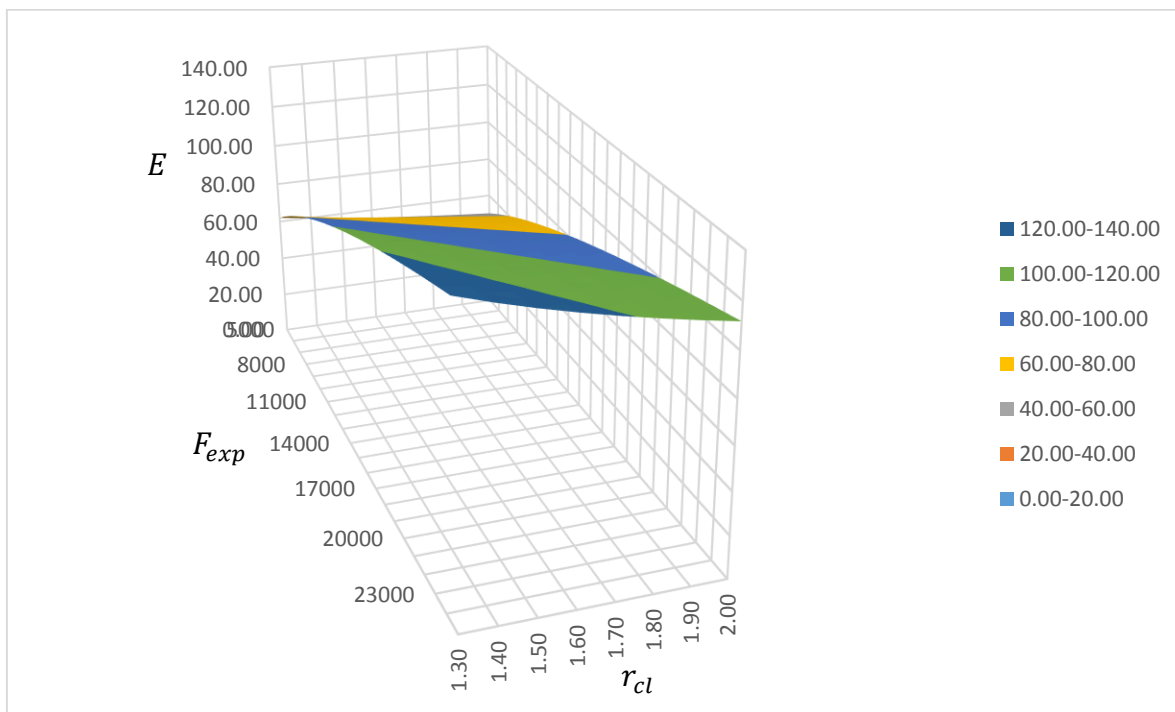
**Tabla 100.** Posibles combinaciones de  $F_{exp}$  y  $r_{cl}$ .

Los cuadros que se encuentran resaltados representan los vértices de nuestra área de estudio, como se puede observar la celda que se encuentra resaltada en color naranja representa la combinación de valores más crítica (generando el mayor espesor de recubrimiento del acero de refuerzo), contrario a esto la casilla que contiene el valor de cincuenta representa la situación más favorable (generando el menor espesor de recubrimiento del acero de refuerzo).

Los valores contenidos en la tabla cien se graficaron en 3D, con el objetivo de visualizar de mejor manera la combinación de valores de los parámetros  $F_{exp}$  y  $r_{cl}$ , ya sea la combinación más crítica o más favorable.



**Gráfica 44.** Superficie del Factor  $E$  – Vista A.



**Gráfica 45.** Superficie del Factor  $E$  – Vista B.



De las gráficas 44 y 45 se concluye lo siguiente:

- a) El punto más desfavorable presenta las siguientes coordenadas:

$$P_1 (1.30, 25,000 ,138.68)$$

- b) El punto más favorable presenta las siguientes coordenadas:

$$P_2 (2.00, 5,000 ,50)$$

El cálculo del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo se realizará con los datos del punto  $P_1$ , ya que este punto coordinado representa la situación más desfavorable y por ende se pondrá a prueba el desempeño (en términos de durabilidad) de cada una de las 13 mezcla de concreto elaboradas.

Por lo tanto, los valores que tomarán cada uno de los parámetros serán:

$\rho_{ef,0}$  = El valor estará en funcion de la mezcla de concreto a analizar ( $\Omega - cm$ ).

$t_0$  = 28 dias.

$t_n$  = 120 dias.

$q_a$  = El valor estará en funcion de la mezcla de concreto a analizar (adimensional).

$F_{exp}$  = 25,000 ( $\Omega - cm^3/año$ ).

$r_{cl}$  = 1.30 (adimensional).

$T_i$  = 100 (años)

La fórmula para el cálculo del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo es:

$$x = \sqrt{\frac{T_i F_{exp}}{\rho_{ef,0} \left(\frac{t_n}{t_0}\right)^{q_a} r_{cl}}} \quad (42)$$



CÁLCULO DEL ESPESOR DE RECUBRIMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO.							
Número	Mezcla	Factor $q_a$ (Ad.)	Resistividad (R) 28 días (K $\Omega$ -cm)	Factor de Retardo (Ad.)	Factor de Exposición ( $\Omega$ -cm <sup>3</sup> /año)	Recubrimiento del Acero de Refuerzo (cm)	Tiempo de Iniciación (Ti) (años)
1	M-151	0.439	31.29	1.30	25000	5.70	100.00
2	M-155	0.451	29.20	1.30	25000	5.84	100.00
<b>3</b>	<b>M-156</b>	<b>0.511</b>	<b>32.01</b>	<b>1.30</b>	<b>25000</b>	<b>5.34</b>	<b>100.00</b>
4	M-153	0.625	24.67	1.30	25000	5.60	100.00
5	M-153 B	0.456	32.39	1.30	25000	5.53	100.00
6	M-158	0.487	23.23	1.30	25000	6.38	100.00
7	M-157	0.449	25.53	1.30	25000	6.26	100.00

**Tabla 101.** Cálculo del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo para las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera A.

CÁLCULO DEL ESPESOR DE RECUBRIMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO.							
Número	Mezcla	Factor $q_a$ (Ad.)	Resistividad (R) 28 días (K $\Omega$ -cm)	Factor de Retardo (Ad.)	Factor de Exposición ( $\Omega$ -cm <sup>3</sup> /año)	Recubrimiento del Acero de Refuerzo (cm)	Tiempo de Iniciación (Ti) (años)
<b>1</b>	<b>SACYR 1</b>	<b>0.586</b>	<b>38.81</b>	<b>1.30</b>	<b>25000</b>	<b>4.60</b>	<b>100.00</b>
2	SACYR 2	0.526	22.27	1.30	25000	6.34	100.00
3	SACYR 3	0.435	31.97	1.30	25000	5.65	100.00
4	SACYR 4	0.529	26.08	1.30	25000	5.84	100.00
5	SACYR 5	0.960	7.90	1.30	25000	7.76	100.00
6	SACYR 6	0.979	10.35	1.30	25000	6.69	100.00

**Tabla 102.** Cálculo del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo para las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera B.

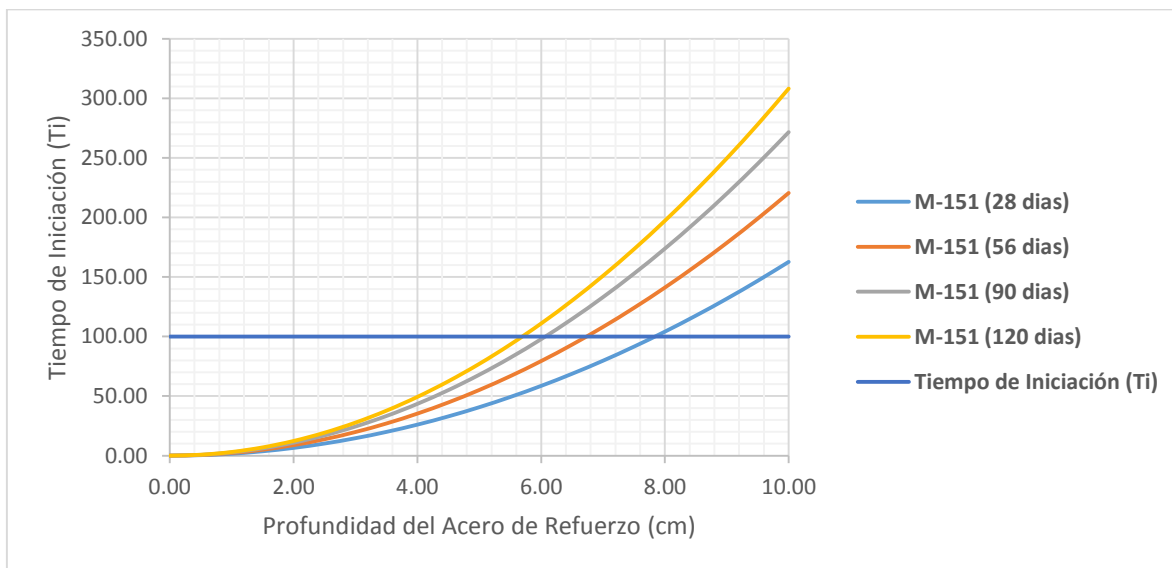
De las tablas anteriores se concluye que, la mezcla que presenta un mejor desempeño en términos de durabilidad es la mezcla número 1 (SACYR 1) elaborada por la cementera B, nótese que, de las 13 mezclas analizadas la mezcla número 1 (SACYR 1) es la que presenta un mayor valor de resistividad eléctrica húmeda a los 28 días.



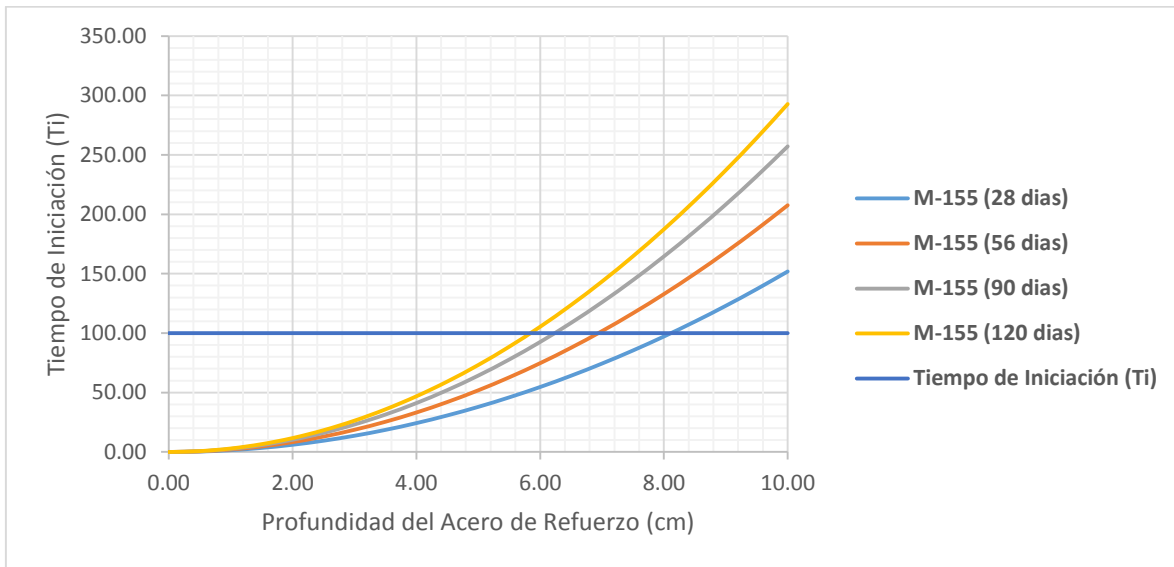
Por ende, se podría decir que el valor de la resistividad eléctrica húmeda obtenido a los 28 días de curado presenta una mayor influencia en el cálculo del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo. Es decir, un valor alto del factor edad “ $q_a$ ” no te garantiza un espesor de recubrimiento del acero de refuerzo mucho menor, para lograr esto es necesario obtener valores altos de resistividad eléctrica húmeda a los 28 días.

A continuación se presenta la evolución del periodo de iniciación ( $T_i$ ) de cada una de las mezclas de concreto elaboradas, con la finalidad de observar como el espesor de recubrimiento del acero de refuerzo tiende a disminuir conforme los valores de resistividad eléctrica húmeda aumentan con el tiempo.

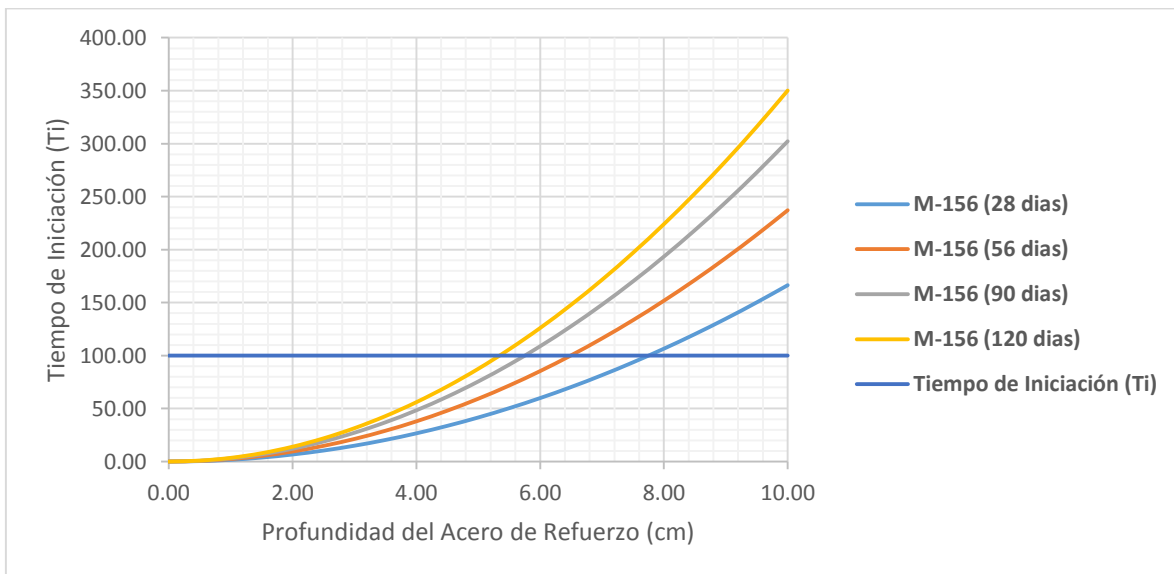
### 5.6. Evolución del periodo de iniciación ( $T_i$ ) - Cementera A.



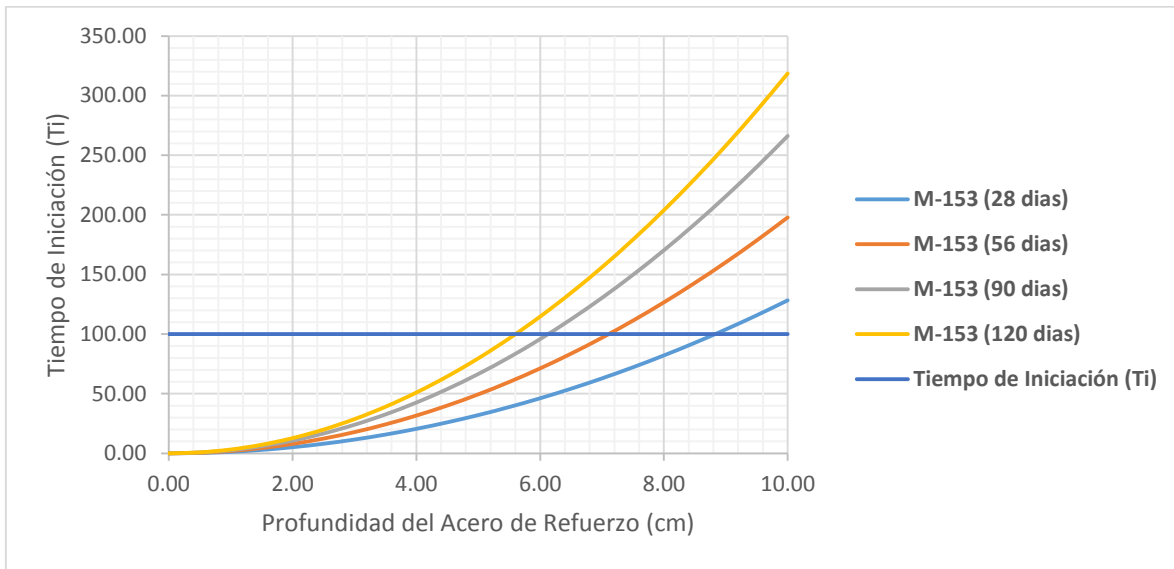
**Gráfica 46.** Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla M-151.



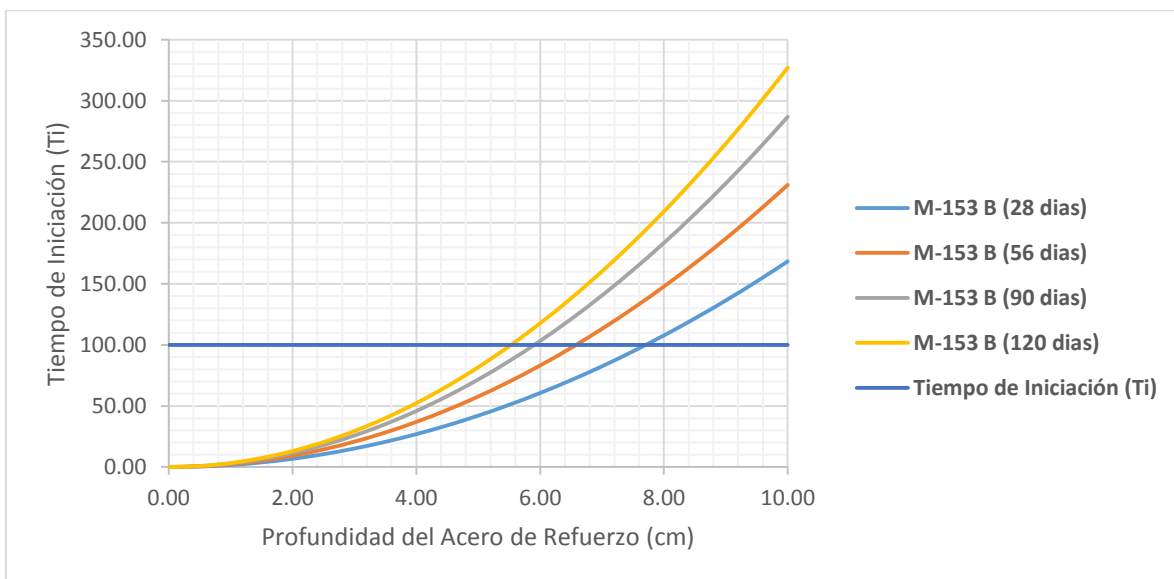
**Gráfica 47.** Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla M-155.



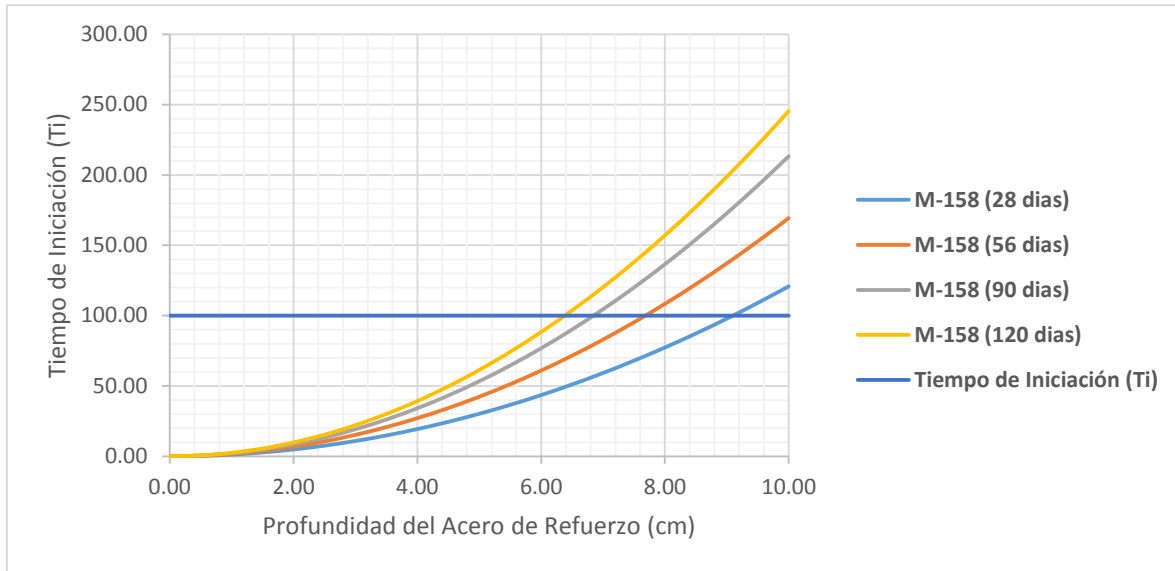
**Gráfica 48.** Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla M-156.



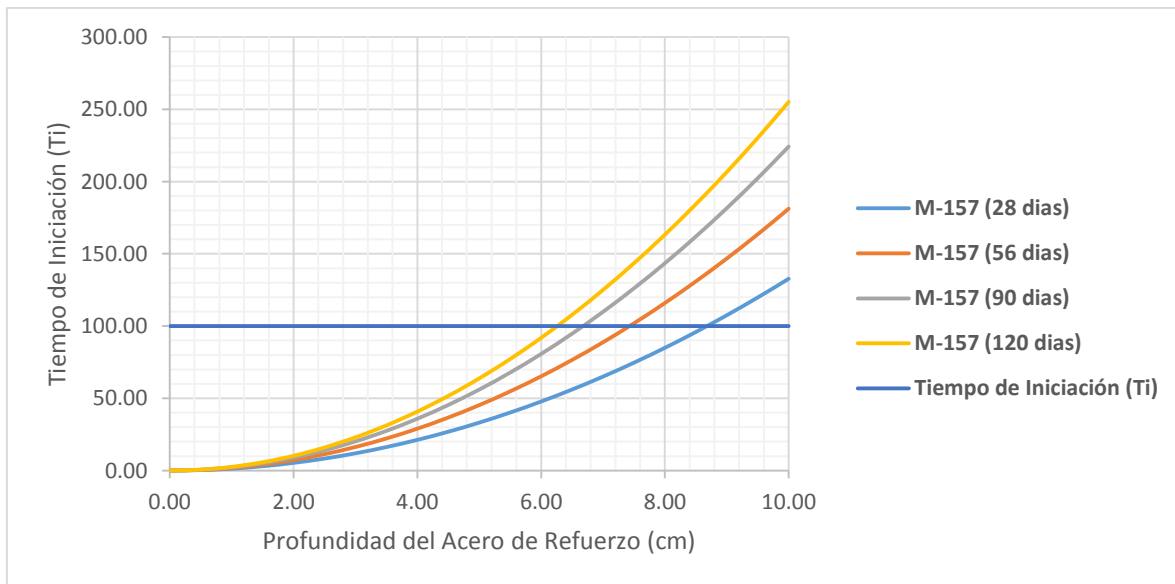
**Gráfica 49.** Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla M-153.



**Gráfica 50.** Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla M-153 B.



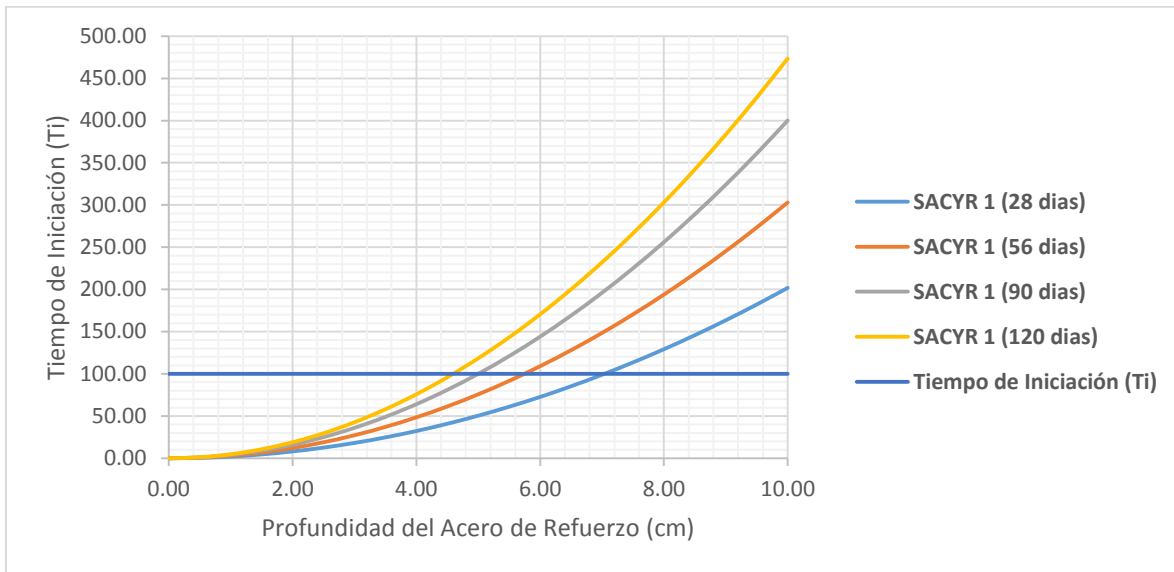
**Gráfica 51.** Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla M-158.



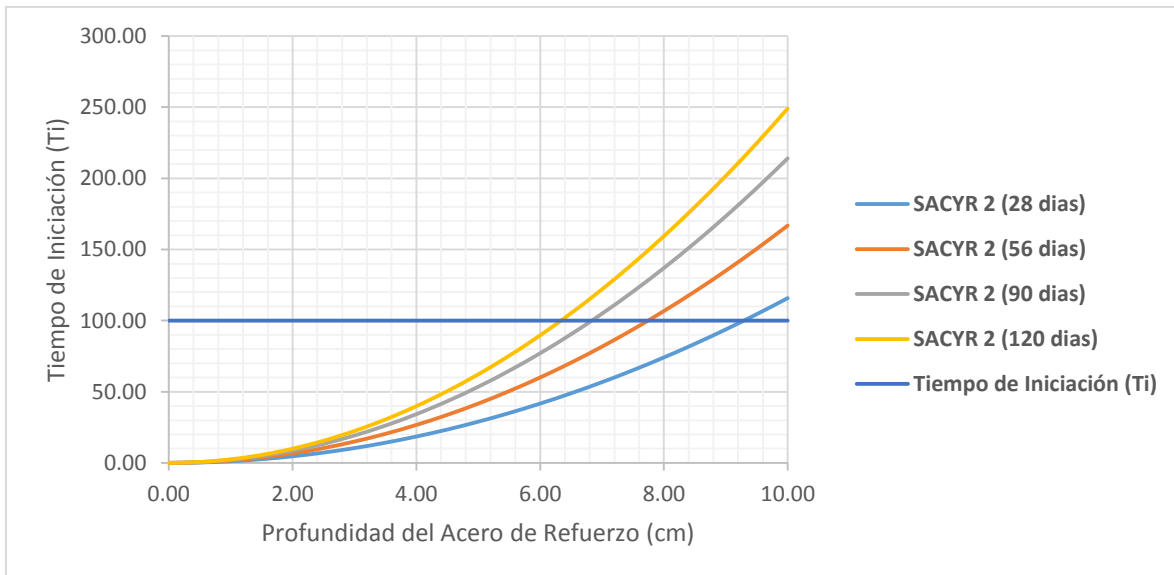
**Gráfica 52.** Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla M-157.



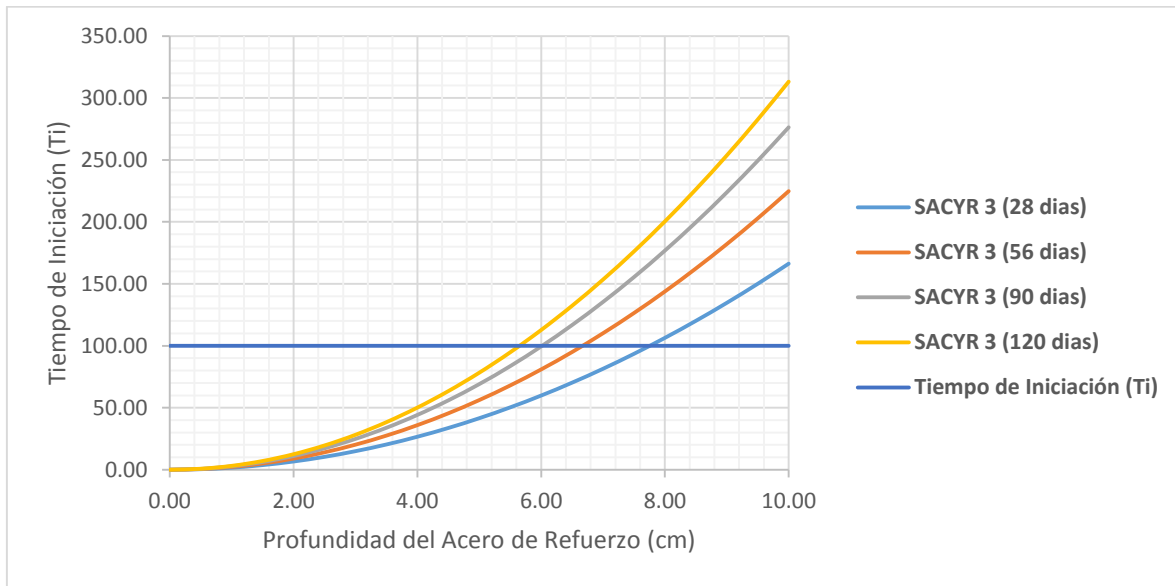
### 5.7. Evolución del periodo de iniciación (Ti) - Cementera B.



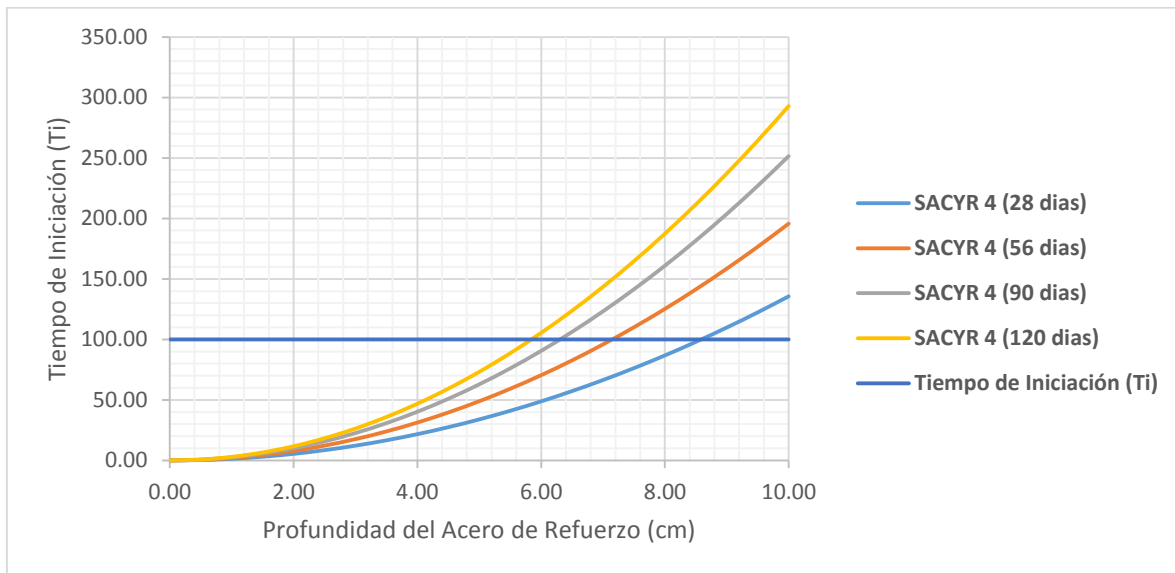
**Gráfica 53.** Evolución del Periodo de Iniciación (Ti) de la mezcla SACYR 1.



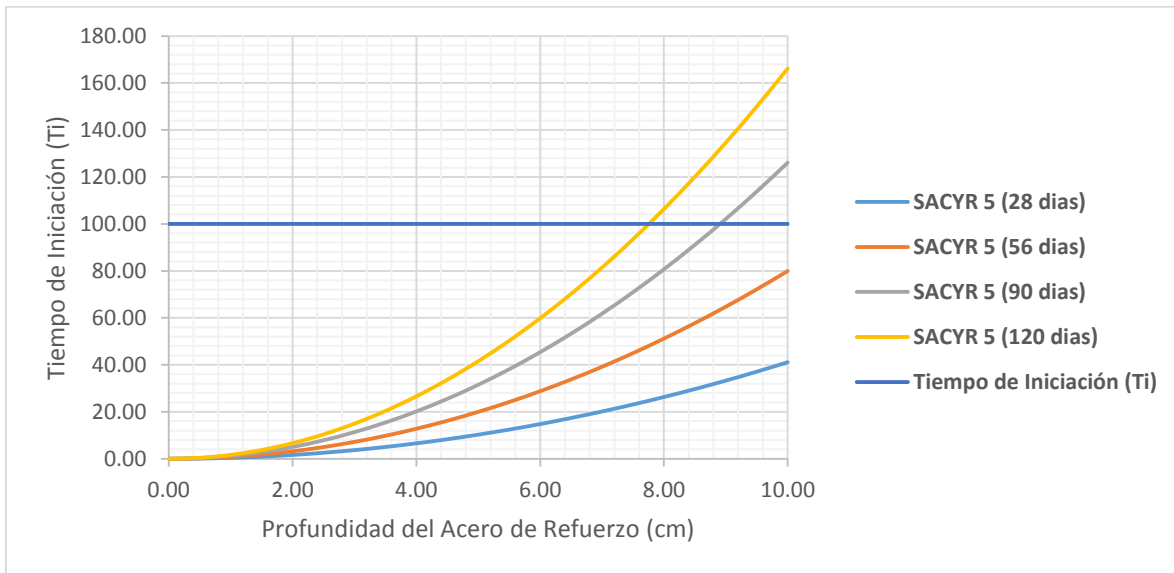
**Gráfica 54.** Evolución del Periodo de Iniciación (Ti) de la mezcla SACYR 2.



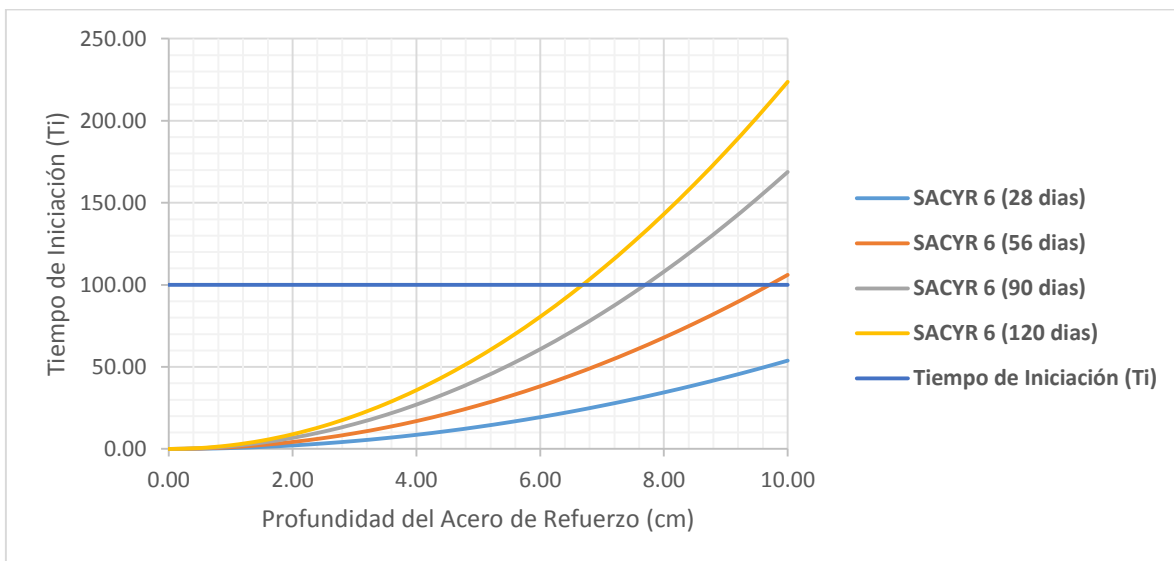
**Gráfica 55.** Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla SACYR 3.



**Gráfica 56.** Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla SACYR 4.



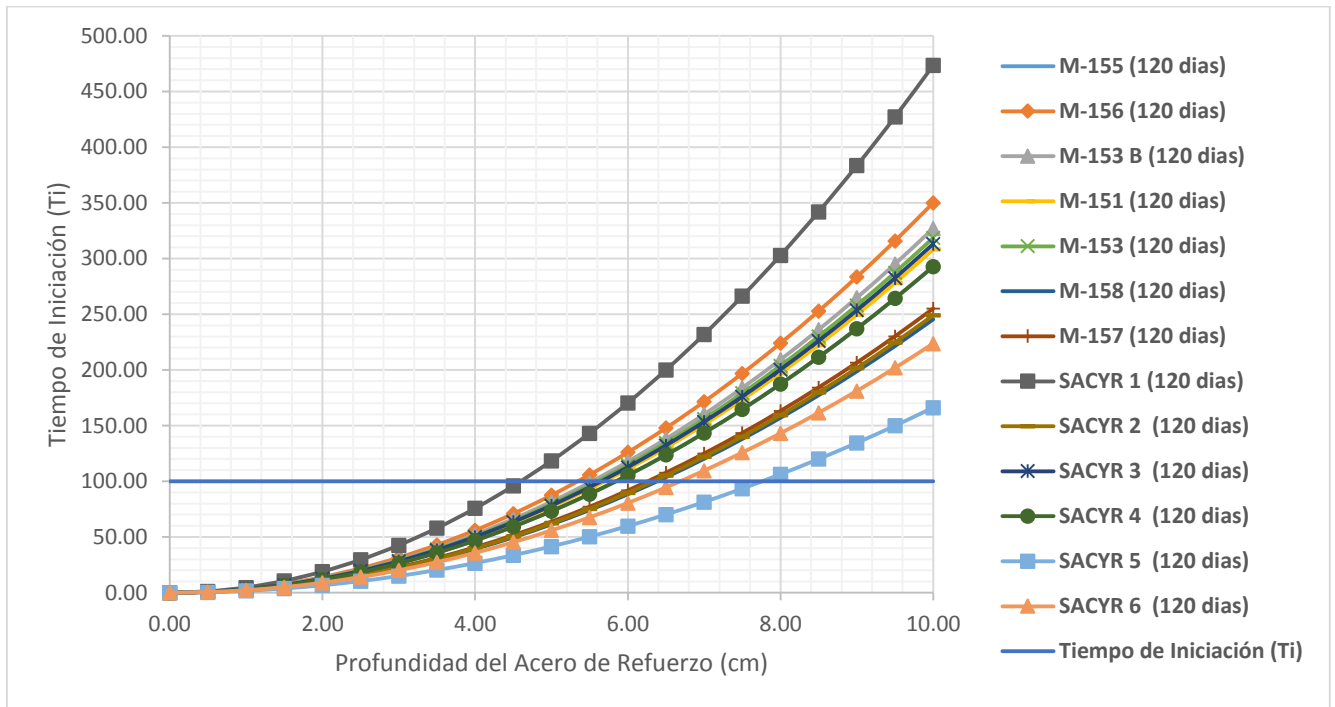
**Gráfica 57.** Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla SACYR 5.



**Gráfica 58.** Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de la mezcla SACYR 6.



En la gráfica cincuenta y nueve, se muestra la evolución del periodo de iniciación ( $T_i$ ) de las trece mezclas correspondiente a la edad ( $t_n$ ) de 120 días de curado.



**Gráfica 59.** Evolución del Periodo de Iniciación ( $T_i$ ) de las 13 mezclas de concreto elaboradas.

Para una vida útil (Periodo de iniciación) de 100 años las mezclas de concreto que generan un menor espesor de recubrimiento del acero de refuerzo ( $x$ ), son las mezclas “SACYR 1” y “M-156” con espesores de 4.60 cm y 5.34 cm respectivamente.

Dentro de las trece mezclas de concreto elaboradas por la cementera A y la cementera B, la mezcla de concreto que presentó el peor desempeño en términos de durabilidad fue la mezcla “SACYR 5”, ya que dicha mezcla requiere un espesor mínimo de 7.76 cm para poder cumplir con los parámetros establecidos ( $T_i = 100$  años).



### 5.8. Limitaciones en el cálculo de la vida útil (periodo de iniciación).

---

Como se mencionó con anterioridad la fórmula empleada para el cálculo del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo es:

$$x = \sqrt{\frac{T_i F_{exp}}{\rho_{ef,0} \left(\frac{t_n}{t_0}\right)^{q_a} r_{cl}}} \quad (43)$$

Donde:

$$\rho_{ef,0} \left(\frac{t_n}{t_0}\right)^{q_a} \quad (44)$$

Representa la edad última de medida del valor de la resistividad eléctrica húmeda ( $R_{t_n}$ ). En otras palabras, si se desea conocer el espesor de recubrimiento necesario para cumplir con una cierta vida útil (periodo de iniciación) bajo ciertos parámetros como son el factor de exposición (que depende del tipo de ambiente) y el factor de retardo (el cual depende del tipo de cemento) será necesario conocer el valor de  $R_{t_n}$ , lo cual implica esperar 60, 90 o 120 días para obtener el valor de  $R_{t_n}$ .

Para remediar esta situación, se propuso el obtener un factor edad antes y después de los 28 días de curado (tabla setenta y nueve), y se buscó relacionar ambos factores ( $q_b$  y  $q_a$ ) con el valor de la resistividad eléctrica húmeda obtenido a los 28 días (gráficas 60 y 61).

La idea fue obtener una ecuación empírica que relacionará los valores del factor edad “ $q_b$ ” con sus valores correspondientes del factor edad “ $q_a$ ” y a su vez con los valores de la resistividad eléctrica húmeda obtenidos a los 28 días, con la finalidad de poder predecir la vida útil de las mezclas de concreto sin la necesidad de esperar 60, 90 o 120 días para obtener el valor de  $R_{t_n}$ .

Es decir, en función del factor edad “ $q_b$ ” (el cual se obtiene en los primeros 28 días de análisis) poder predecir el valor de “ $q_a$ ” y el valor de la resistividad eléctrica húmeda a los 28 días y por ende predecir la vida útil (periodo de iniciación) de la mezcla de concreto.

Obteniendo una fórmula empírica, la cual estaría en función del valor del factor edad “ $q_b$ ”. Dicha fórmula también se podría implementar en el diseño de mezclas de concreto teniendo como datos de inicio el espesor de recubrimiento del acero de refuerzo, el tipo de ambiente, el periodo de iniciación y el tipo de cemento.



### 5.9. Deducción de una fórmula empírica para la predicción y cálculo de la vida útil (periodo de iniciación).

En la tabla ciento tres se muestran los valores de  $q_b$  y  $q_a$  y  $R_{28\text{días}}$  obtenidos a partir del análisis de las trece mezclas de concreto.

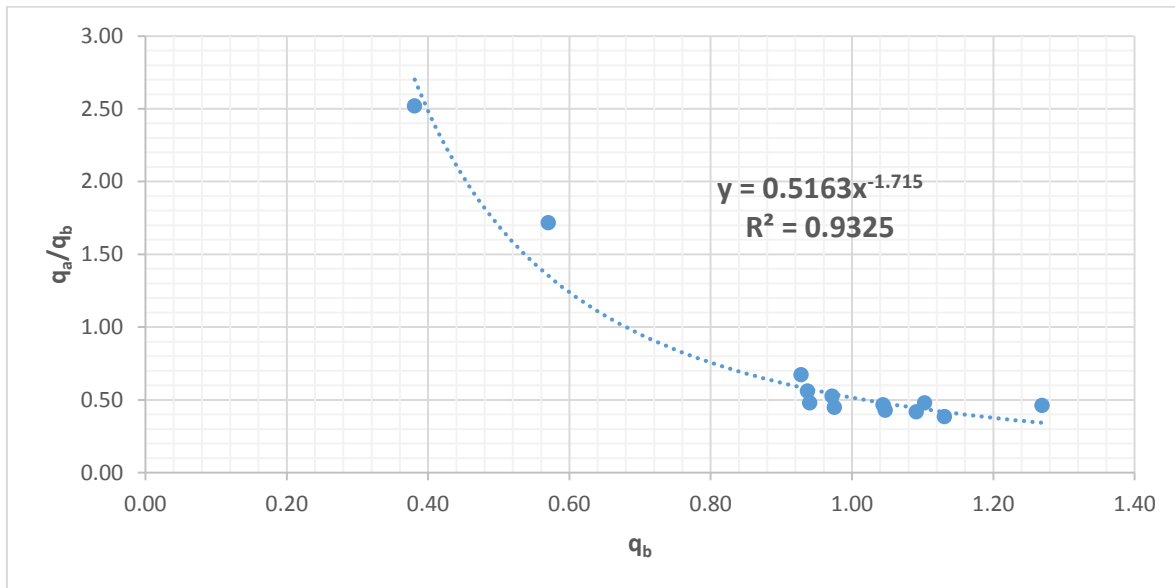
	Número	Mezcla	( $q_b$ )	( $q_a$ )	Relación ( $q_a/q_b$ )	Resistividad 28 días ( $K\Omega\text{-cm}$ )
Cementera A	1	M-151	0.975	0.439	0.45	30.60
	2	M-155	0.940	0.451	0.48	28.39
	3	M-156	0.972	0.511	0.53	30.80
	4	M-153	0.928	0.625	0.67	24.71
	5	M-153 B	1.091	0.456	0.42	32.33
	6	M-158	1.044	0.487	0.47	23.05
	7	M-157	1.047	0.449	0.43	25.28
Cementera B	1	SACYR 1	1.269	0.586	0.46	38.81
	2	SACYR 2	0.937	0.526	0.56	22.27
	3	SACYR 3	1.131	0.435	0.38	31.97
	4	SACYR 4	1.103	0.529	0.48	26.08
	5	SACYR 5	0.381	0.960	2.52	7.90
	6	SACYR 6	0.570	0.979	1.72	10.35

**Tabla 103.** Valores de  $q_b$ ,  $q_a$  y  $R_{28\text{días}}$  de las mezclas de concreto elaboradas por la cementera A y B.

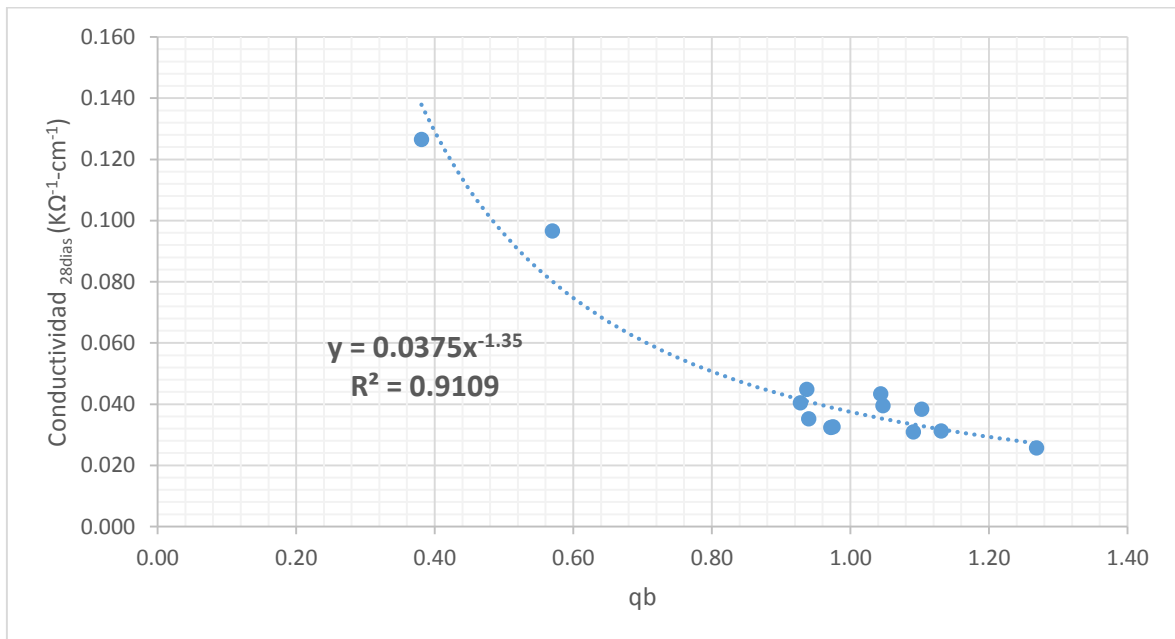
A continuación, con base en los datos de la tabla ciento tres se muestra el procedimiento para la obtención de la fórmula empírica que relaciona los valores del factor edad “ $q_b$ ” con sus valores correspondientes del factor edad “ $q_a$ ” y a su vez con los valores de la resistividad eléctrica húmeda obtenida a los 28 días de curado.

Primeramente, se graficaron los valores de la relación de  $q_a/q_b$  contra los valores del factor edad “ $q_b$ ” obteniendo como resultado la gráfica sesenta, posteriormente se graficó los valores de la relación  $q_a/q_b$  contra los valores de la conductividad obtenidos en laboratorio a los 28 días de curado generándose la gráfica sesenta y uno.

Es necesario mencionar que, para obtener los valores de conductividad primero se obtuvo la inversa de los valores de resistividad eléctrica húmeda obtenidos en laboratorio a los 28 días de curado.



**Gráfica 60.** Relación entre los valores de  $q_a/q_b$  y el factor edad “ $q_b$ ”.



**Gráfica 61.** Relación entre los valores de conductividad a los 28 días de curado y el factor edad “ $q_b$ ”.



Nótese que los valores del coeficiente de determinación (gráficas 60 y 61) son mayores a 0.85, lo cual refleja una buena relación de ajuste entre las variables.

A partir de las gráficas 60 y 61, se propuso que:

- a) El valor de la Resistividad Eléctrica Húmeda a los 28 días de curado fuera substituido por la expresión:

$$\rho_{ef,0} = 26,671 q_b^{1.3498} \quad (45)$$

- b) El valor del factor edad “ $q_a$ ” fuera substituido por la expresión:

$$\left(\frac{t_n}{t_0}\right)q_a = \left(\frac{t_n}{t_0}\right)q_b^{\frac{0.5163}{0.715}} \quad (46)$$

Tomando en cuenta las equivalencias mostradas en los incisos a y b, la fórmula de la Doctora Andrade se modificó de manera tal que:

Tanto el valor de la resistividad eléctrica húmeda a los 28 días y el valor del factor edad calculado a partir de los 28 días hasta la edad ultima de medición ( $T_n$ ), fue remplazado por expresiones empíricas que solo dependen del valor del factor edad “ $q_b$ ”, cuyo valor es calculado entre los primeros tres y veintiocho días de curado.

Por lo anterior, se obtuvo una formula empírica donde no es necesario conocer el valor de la resistividad eléctrica húmeda a los 28 días de curado, ni tampoco conocer el valor del factor edad “ $q_a$ ”. Esto nos lleva a creer que es posible determinar la vida útil (periodo de iniciación) con tan solo conocer el valor del factor edad “ $q_b$ ”.

Ahora bien, si esto fuera posible podríamos predecir los valores de  $\rho_{ef,0}$  y  $q_a$  a partir del valor de  $q_b$ .

La fórmula de la Doctora Andrade para el cálculo del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo en función del factor edad “ $q_a$ ”, del tiempo de Iniciación ( $T_i$ ), del factor de exposición ( $F_{exp}$ ), del factor de retardo  $r_{cl}$ , y del valor de la resistividad eléctrica húmeda a los 28 días es:

$$x = \sqrt{\frac{T_i F_{exp}}{\rho_{ef,0} \left(\frac{t_n}{t_0}\right)q_a r_{cl}}} \quad (47)$$



La fórmula empírica obtenida es:

$$x = \sqrt{\frac{T_i F_{exp} \left(\frac{28}{t_n}\right)^{q_b \frac{0.5163}{0.715}}}{26,671 q_b^{1.3498} r_{cl}}} \quad (48)$$

La cual está en función de:

- a) Tiempo de Iniciación ( $T_i$ ).
- b) Factor de exposición ( $F_{exp}$ ).
- c) Factor de retardo  $r_{cl}$ .
- d) Factor edad “ $q_b$ ”.

La pregunta que surge es, ¿Cuál es el porcentaje de error que se produce en el cálculo del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo con la formula empírica obtenida y el espesor de recubrimiento calculado con la fórmula de la Doctora Andrade?, para responder la pregunta anterior se tomaron los datos de resistividad eléctrica húmeda de una *catorceava muestra de concreto* elaborada por la cementara A, con la finalidad de poder comparar los valores del espesor de recubrimiento generados por ambas fórmulas bajo los mismos requerimientos de durabilidad (Factor de exposición, tiempo de iniciación y factor de retardo), es necesario aclarar que los datos de esta mezcla de concreto no fueron tomados en cuenta para la obtención de la fórmula empírica.

De esta catorceava muestra de concreto se obtuvieron datos de resistividad eléctrica húmeda a los 3, 7, 28, 56, 90 y 120 días. Dicha mezcla de concreto fue identificada como “M-159” y representa la octava mezcla de concreto elaborada por la cementera A.

A continuación, se muestran los valores de resistividad eléctrica húmeda de la mezcla de concreto “M-159”:

Resistividad ( $\rho$ ) a los 3 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) ( $\rho$ ) K $\Omega$ -cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ - cm	
8	M-159	8-1	20.4	10.25	82.52	0.94	3.8	3.8
		8-2	20.3	10.25	82.52	0.94	3.8	
		8-3	20.4	10.2	81.71	0.99	4.0	
		8-4	20.2	10.2	81.71	0.94	3.8	

**Tabla 104.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 3 días – M-159.



Resistividad ( $\rho$ ) a los 7 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) ( $\rho$ ) K $\Omega$ -cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ - cm	
8	M-159	8-5	20.0	10.17	81.23	3.72	15.1	15.3
		8-6	20.0	10.21	81.87	3.74	15.3	
		8-7	20.1	10.2	81.71	3.92	16.0	
		8-8	20.1	10.22	82.03	3.66	15.0	

**Tabla 105.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 7 días – M-159.

Resistividad ( $\rho$ ) a los 28 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ ) ( $\rho$ ) K $\Omega$ -cm
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ - cm	
8	M-159	8-2	20.3	10.25	82.52	10.50	42.8	45.5
		8-3	20.4	10.2	81.71	10.40	41.7	
		8-7	20.1	10.2	81.71	11.50	46.9	
		8-8	20.1	10.22	82.03	11.00	45.0	
		8-9	20.2	10.3	83.32	13.00	53.6	
		8-10	20.2	10.25	82.52	10.50	43.0	

**Tabla 106.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 28 días – M-159.



Resistividad ( $\rho$ ) a los 56 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ )
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ - cm	( $\rho$ ) K $\Omega$ -cm
8	M-159	8-2	20.3	10.25	82.52	15.50	63.2	63.0
		8-3	20.4	10.2	81.71	15.00	60.1	
		8-7	20.1	10.2	81.71	14.00	57.1	
		8-8	20.1	10.22	82.03	15.00	61.4	
		8-11	20.3	10	78.54	18.00	69.6	
		8-12	20.2	10.2	81.71	16.50	66.7	

**Tabla 107.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 56 días – M-159.

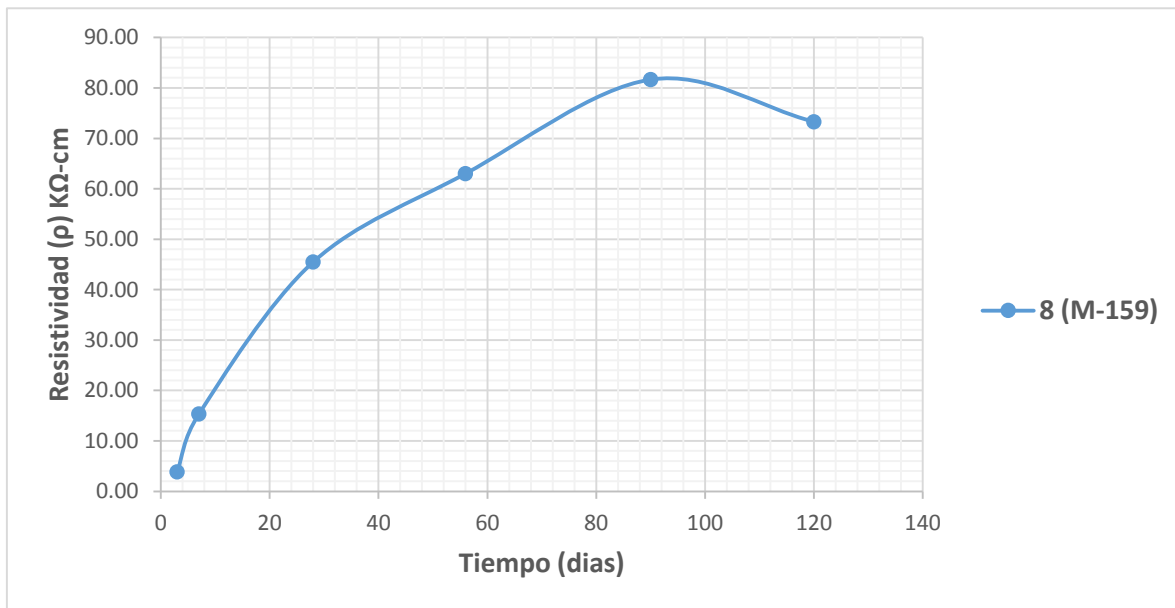
Resistividad ( $\rho$ ) a los 90 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ )
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ - cm	( $\rho$ ) K $\Omega$ -cm
8	M-159	8-2	20.3	10.25	82.52	20.80	84.8	81.7
		8-3	20.4	10.2	81.71	17.70	70.9	
		8-7	20.1	10.2	81.71	20.00	81.5	
		8-8	20.1	10.22	82.03	18.60	76.1	
		8-13	20.0	10.5	86.59	20.00	86.6	
		8-14	20.2	10.25	82.52	22.00	90.1	

**Tabla 108.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 90 días – M-159.



Resistividad ( $\rho$ ) a los 120 días								PROMEDIO
Número	Mezcla	No. Cilindro	Dimensiones		Área (cm <sup>2</sup> )	Resistividad ( $\rho$ )		Resistividad ( $\rho$ )
			Longitud promedio (cm)	Diámetro promedio (cm)		Re (K $\Omega$ )	( $\rho$ ) K $\Omega$ -cm	( $\rho$ ) K $\Omega$ -cm
8	M-159	8-2	20.3	10.25	82.52	17.50	71.3	73.3
		8-3	20.4	10.2	81.71	18.50	74.1	
		8-7	20.1	10.2	81.71	19.00	77.4	
		8-8	20.1	10.22	82.03	19.20	78.6	
		8-15	20.0	10.1	80.12	18.00	72.1	
		8-16	20.2	10	78.54	17.00	66.3	

**Tabla 109.** Resultados de las mediciones de resistividad eléctrica húmeda a los 120 días – M-159.



**Gráfica 62.** Valores promedios de la resistividad eléctrica húmeda a diferentes edades – M-159.



En resumen, los valores de resistividad eléctrica húmeda promedio a diferentes edades son los que se muestran en la tabla ciento diez.

Resistividad ( $\rho$ ) $K\Omega\text{-cm}$ (Medida en Laboratorio)							
Número	Mezcla	Días					
		3	7	28	56	90	120
8	M-159	3.85	15.34	45.49	63.01	81.66	73.30

**Tabla 110.** Valores promedios de la resistividad eléctrica húmeda a diferentes edades – M-159.

El cálculo del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo se llevará a cabo bajo la condición más crítica (en términos de durabilidad) y en función de los datos contenidos en la tabla ciento diez, donde  $T_n$ , el factor de exposición y el factor de retardo tomarán los siguientes valores:

- a)  $F_{exp} = 25,000 (\Omega - cm^3/año)$ .
- b)  $r_{cl} = 1.30$  (adimensional).
- c)  $T_n = 120$  días

Primeramente se llevará a cabo el cálculo del espesor de recubrimiento con la fórmula de la Doctora Andrade.

### 5.10. Cálculo del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo a partir de la fórmula de la Doctora Andrade.

---

La fórmula es:

$$x = \sqrt{\frac{T_i F_{exp}}{\rho_{ef,0} \left(\frac{t_n}{t_0}\right)^{q_a} r_{cl}}} \quad (49)$$



Por lo tanto, los valores que tomarán cada uno de los parámetros serán:

$$\rho_{ef,0} \left(\frac{t_n}{t_0}\right)^{q_a} = 73,295.33 (\Omega - cm).$$

$$F_{exp} = 25,000 (\Omega - cm^3/año).$$

$$r_{cl} = 1.30 (\text{adimensional}).$$

$$T_i = 100 (\text{años}).$$

Sustituyendo los valores en la fórmula:

$$x = \sqrt{\frac{100 * 25,000}{73,295.33 * 1.30}}$$

$$x = 5.12 \text{ cm}$$

Ahora, calcularemos el espesor de recubrimiento del acero de refuerzo con la formula empírica obtenida con anterioridad.

#### 5.11. Cálculo del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo a partir de la fórmula empírica obtenida.

---

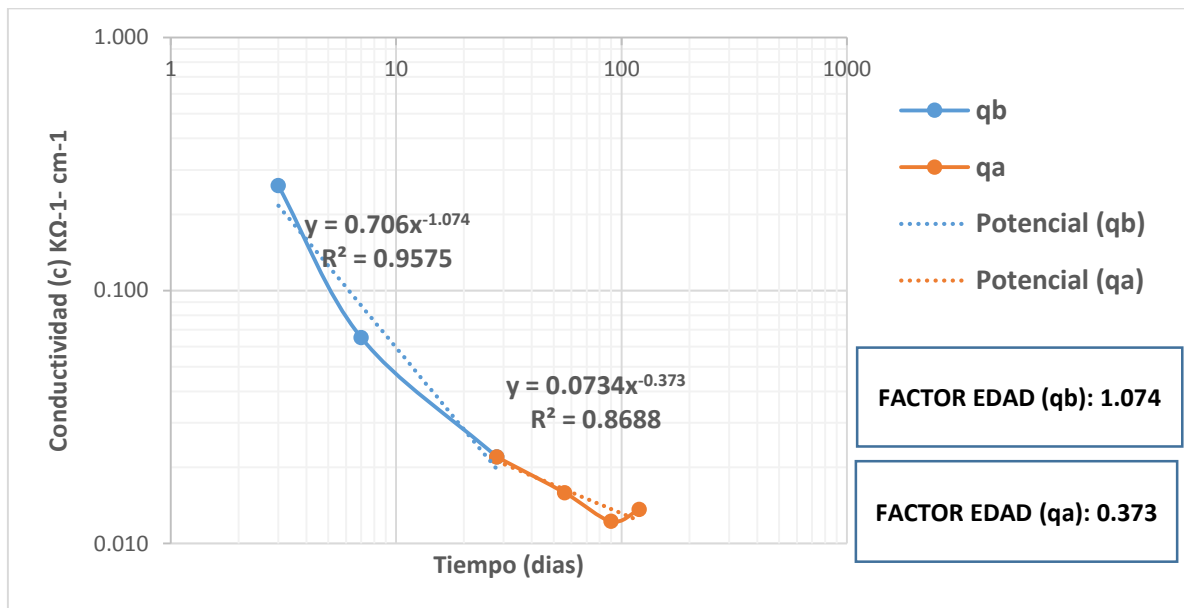
La fórmula es:

$$x = \sqrt{\frac{T_i F_{exp} \left(\frac{28}{t_n}\right)^{q_b \frac{0.5163}{0.715}}}{26,671 q_b^{1.3498} r_{cl}}} \quad (50)$$



Para llevar a cabo la determinación del espesor de recubrimiento, se requiere el valor del factor edad “ $q_b$ ” cuyo valor se obtendrá a partir de la información contenida en la tabla ciento diez, por lo tanto:

- Se obtienen los valores de conductividad, los cuales se grafican respecto al tiempo de curado en escala logarítmica.
- Se divide la gráfica en dos partes: antes y después de los 28 días de curado.
- Se obtiene el valor de “ $q_b$ ” y “ $q_a$ ”, cuyos valores se desprenden de un ajuste potencial.



**Gráfica 63.** Factores edad  $q_b$  y  $q_a$  de la mezcla de concreto 8 (M-159) elaborada por la cementara A.

Por lo tanto, los valores que tomarán cada uno de los parámetros serán:

$$q_b = 1.074 \text{ (adimensional).}$$

$$F_{exp} = 25,000 \text{ (}\Omega - cm^3/\text{año).}$$

$$r_{cl} = 1.30 \text{ (adimensional).}$$

$$T_i = 100 \text{ (años).}$$

$$T_n = 120 \text{ (días)}$$



Sustituyendo los valores en la fórmula:

$$x = \sqrt{\frac{100 * 25,000 * \left(\frac{28}{120}\right)^{\frac{0.5163}{1.074^{0.715}}}}{26,671 * 1.074^{1.3498} * 1.30}}$$

$$x = 5.66 \text{ cm}$$

En resumen:

Cálculo del Periodo de Iniciación.								
Número	Mezcla	Factor q <sub>a</sub> (Ad.)	Resistividad (R) 28 días (Lab.) (KΩ-cm)	Factor de Retardo (Ad.)	Factor de Exposición (Ω-cm <sup>3</sup> /año)	Recubrimiento del Acero de Refuerzo (cm)	Tiempo de Iniciación (Ti) (años)	Recubrimiento final del Acero de Refuerzo (cm)
8	M-159	0.328	45.49	1.30	25000	<b>5.12</b>	100.00	<b>6.00</b>

**Tabla 111.** Valor del espesor de recubrimiento “x” calculado con la fórmula de la Doctora Andrade - M-159.

Cálculo del Periodo de Iniciación.							
Número	Mezcla	Factor q <sub>b</sub> (Ad.)	Factor de Retardo (Ad.)	Factor de Exposición (Ω-cm <sup>3</sup> /año)	Recubrimiento del Acero de Refuerzo (cm)	Tiempo de Iniciación (Ti) (años)	Recubrimiento final del Acero de Refuerzo (cm)
8	M-159	<b>1.074</b>	1.30	25000	<b>5.66</b>	100.00	<b>6.00</b>

**Tabla 112.** Valor del espesor de recubrimiento “x” calculado con la fórmula Empírica obtenida – M-159.



El porcentaje de error sería:

$$Error (\%) = \frac{abs(5.12 - 5.66)}{5.12} * 100$$

$$Error (\%) = 10.55$$

El cual es un porcentaje de error relativamente bajo. Sabemos que el espesor de recubrimiento debe ser un número entero mayor al número fraccionario calculado, por lo que en ambos cálculos el espesor final sería de 6 cm y por ende se podría decir que, ambas fórmulas proporcionan el mismo espesor de recubrimiento bajo los mismos parámetros de durabilidad.

En la tabla ciento trece se muestra el porcentaje de error promedio en el cálculo del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo de las trece mezclas de concreto elaboradas por la cementera A y B.

Comparativa							Error
Número	Mezcla	Factor $q_b$ (Ad.)	Resistividad <sub>120días</sub> (KΩ-cm)	Recubrimiento del	Recubrimiento del	Promedio (%)	
				Acero de Refuerzo (cm) "Fórmula Dra. Andrade"	Acero de Refuerzo (cm) "Fórmula Empírica"		
Cementera A	1	M-151	0.975	58.65	5.73	5.89	2.89
	2	M-155	0.940	54.78	5.92	5.98	0.90
	3	M-156	0.972	66.35	5.38	5.90	9.57
	4	M-153	0.928	59.85	5.67	6.01	6.00
	5	M-153 B	1.091	59.78	5.67	5.63	0.82
	6	M-158	1.044	44.92	6.54	5.73	12.43
	7	M-157	1.047	47.06	6.39	5.72	10.48
Cementera B	1	SACYR 1	1.269	113.40	4.12	5.27	27.89
	2	SACYR 2	0.937	60.50	5.64	5.99	6.17
	3	SACYR 3	1.131	79.34	4.92	5.54	12.52
	4	SACYR 4	1.103	71.18	5.20	5.60	7.72
	5	SACYR 5	0.381	42.53	6.72	7.70	14.52
	6	SACYR 6	0.570	69.72	5.25	7.08	34.76
						<b>Error Promedio (%)</b>	<b>11.28</b>

**Tabla 113.** Error promedio en el cálculo del espesor de recubrimiento – Cementeras A y B.



La fórmula empírica obtenida podría utilizarse como una “fórmula predictiva”, es decir, podemos obtener el valor del factor edad “q<sub>b</sub>” antes de los 28 días de curado, por ejemplo, calcular el factor edad “q<sub>b</sub>” con tan solo 4 puntos, a los 3, 7, 14 y 17 días de curado y con estos valores de resistividad eléctrica húmeda poder predecir la vida útil de la mezcla de concreto o el espesor requerido para un cierto tiempo de iniciación.

Por ejemplo:

Comparativa										Error
Número	Mezcla	(ρ) KΩ-cm				Factor q <sub>b</sub> (adimensional)	Recubrimiento del Acero de Refuerzo (cm) "Fórmula Andrade"	Recubrimiento del Acero de Refuerzo (cm) "Fórmula Empírica"	Error Promedio (%)	
		3 días	7 días	14 días	17 días					
Cementera B	1	SACYR 1	2.50	5.52	16.63	22.00	1.271	4.12	5.26	27.83
	2	SACYR 2	3.13	4.92	11.36	14.56	0.896	5.64	6.09	8.06
	3	SACYR 3	2.81	5.52	14.62	19.93	1.132	4.92	5.54	12.50
	4	SACYR 4	2.44	4.76	12.08	16.06	1.091	5.20	5.63	8.23
	5	SACYR 5	3.77	4.21	5.36	6.32	0.283	6.72	7.88	17.22
	6	SACYR 6	3.43	4.01	5.91	7.19	0.415	5.25	7.60	44.68
Error Promedio (%)									<b>19.75</b>	

**Tabla 114.** Error promedio en el cálculo del espesor de recubrimiento a los 17 días de curado – Cementera B.

En la tabla ciento catorce se muestra el cálculo del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo con el factor “q<sub>b</sub>” calculado a los 17 días de curado, el cual no dista mucho del valor del espesor del recubrimiento calculado con la fórmula de la Doctora Andrade con un valor de resistividad eléctrica húmeda correspondiente a 120 días de análisis, es decir, se redujo el tiempo para la obtención del espesor de recubrimiento de 120 días a 17 días.

Recordemos que los espesores de recubrimiento de las tablas 113 y 114 están calculados para la situación más crítica, donde:

$$F_{exp} = 25,000 (\Omega - cm^3/año).$$

$$r_{cl} = 1.30 (adimensional).$$

$$T_i = 100 (años).$$

$$T_n = 120 (días)$$



Como se mencionó con anterioridad en vez de calcular el espesor de recubrimiento se podría calcular el tiempo de iniciación (Vida útil), solo tendríamos que proponer un espesor de recubrimiento y emplear la formula empírica:

$$T_i = 26,671 \frac{x^2 q_b^{1.3498} r_{cl}}{F_{exp} \left(\frac{28}{t_n}\right) q_b^{0.715}} \quad (51)$$

Proponiendo un espesor de 6 cm y empleando el valor del factor edad “q<sub>b</sub>” contenido en la tabla ciento catorce (el cual está calculado con los datos de resistividad eléctrica húmeda a los 3, 7, 14 y 17 días) así como:

$$F_{exp} = 25,000 (\Omega - cm^3/año).$$

$$r_{cl} = 1.30 \text{ (adimensional).}$$

$$T_n = 120 \text{ (días)}$$

Resulta que:

Comparativa									
	Número	Mezcla	(ρ) KΩ-cm				Factor q <sub>b</sub> (adimensional)	Vida útil (Ti - años) Requerida	Vida útil (Ti - años) "Fórmula Empírica"
			3	7	14	17			
Cementera B	1	SACYR 1	2.50	5.52	16.63	22.00	1.271	100.00	129.92
	2	SACYR 2	3.13	4.92	11.36	14.56	0.896	100.00	97.00
	3	SACYR 3	2.81	5.52	14.62	19.93	1.132	100.00	117.36
	4	SACYR 4	2.44	4.76	12.08	16.06	1.091	100.00	113.76
	5	SACYR 5	3.77	4.21	5.36	6.32	0.283	100.00	57.94
	6	SACYR 6	3.43	4.01	5.91	7.19	0.415	100.00	62.35

**Tabla 115.** Predicción de la vida útil (periodo de iniciación) con 17 días de análisis, proponiendo un espesor de 6 cm para todas las mezclas de concreto – Cementera B.



### 5.12. Elaboración de ábacos de diseño para la determinación de la vida útil (periodo de iniciación) de las mezclas de concreto.

---

A partir de la fórmula empírica obtenida, podemos elaborar ábacos o monogramas de diseño de mezclas de concreto en función del factor edad “ $q_b$ ”, del factor de exposición, del factor de retardo y del valor de  $T_n$ .

A continuación se muestran dos tablas de diseño, las cuales están en función de:

- a)  $F_{exp}$
- b)  $r_{cl}$
- c)  $T_n$
- d)  $q_b$
- e)  $x$

Para las tablas 116 y 117, los valores de los parámetros son:

$$F_{exp} = 25,000 (\Omega - cm^3/año).$$

$$r_{cl} = 1.30 \text{ (adimensional)}.$$

$$T_n = 120 \text{ (días)}$$

$$q_b = \text{variable, en un rango de } 0.38 - 1.27 \text{ (adimensional)}$$

$$x = \text{variable, en un rango de } 1 - 10 \text{ (cm)}$$

Es importante destacar que el rango de valores del factor edad “ $q_b$ ” está dado por:

$$[0.38, 1.27]$$

Lo anterior se debe a:

- a) Los valores del factor edad “ $q_b$ ” obtenidos a través de la experimentación, van de 0.38 hasta el valor de 1.27.
- b) Tomar valores menores a 0.38 o mayores a 1.27 sería incorrecto y a la vez imprudente, ya que no conocemos el comportamiento del factor edad “ $q_b$ ” y por ende sus correspondientes valores de resistividad eléctrica húmeda y del factor edad “ $q_a$ ”.



“MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO PARA ESTRUCTURAS LOCALIZADAS EN SUELOS SALINOS”



	Espesor de recubrimiento del Acero de Refuerzo (cm) "x"									
	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
<b>0.38</b>	1.68	6.74	15.16	26.96	42.12	60.66	82.56	107.84	136.48	168.50
<b>0.39</b>	1.70	6.79	15.28	27.16	42.44	61.11	83.18	108.65	137.50	169.76
<b>0.40</b>	1.71	6.84	15.40	27.37	42.77	61.59	83.83	109.49	138.57	171.08
<b>0.41</b>	1.72	6.90	15.52	27.59	43.11	62.08	84.50	110.37	139.69	172.46
<b>0.42</b>	1.74	6.96	15.65	27.82	43.47	62.60	85.20	111.29	140.85	173.88
<b>0.43</b>	1.75	7.01	15.78	28.06	43.84	63.13	85.93	112.23	142.04	175.36
<b>0.44</b>	1.77	7.08	15.92	28.30	44.22	63.68	86.67	113.20	143.27	176.88
<b>0.45</b>	1.78	7.14	16.06	28.55	44.61	64.24	87.44	114.20	144.54	178.44
<b>0.46</b>	1.80	7.20	16.20	28.81	45.01	64.82	88.22	115.23	145.83	180.04
<b>0.47</b>	1.82	7.27	16.35	29.07	45.42	65.40	89.02	116.28	147.16	181.68
<b>0.48</b>	1.83	7.33	16.50	29.34	45.84	66.01	89.84	117.35	148.51	183.35
<b>0.49</b>	1.85	7.40	16.65	29.61	46.26	66.62	90.68	118.44	149.89	185.06
<b>0.50</b>	1.87	7.47	16.81	29.89	46.70	67.24	91.53	119.54	151.30	186.79
<b>0.51</b>	1.89	7.54	16.97	30.17	47.14	67.88	92.39	120.67	152.73	188.55
<b>0.52</b>	1.90	7.61	17.13	30.45	47.59	68.52	93.27	121.82	154.18	190.34
<b>0.53</b>	1.92	7.69	17.29	30.74	48.04	69.18	94.16	122.98	155.65	192.15
<b>0.54</b>	1.94	7.76	17.46	31.04	48.50	69.84	95.06	124.16	157.13	193.99
<b>0.55</b>	1.96	7.83	17.63	31.34	48.96	70.51	95.97	125.35	158.64	195.86
<b>0.56</b>	1.98	7.91	17.80	31.64	49.43	71.19	96.89	126.55	160.17	197.74
<b>0.57</b>	2.00	7.99	17.97	31.94	49.91	71.87	97.83	127.77	161.71	199.64
<b>0.58</b>	2.02	8.06	18.14	32.25	50.39	72.57	98.77	129.00	163.27	201.57
<b>0.59</b>	2.04	8.14	18.32	32.56	50.88	73.27	99.72	130.25	164.85	203.51
<b>0.60</b>	2.05	8.22	18.49	32.88	51.37	73.97	100.68	131.51	166.44	205.48
<b>0.61</b>	2.07	8.30	18.67	33.19	51.86	74.68	101.65	132.77	168.04	207.46
<b>0.62</b>	2.09	8.38	18.85	33.51	52.36	75.40	102.63	134.05	169.66	209.45
<b>0.63</b>	2.11	8.46	19.03	33.83	52.87	76.13	103.62	135.34	171.29	211.47
<b>0.64</b>	2.13	8.54	19.21	34.16	53.37	76.86	104.61	136.64	172.93	213.50
<b>0.65</b>	2.16	8.62	19.40	34.49	53.89	77.60	105.62	137.95	174.59	215.54
<b>0.66</b>	2.18	8.70	19.58	34.82	54.40	78.34	106.62	139.26	176.26	217.60
<b>0.67</b>	2.20	8.79	19.77	35.15	54.92	79.08	107.64	140.59	177.94	219.67
<b>0.68</b>	2.22	8.87	19.96	35.48	55.44	79.83	108.66	141.93	179.63	221.76
<b>0.69</b>	2.24	8.95	20.15	35.82	55.97	80.59	109.69	143.27	181.33	223.86
<b>0.70</b>	2.26	9.04	20.34	36.16	56.49	81.35	110.73	144.62	183.04	225.98
<b>0.71</b>	2.28	9.12	20.53	36.50	57.03	82.12	111.77	145.98	184.76	228.10
<b>0.72</b>	2.30	9.21	20.72	36.84	57.56	82.89	112.82	147.35	186.49	230.24
<b>0.73</b>	2.32	9.30	20.91	37.18	58.10	83.66	113.87	148.73	188.23	232.39
<b>0.74</b>	2.35	9.38	21.11	37.53	58.64	84.44	114.93	150.11	189.98	234.55
<b>0.75</b>	2.37	9.47	21.30	37.88	59.18	85.22	115.99	151.50	191.74	236.72
<b>0.76</b>	2.39	9.56	21.50	38.22	59.73	86.01	117.06	152.90	193.51	238.90
<b>0.77</b>	2.41	9.64	21.70	38.58	60.27	86.79	118.14	154.30	195.29	241.10
<b>0.78</b>	2.43	9.73	21.90	38.93	60.83	87.59	119.22	155.71	197.07	243.30
<b>0.79</b>	2.46	9.82	22.10	39.28	61.38	88.39	120.30	157.13	198.87	245.51
<b>0.80</b>	2.48	9.91	22.30	39.64	61.93	89.19	121.39	158.55	200.67	247.74
<b>0.81</b>	2.50	10.00	22.50	40.00	62.49	89.99	122.49	159.98	202.48	249.97
<b>0.82</b>	2.52	10.09	22.70	40.35	63.05	90.80	123.58	161.42	204.29	252.21
<b>0.83</b>	2.54	10.18	22.90	40.71	63.62	91.61	124.69	162.86	206.12	254.47

**Tabla 116.** Vida útil (periodo de iniciación) de una mezcla de concreto en años en función del espesor de recubrimiento "x" y del Factor Edad "q<sub>b</sub>".



“MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO PARA ESTRUCTURAS LOCALIZADAS EN SUELOS SALINOS”



		Espesor de recubrimiento del Acero de Refuerzo (cm) "x"									
		1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
Factor Edad qb (adimensional)	0.84	2.57	10.27	23.11	41.08	64.18	92.42	125.80	164.31	207.95	256.73
	0.85	2.59	10.36	23.31	41.44	64.75	93.24	126.91	165.76	209.79	259.00
	0.86	2.61	10.45	23.51	41.80	65.32	94.06	128.03	167.22	211.63	261.28
	0.87	2.64	10.54	23.72	42.17	65.89	94.88	129.15	168.68	213.49	263.56
	0.88	2.66	10.63	23.93	42.54	66.46	95.71	130.27	170.15	215.35	265.86
	0.89	2.68	10.73	24.13	42.91	67.04	96.54	131.40	171.62	217.21	268.16
	0.90	2.70	10.82	24.34	43.28	67.62	97.37	132.53	173.10	219.08	270.47
	0.91	2.73	10.91	24.55	43.65	68.20	98.21	133.67	174.59	220.96	272.79
	0.92	2.75	11.00	24.76	44.02	68.78	99.04	134.81	176.08	222.85	275.12
	0.93	2.77	11.10	24.97	44.39	69.36	99.88	135.95	177.57	224.74	277.46
	0.94	2.80	11.19	25.18	44.77	69.95	100.73	137.10	179.07	226.64	279.80
	0.95	2.82	11.29	25.39	45.14	70.54	101.57	138.25	180.57	228.54	282.15
	0.96	2.85	11.38	25.61	45.52	71.13	102.42	139.41	182.08	230.45	284.51
	0.97	2.87	11.47	25.82	45.90	71.72	103.27	140.57	183.60	232.36	286.87
	0.98	2.89	11.57	26.03	46.28	72.31	104.13	141.73	185.11	234.29	289.24
	0.99	2.92	11.66	26.25	46.66	72.91	104.98	142.89	186.64	236.21	291.62
	1.00	2.94	11.76	26.46	47.04	73.50	105.84	144.06	188.16	238.14	294.01
	1.01	2.96	11.86	26.68	47.42	74.10	106.70	145.24	189.69	240.08	296.40
	1.02	2.99	11.95	26.89	47.81	74.70	107.57	146.41	191.23	242.03	298.80
	1.03	3.01	12.05	27.11	48.19	75.30	108.43	147.59	192.77	243.97	301.20
	1.04	3.04	12.14	27.33	48.58	75.90	109.30	148.77	194.31	245.93	303.62
	1.05	3.06	12.24	27.54	48.97	76.51	110.17	149.96	195.86	247.89	306.03
	1.06	3.08	12.34	27.76	49.35	77.11	111.05	151.15	197.41	249.85	308.46
	1.07	3.11	12.44	27.98	49.74	77.72	111.92	152.34	198.97	251.82	310.89
	1.08	3.13	12.53	28.20	50.13	78.33	112.80	153.53	200.53	253.80	313.33
	1.09	3.16	12.63	28.42	50.52	78.94	113.68	154.73	202.09	255.78	315.77
	1.10	3.18	12.73	28.64	50.92	79.56	114.56	155.93	203.66	257.76	318.22
1.11	3.21	12.83	28.86	51.31	80.17	115.44	157.13	205.23	259.75	320.68	
1.12	3.23	12.93	29.08	51.70	80.79	116.33	158.34	206.81	261.74	323.14	
1.13	3.26	13.02	29.30	52.10	81.40	117.22	159.55	208.39	263.74	325.61	
1.14	3.28	13.12	29.53	52.49	82.02	118.11	160.76	209.97	265.75	328.08	
1.15	3.31	13.22	29.75	52.89	82.64	119.00	161.98	211.56	267.76	330.56	
1.16	3.33	13.32	29.97	53.29	83.26	119.90	163.19	213.15	269.77	333.05	
1.17	3.36	13.42	30.20	53.69	83.88	120.79	164.41	214.75	271.79	335.54	
1.18	3.38	13.52	30.42	54.09	84.51	121.69	165.64	216.34	273.81	338.04	
1.19	3.41	13.62	30.65	54.49	85.13	122.59	166.86	217.94	275.84	340.54	
1.20	3.43	13.72	30.87	54.89	85.76	123.50	168.09	219.55	277.87	343.05	
1.21	3.46	13.82	31.10	55.29	86.39	124.40	169.32	221.16	279.90	345.56	
1.22	3.48	13.92	31.33	55.69	87.02	125.31	170.56	222.77	281.94	348.08	
1.23	3.51	14.02	31.55	56.10	87.65	126.22	171.80	224.39	283.99	350.60	
1.24	3.53	14.13	31.78	56.50	88.28	127.13	173.03	226.00	286.04	353.13	
1.25	3.56	14.23	32.01	56.91	88.92	128.04	174.28	227.63	288.09	355.67	
1.26	3.58	14.33	32.24	57.31	89.55	128.95	175.52	229.25	290.15	358.21	
1.27	3.61	14.43	32.47	57.72	90.19	129.87	176.77	230.88	292.21	360.75	

Tabla 117. Vida útil (periodo de iniciación) de una mezcla de concreto en años en función del espesor de recubrimiento "x" y del Factor Edad "qb".



Los valores de la vida útil (periodo de iniciación) de las mezclas de concreto contenidos en las tablas 116 y 117 se calcularon con la formula empírica:

$$T_i = 26,671 \frac{x^2 q_b^{1.3498} r_{cl}}{F_{exp} \left(\frac{28}{l_n}\right)^{0.5163} q_b^{0.715}} \quad (52)$$

Las tablas 116 y 117 podrían ser útiles en la determinación de la vida útil de alguna mezcla de concreto (periodo de iniciación), siempre y cuando se tenga el valor del factor edad “q<sub>b</sub>” correspondiente. Además, dicho valor deberá estar entre un rango de 0.38 a 1.27.

Se podrían elaborar “n” número de tablas de diseño, cambiando los valores de:

- a)  $F_{exp}$
- b)  $r_{cl}$
- c)  $T_n$

Por ejemplo, ahora se tiene que:

Para las tablas 118 y 119, los valores de los parámetros son:

$$F_{exp} = 25,000 \text{ (}\Omega - \text{cm}^3/\text{año)}.$$

$$r_{cl} = 1.30 \text{ (adimensional).}$$

$$T_n = 90 \text{ (días)}$$

$$q_b = \text{variable, en un rango de } 0.38 - 1.27 \text{ (adimensional)}$$

$$x = \text{variable, en un rango de } 1 - 10 \text{ (cm)}$$

Nota: La diferencia entre los valores de los parámetros de las tablas 116 y 117 y las tablas 118 y 119 es el valor de  $T_n$ , se tiene un valor de  $T_n = 120$  días y  $T_n = 90$  días respectivamente.

Debido a lo anterior, se esperaría que los valores de la vida útil (periodo de iniciación) contenidos en las tablas 118 y 119 sean menores.



“MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO PARA ESTRUCTURAS LOCALIZADAS EN SUELOS SALINOS”



	Espesor de recubrimiento del Acero de Refuerzo (cm) "x"									
	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
<b>0.38</b>	1.25	5.01	11.27	20.04	31.31	45.09	61.37	80.16	101.45	125.24
<b>0.39</b>	1.27	5.07	11.42	20.30	31.72	45.67	62.17	81.20	102.77	126.87
<b>0.40</b>	1.29	5.14	11.57	20.56	32.13	46.27	62.98	82.26	104.11	128.53
<b>0.41</b>	1.30	5.21	11.72	20.83	32.55	46.88	63.80	83.34	105.47	130.21
<b>0.42</b>	1.32	5.28	11.87	21.11	32.98	47.49	64.64	84.43	106.86	131.92
<b>0.43</b>	1.34	5.35	12.03	21.38	33.41	48.12	65.49	85.54	108.26	133.66
<b>0.44</b>	1.35	5.42	12.19	21.67	33.85	48.75	66.35	86.66	109.68	135.41
<b>0.45</b>	1.37	5.49	12.35	21.95	34.30	49.39	67.22	87.80	111.13	137.19
<b>0.46</b>	1.39	5.56	12.51	22.24	34.75	50.04	68.11	88.95	112.58	138.99
<b>0.47</b>	1.41	5.63	12.67	22.53	35.20	50.69	69.00	90.12	114.06	140.81
<b>0.48</b>	1.43	5.71	12.84	22.82	35.66	51.35	69.90	91.29	115.54	142.65
<b>0.49</b>	1.45	5.78	13.01	23.12	36.13	52.02	70.81	92.48	117.05	144.50
<b>0.50</b>	1.46	5.85	13.17	23.42	36.59	52.69	71.72	93.68	118.56	146.37
<b>0.51</b>	1.48	5.93	13.34	23.72	37.07	53.37	72.65	94.89	120.09	148.26
<b>0.52</b>	1.50	6.01	13.51	24.03	37.54	54.06	73.58	96.11	121.63	150.17
<b>0.53</b>	1.52	6.08	13.69	24.33	38.02	54.75	74.52	97.33	123.19	152.09
<b>0.54</b>	1.54	6.16	13.86	24.64	38.50	55.45	75.47	98.57	124.75	154.02
<b>0.55</b>	1.56	6.24	14.04	24.95	38.99	56.15	76.42	99.82	126.33	155.96
<b>0.56</b>	1.58	6.32	14.21	25.27	39.48	56.85	77.38	101.07	127.92	157.92
<b>0.57</b>	1.60	6.40	14.39	25.58	39.97	57.56	78.35	102.33	129.52	159.90
<b>0.58</b>	1.62	6.48	14.57	25.90	40.47	58.28	79.32	103.61	131.13	161.88
<b>0.59</b>	1.64	6.56	14.75	26.22	40.97	59.00	80.30	104.88	132.74	163.88
<b>0.60</b>	1.66	6.64	14.93	26.54	41.47	59.72	81.29	106.17	134.37	165.89
<b>0.61</b>	1.68	6.72	15.11	26.87	41.98	60.45	82.28	107.46	136.01	167.91
<b>0.62</b>	1.70	6.80	15.29	27.19	42.49	61.18	83.27	108.76	137.65	169.94
<b>0.63</b>	1.72	6.88	15.48	27.52	43.00	61.91	84.27	110.07	139.31	171.98
<b>0.64</b>	1.74	6.96	15.66	27.85	43.51	62.65	85.28	111.38	140.97	174.04
<b>0.65</b>	1.76	7.04	15.85	28.18	44.02	63.40	86.29	112.70	142.64	176.10
<b>0.66</b>	1.78	7.13	16.04	28.51	44.54	64.14	87.30	114.03	144.32	178.17
<b>0.67</b>	1.80	7.21	16.22	28.84	45.06	64.89	88.33	115.36	146.01	180.26
<b>0.68</b>	1.82	7.29	16.41	29.18	45.59	65.65	89.35	116.70	147.70	182.35
<b>0.69</b>	1.84	7.38	16.60	29.51	46.11	66.40	90.38	118.05	149.40	184.45
<b>0.70</b>	1.87	7.46	16.79	29.85	46.64	67.16	91.41	119.40	151.11	186.56
<b>0.71</b>	1.89	7.55	16.98	30.19	47.17	67.92	92.45	120.75	152.83	188.68
<b>0.72</b>	1.91	7.63	17.17	30.53	47.70	68.69	93.50	122.12	154.55	190.81
<b>0.73</b>	1.93	7.72	17.36	30.87	48.24	69.46	94.54	123.48	156.28	192.94
<b>0.74</b>	1.95	7.80	17.56	31.21	48.77	70.23	95.59	124.86	158.02	195.09
<b>0.75</b>	1.97	7.89	17.75	31.56	49.31	71.01	96.65	126.23	159.77	197.24
<b>0.76</b>	1.99	7.98	17.95	31.90	49.85	71.79	97.71	127.62	161.52	199.40
<b>0.77</b>	2.02	8.06	18.14	32.25	50.39	72.57	98.77	129.01	163.27	201.57
<b>0.78</b>	2.04	8.15	18.34	32.60	50.94	73.35	99.84	130.40	165.04	203.75
<b>0.79</b>	2.06	8.24	18.53	32.95	51.48	74.14	100.91	131.80	166.81	205.93
<b>0.80</b>	2.08	8.33	18.73	33.30	52.03	74.93	101.98	133.20	168.58	208.13
<b>0.81</b>	2.10	8.41	18.93	33.65	52.58	75.72	103.06	134.61	170.37	210.33
<b>0.82</b>	2.13	8.50	19.13	34.01	53.13	76.51	104.14	136.02	172.15	212.53
<b>0.83</b>	2.15	8.59	19.33	34.36	53.69	77.31	105.23	137.44	173.95	214.75

**Tabla 118.** Vida útil (periodo de iniciación) de una mezcla de concreto en años en función del espesor de recubrimiento "x" y del Factor Edad "q<sub>b</sub>".



“MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO PARA ESTRUCTURAS LOCALIZADAS EN SUELOS SALINOS”



	Espesor de recubrimiento del Acero de Refuerzo (cm) "x"										
	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	
Factor Edad qb (adimensional)	0.84	2.17	8.68	19.53	34.72	54.24	78.11	106.32	138.86	175.75	216.97
	0.85	2.19	8.77	19.73	35.07	54.80	78.91	107.41	140.29	177.55	219.20
	0.86	2.21	8.86	19.93	35.43	55.36	79.72	108.50	141.72	179.36	221.44
	0.87	2.24	8.95	20.13	35.79	55.92	80.52	109.60	143.15	181.18	223.68
	0.88	2.26	9.04	20.33	36.15	56.48	81.33	110.70	144.59	183.00	225.93
	0.89	2.28	9.13	20.54	36.51	57.05	82.15	111.81	146.04	184.83	228.18
	0.90	2.30	9.22	20.74	36.87	57.61	82.96	112.92	147.49	186.66	230.45
	0.91	2.33	9.31	20.94	37.23	58.18	83.78	114.03	148.94	188.50	232.72
	0.92	2.35	9.40	21.15	37.60	58.75	84.60	115.15	150.40	190.34	234.99
	0.93	2.37	9.49	21.35	37.96	59.32	85.42	116.26	151.86	192.19	237.27
	0.94	2.40	9.58	21.56	38.33	59.89	86.24	117.39	153.32	194.05	239.56
	0.95	2.42	9.67	21.77	38.70	60.46	87.07	118.51	154.79	195.91	241.86
	0.96	2.44	9.77	21.97	39.07	61.04	87.90	119.64	156.26	197.77	244.16
	0.97	2.46	9.86	22.18	39.43	61.62	88.73	120.77	157.74	199.64	246.47
	0.98	2.49	9.95	22.39	39.80	62.20	89.56	121.90	159.22	201.51	248.78
	0.99	2.51	10.04	22.60	40.18	62.78	90.40	123.04	160.70	203.39	251.10
	1.00	2.53	10.14	22.81	40.55	63.36	91.23	124.18	162.19	205.27	253.43
	1.01	2.56	10.23	23.02	40.92	63.94	92.07	125.32	163.68	207.16	255.76
	1.02	2.58	10.32	23.23	41.30	64.52	92.91	126.47	165.18	209.06	258.09
	1.03	2.60	10.42	23.44	41.67	65.11	93.76	127.61	166.68	210.95	260.44
	1.04	2.63	10.51	23.65	42.05	65.70	94.60	128.77	168.18	212.86	262.79
	1.05	2.65	10.61	23.86	42.42	66.29	95.45	129.92	169.69	214.76	265.14
	1.06	2.68	10.70	24.08	42.80	66.88	96.30	131.08	171.20	216.68	267.50
	1.07	2.70	10.79	24.29	43.18	67.47	97.15	132.23	172.71	218.59	269.87
	1.08	2.72	10.89	24.50	43.56	68.06	98.01	133.40	174.23	220.51	272.24
	1.09	2.75	10.98	24.72	43.94	68.65	98.86	134.56	175.75	222.44	274.61
	1.10	2.77	11.08	24.93	44.32	69.25	99.72	135.73	177.28	224.37	277.00
1.11	2.79	11.18	25.14	44.70	69.85	100.58	136.90	178.81	226.30	279.38	
1.12	2.82	11.27	25.36	45.08	70.44	101.44	138.07	180.34	228.24	281.78	
1.13	2.84	11.37	25.58	45.47	71.04	102.30	139.25	181.87	230.18	284.18	
1.14	2.87	11.46	25.79	45.85	71.65	103.17	140.42	183.41	232.13	286.58	
1.15	2.89	11.56	26.01	46.24	72.25	104.04	141.61	184.95	234.08	288.99	
1.16	2.91	11.66	26.23	46.62	72.85	104.91	142.79	186.50	236.04	291.40	
1.17	2.94	11.75	26.44	47.01	73.46	105.78	143.97	188.05	238.00	293.82	
1.18	2.96	11.85	26.66	47.40	74.06	106.65	145.16	189.60	239.96	296.25	
1.19	2.99	11.95	26.88	47.79	74.67	107.52	146.35	191.15	241.93	298.68	
1.20	3.01	12.04	27.10	48.18	75.28	108.40	147.55	192.71	243.90	301.11	
1.21	3.04	12.14	27.32	48.57	75.89	109.28	148.74	194.27	245.88	303.55	
1.22	3.06	12.24	27.54	48.96	76.50	110.16	149.94	195.84	247.86	306.00	
1.23	3.08	12.34	27.76	49.35	77.11	111.04	151.14	197.41	249.84	308.45	
1.24	3.11	12.44	27.98	49.74	77.73	111.93	152.34	198.98	251.83	310.90	
1.25	3.13	12.53	28.20	50.14	78.34	112.81	153.55	200.55	253.83	313.37	
1.26	3.16	12.63	28.42	50.53	78.96	113.70	154.76	202.13	255.82	315.83	
1.27	3.18	12.73	28.65	50.93	79.58	114.59	155.97	203.71	257.82	318.30	

Tabla 119. Vida útil (periodo de iniciación) de una mezcla de concreto en años en función del espesor de recubrimiento "x" y del Factor Edad "qb".



Las tablas de diseño son una modalidad en donde la variable dependiente es la vida útil ( $T_i$ ). Otra modalidad es la elaboración de ábacos (gráficas) en donde la variable dependiente es el espesor de recubrimiento del acero de refuerzo.

Los ábacos de diseño son otra forma de representar el desempeño (en términos de durabilidad) de nuestras mezclas de concreto en función del valor del factor edad “ $q_b$ ”.

Se elaboraron 2 ábacos, distinguiéndose 4 casos para cada uno de ellos. Los valores del espesor de recubrimiento de las mezclas de concreto se calcularon con la fórmula empírica:

$$x = \sqrt{\frac{T_i F_{exp} \left(\frac{28}{t_n}\right)^{0.5163} q_b^{0.715}}{26,671 q_b^{1.3498} r_{cl}}} \quad (53)$$

Para el ábaco “1A”, los valores de los parámetros son:

	Caso “A”	Caso “B”	Caso “C”	Caso “D”
$F_{exp}(\Omega - cm^3/año)$	25,000	25,000	5,000	5,000
$r_{cl}$ (adimensional)	1.30	2.00	1.30	2.00
$T_n$ (días)	120	120	120	120
$T_i$ (años)	100	100	100	100

En los cuatro casos el valor de la vida útil (periodo de iniciación) y el valor de  $T_n$  son iguales, 100 años y 120 días respectivamente.

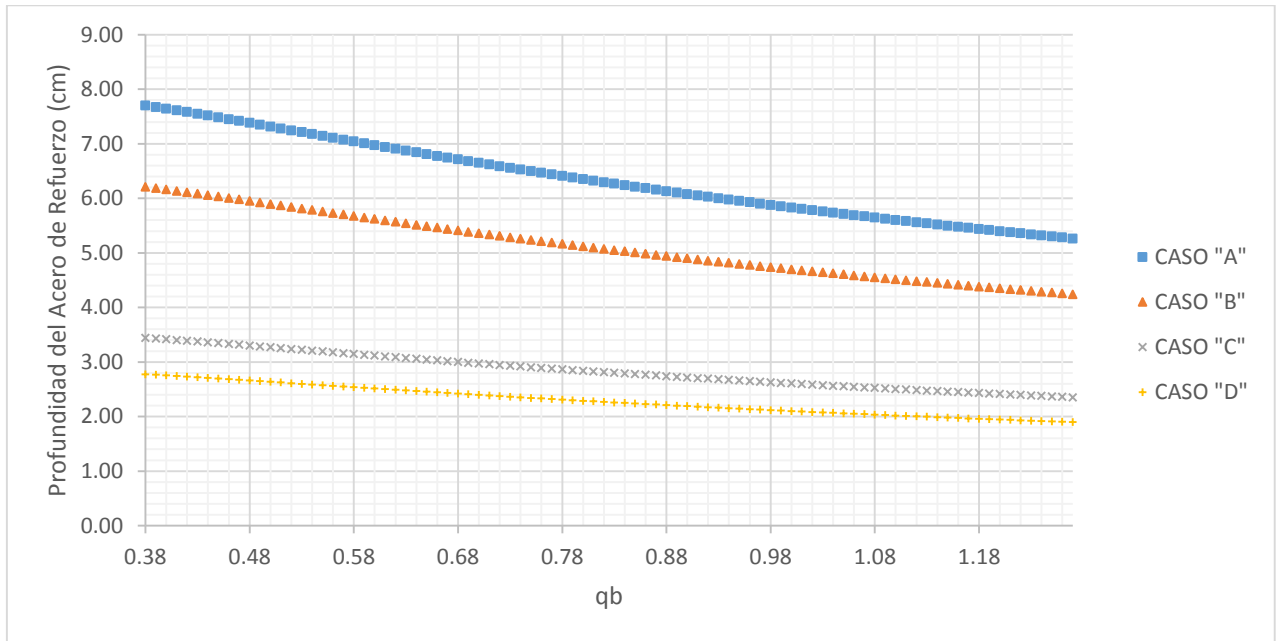
El caso “A” representa la condición más desfavorable a la que pudiera estar sometida una mezcla de concreto, por el contrario, el caso “D” representa la condición más favorable.

Para el ábaco “1B”, los valores de los parámetros son:

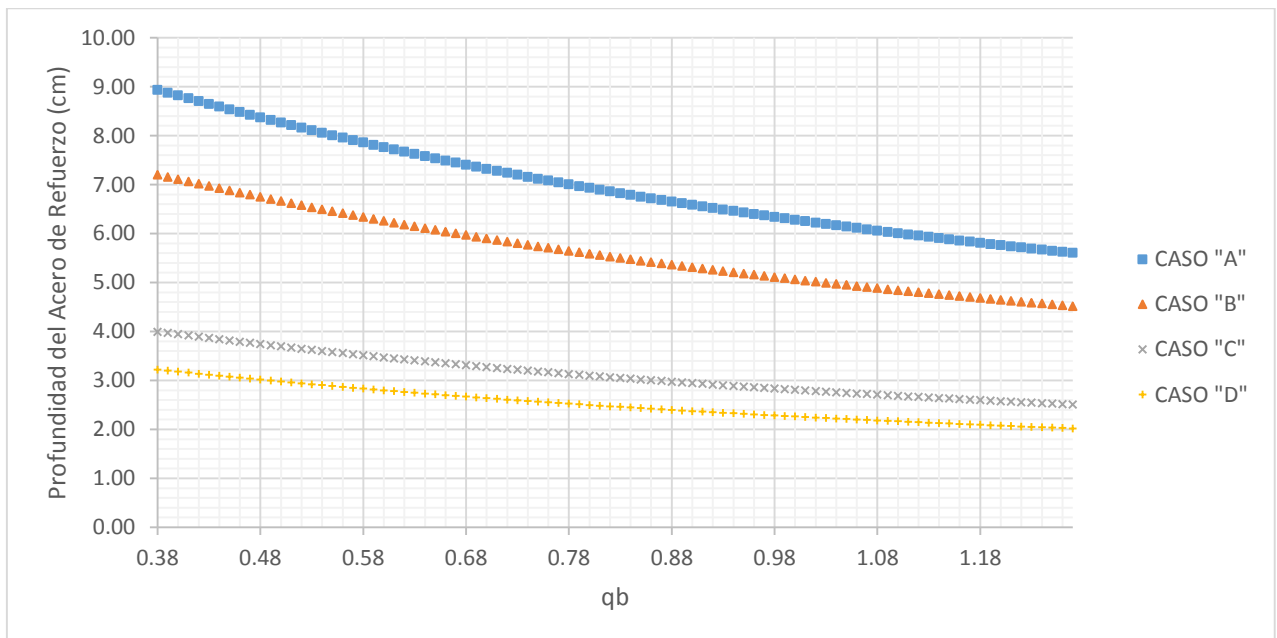
	Caso “A”	Caso “B”	Caso “C”	Caso “D”
$F_{exp}(\Omega - cm^3/año)$	25,000	25,000	5,000	5,000
$r_{cl}$ (adimensional)	1.30	2.00	1.30	2.00
$T_n$ (días)	90	90	90	90
$T_i$ (años)	100	100	100	100



Por lo tanto:



**Gráfica 64.** Ábaco de diseño “1A”, el cual relaciona el espesor de recubrimiento “x” y el valor del factor edad “ $q_b$ ” para diferentes casos.



**Gráfica 65.** Ábaco de diseño “1B”, el cual relaciona el espesor de recubrimiento “x” y el valor del factor edad “ $q_b$ ” para diferentes casos.



**5.13. Relación entre el parámetro “q<sub>b</sub>” (age factor before 28 days cured) y la composición de las mezclas de concreto.**

La finalidad de relacionar el valor del parámetro “q<sub>b</sub>” con la composición que presenta cada una de las trece mezclas analizadas, es proporcionar al diseñador de mezclas de concreto valores orientativos de los componentes y su correspondiente valor del parámetro “q<sub>b</sub>”. Es decir, el valor del parámetro “q<sub>b</sub>” estará en función de las cantidades de cada uno de los componentes que integren a la mezcla (Ver tabla ciento veinte).

Los componentes de las trece mezclas de concreto son:

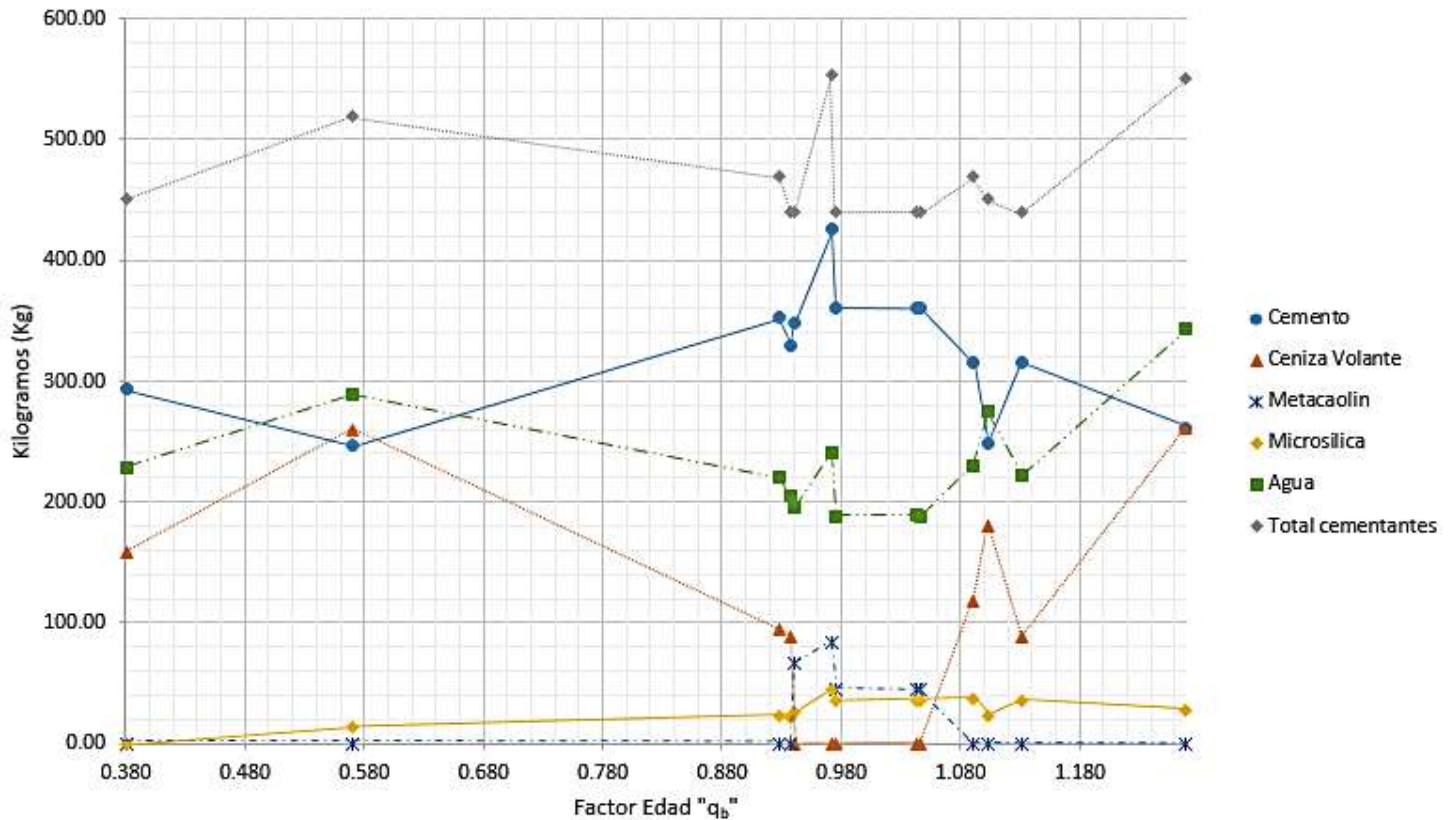
- a) Cemento
- b) Ceniza Volante
- c) Metacaolín
- d) Microsilica
- e) Agua

	Denominación	Total de cementantes (Kg)	Cemento (Kg)	Ceniza Volante (Kg)	Metacaolín (Kg)	Microsilica (Kg)	Relación a/c	Agua (kg)	q <sub>b</sub>	(ρ) <sup>28días</sup> (KΩ-cm)	q <sub>a</sub>
Cementera A	M-151	440.00	360.80	0.00	44.00	35.20	0.43	187.80	0.975	30.60	0.439
	M-155	440.00	347.60	0.00	66.00	26.40	0.44	194.94	0.940	28.39	0.451
	M-156	553.00	425.80	0.00	82.95	44.24	0.43	240.27	0.972	30.80	0.511
	M-153	470.00	352.50	94.00	0.00	23.50	0.47	220.00	0.928	24.71	0.625
	M-153 B	470.00	314.90	117.50	0.00	37.60	0.49	229.85	1.091	32.33	0.456
	M-158	440.00	360.80	0.00	44.00	35.20	0.43	189.20	1.044	23.05	0.487
	M-157	440.00	360.80	0.00	44.00	35.20	0.43	187.80	1.047	25.28	0.449
Cementera B	SACYR 1	550.00	261.25	261.25	0.00	27.50	0.62	343.16	1.269	38.81	0.586
	SACYR 2	440.00	330.00	88.00	0.00	22.00	0.47	205.33	0.937	22.27	0.526
	SACYR 3	439.20	316.00	88.00	0.00	35.20	0.51	222.38	1.131	31.97	0.435
	SACYR 4	450.50	248.00	180.00	0.00	22.50	0.61	274.30	1.103	26.08	0.529
	SACYR 5	451.00	293.00	158.00	0.00	0.00	0.51	227.81	0.381	7.90	0.960
	SACYR 6	520.00	247.00	260.00	0.00	13.00	0.55	288.42	0.570	10.35	0.979

**Tabla 120.** Relación entre el valor del Factor Edad “q<sub>b</sub>” y la composición de las mezclas de concreto.



Para apreciar de una mejor manera la información contenida en la tabla número 120, se elaboró la siguiente gráfica:



**Gráfica 66.** Relación entre el valor del factor edad "q<sub>b</sub>" y la composición de la mezcla de concreto.

En la gráfica anterior se puede observar que el valor del factor edad "q<sub>b</sub>" está influenciado principalmente por la cantidad de cemento y ceniza volante, conforme el valor del parámetro "q<sub>b</sub>" aumenta se presentan dos casos:

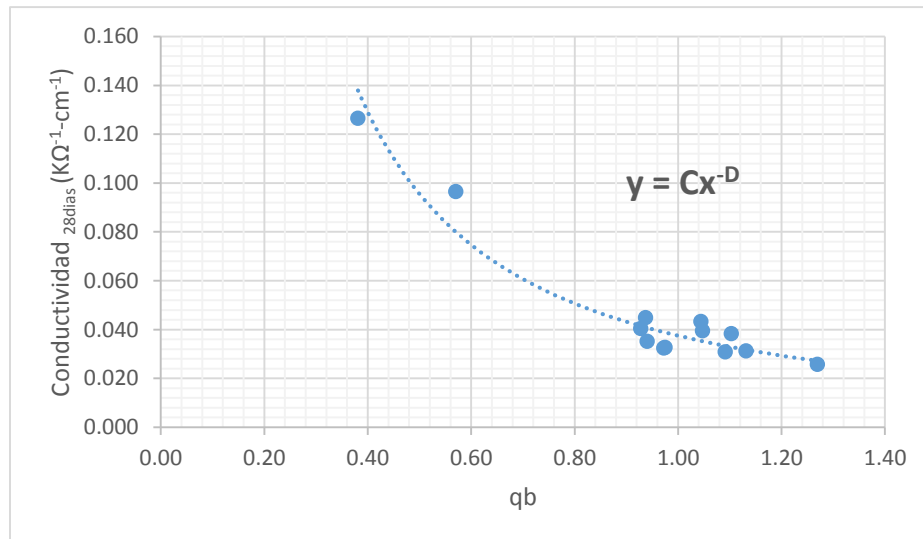
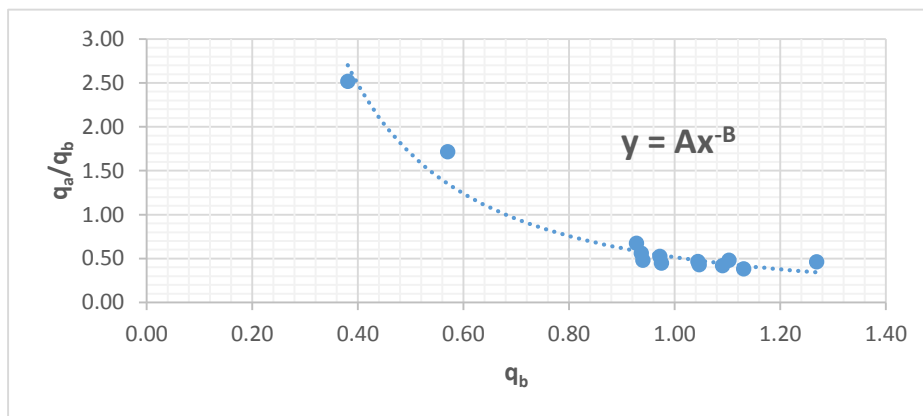
- Cuando el valor del contenido de cemento aumenta el valor del contenido de ceniza volante decrece.
- Cuando el valor del contenido de cemento decrece el valor del contenido de ceniza volante aumenta.



Lo anterior nos lleva a pensar que:

Los valores de los coeficientes **A**, **B**, **C** y **D** que resultan del ajuste potencial estarán en función de:

- a) Cantidad y tipo de cemento.
- b) Cantidad y clase de ceniza volante.
- c) Cantidad y origen del metacaolín.
- d) Cantidad de microsilica.
- e) Contenido de agua
- f) Cantidad total de cementantes y valor de la relación agua - cemento.



**Gráfica 67.** Coeficientes *A*, *B*, *C* y *D* en función de la cantidad y tipo de componentes.



Al obtener diferentes valores de los coeficientes A, B, C y D variando el tipo y cantidad de los componentes de la mezcla de concreto, la fórmula empírica obtenida con anterioridad para la determinación de la vida útil (periodo de iniciación) quedaría de la siguiente manera:

$$x = \sqrt{\frac{T_i F_{exp} \left(\frac{28}{t_n}\right)^{\frac{A}{B-1}}}{1000 \frac{1}{C} q_b^D r_{cl}}} \quad (54)$$

O también:

$$T_i = 1000 \frac{1}{C} \frac{x^2 q_b^D r_{cl}}{F_{exp} \left(\frac{28}{t_n}\right)^{\frac{A}{B-1}}} \quad (55)$$



#### 5.14. Diseño de mezclas de concreto a partir del parámetro “q<sub>b</sub>” (age factor before 28 days cured).

---

El diseño de una mezcla de concreto a partir del parámetro “q<sub>b</sub>” representa una secuencia ordenada de pasos. A manera de explicar cada uno de ellos se muestra el siguiente ejemplo de cálculo:

1. Establecer el valor de los siguientes parámetros.
  - a) *Tiempo del periodo de propagación (T<sub>i</sub>):* 100 años.
  - b) *Factor de Exposición (F<sub>exp</sub>):* 25,000 ( $\Omega - cm^3/año$ ).
  - c) *Último día de medición del valor de Resistividad (T<sub>n</sub>):* 90 días.
  
2. Se selecciona un valor para r<sub>cl</sub>, en función del tipo de cemento:

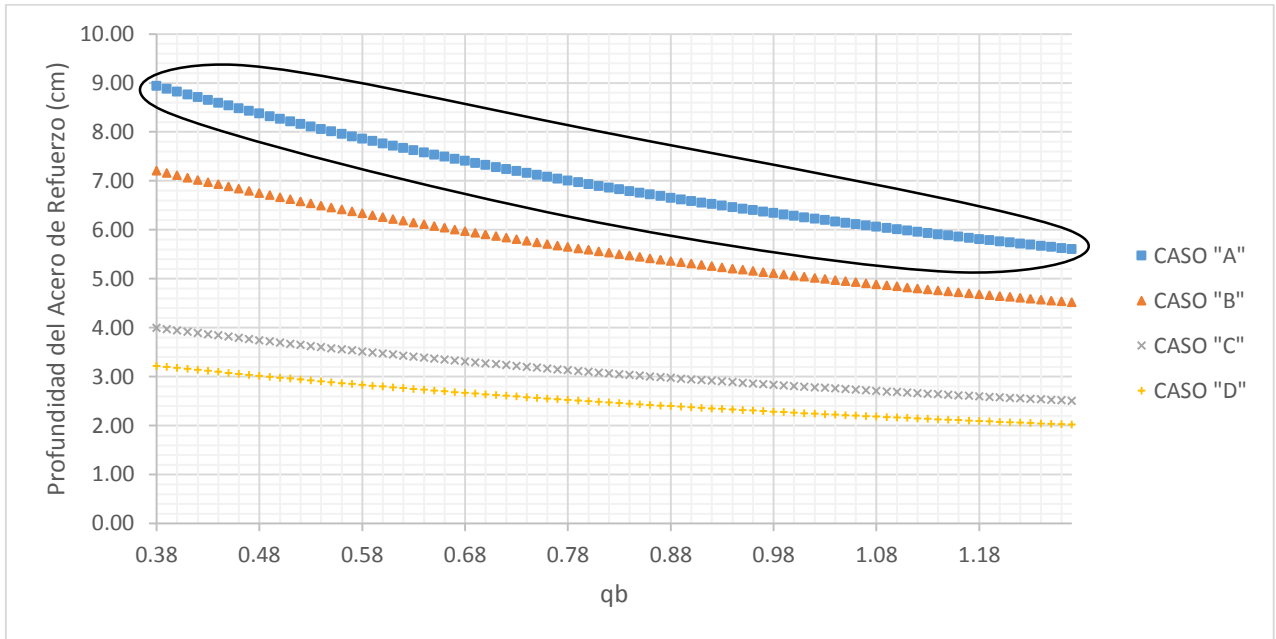
	Tipo de Cemento	Factor de retardo
<b>CLOURUROS</b>	Tipo I	1.30
	Tipo II y III/A	1.50
	Tipo III/B, III/C y IV	2.00

**Tabla 121.** Valores simplificados del factor de retardo (PNE 83994-2, 2016).

Se recomienda utilizar el valor de 1.30 (En favor de la durabilidad de la mezcla).

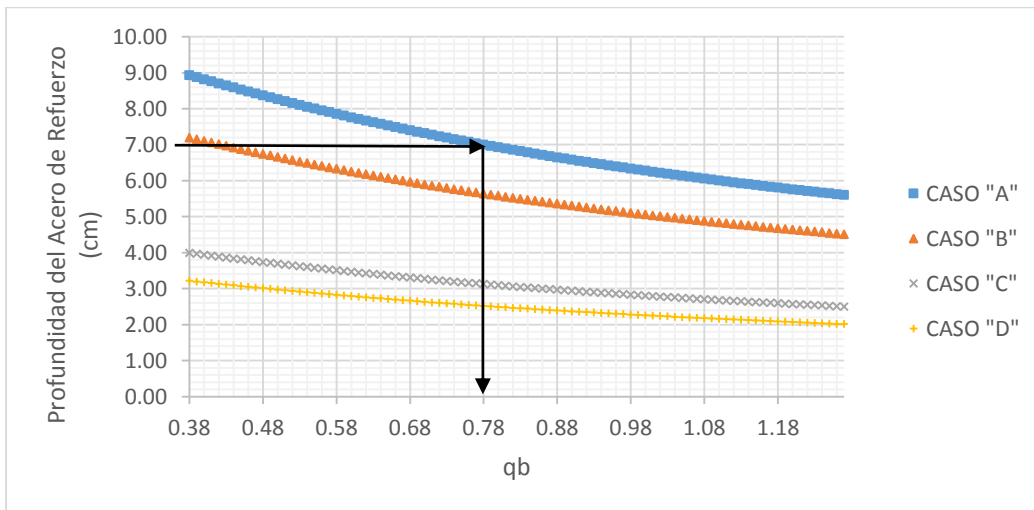
- a) Factor de retardo (r<sub>cl</sub>): 1.30 (adimensional).
- 
3. En función de los valores establecidos en el paso número 1 y 2, se elige el ábaco de diseño y caso adecuado:

Para nuestros datos de entrada, el ábaco de diseño sería el “1B” - caso A:



**Gráfica 68.** Ábaco de diseño “1B”, el cual relaciona el espesor de recubrimiento “ $x$ ” y el valor del factor edad “ $q_b$ ” para diferentes casos.

4. Se especifica el valor del espesor de recubrimiento del acero de refuerzo:
  - a) Espesor de recubrimiento ( $x$ ): 7.00 (cm).
5. Se obtiene el valor del factor edad “ $q_b$ ” a partir del ábaco de diseño y del valor del espesor de recubrimiento.

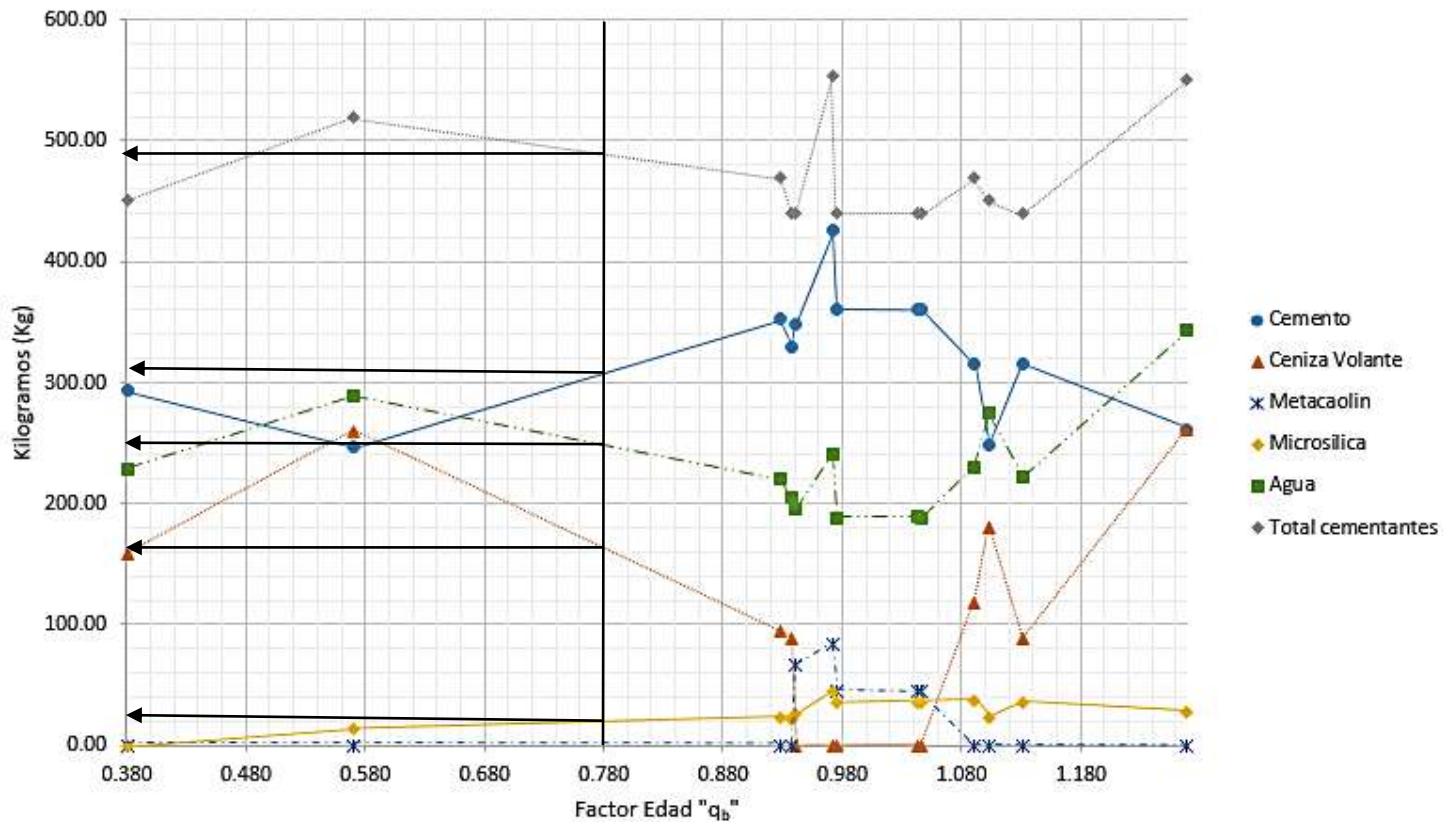




Por lo tanto:

a) Valor del factor edad “ $q_b$ ”: 0.780

6. En función del valor del factor edad “ $q_b$ ” se obtienen las cantidades de cada uno de los compuestos de la mezcla de concreto:



De la gráfica anterior se obtiene:

- a) Cemento: 310 kg.
- b) Ceniza Volante: 160 kg.
- c) Metacaolín: 0 kg.
- d) Microsilica: 20 kg.
- e) Agua: 250 kg.
- f) Total de cementantes: 490 kg.

Por lo cual el valor de la Relación Agua/Cemento será de: 0.51



Las cantidades anteriormente mostradas en el paso 6, son para obtener una mezcla de concreto con una vida útil de 100 años (periodo de iniciación) con un espesor de recubrimiento del acero de refuerzo de 7 cm.

### 5.15. Beneficio en el costo del diseño de la mezcla de concreto.

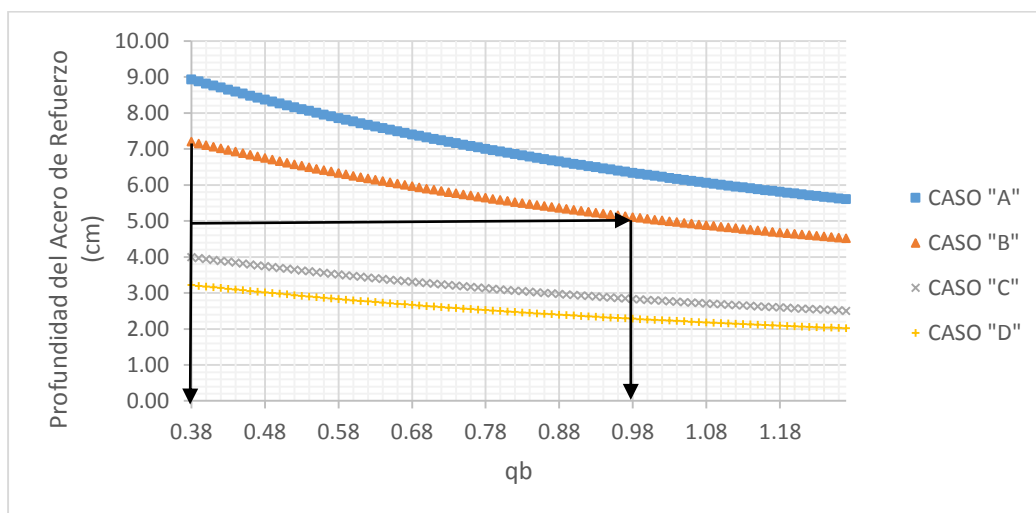
El diseñar mezclas de concreto con base en la metodología vista con anterioridad, es decir, con base en el valor del parámetro “ $q_b$ ” (Age Factor Before 28 Days Cured) representa una gran ventaja, la cual se refleja en el costo de la obra.

Los ábacos de diseño relacionan el espesor de recubrimiento del acero de refuerzo con el valor del factor “ $q_b$ ” (en función de los valores de los parámetros requeridos), la gráfica 66 muestra las cantidades de cada uno de los componentes de la mezcla de concreto con su correspondiente valor del factor edad “ $q_b$ ”. Esto significa que, existe la posibilidad de disminuir el costo de la mezcla de concreto que se empleara en obra.

Por ejemplo, supongamos que en una obra el espesor de recubrimiento del acero de refuerzo deberá estar entre 5 a 7 cm, cuyos parámetros de entrada son:

- a)  $F_{exp} \left( \Omega - \frac{cm^3}{año} \right) = 25,000$
- b)  $r_{cl} (adimensional) = 2.00$
- c)  $T_n (días) = 90$
- d)  $T_i (años) = 100$

Empleando el ábaco de diseño “1B” (Caso B):





Por lo tanto:

<i>Espesor de Recubrimiento (cm)</i>	<i>Factor Edad “qb”</i>
5	0.980
7	0.380

Ahora que sabemos el valor del factor edad “qb”, obtenemos las cantidades de cada uno de los componentes de las mezclas con base en la gráfica 66:

<i>Componente</i>	<i>qb=0.380 (7 cm)</i>	<i>qb=0.980 (5 cm)</i>
Cemento (Kg.)	293.00	361.00
Ceniza Volante (Kg.)	158.00	0.00
Metacaolín (Kg.)	0.00	44.00
Microsilica (Kg.)	0.00	35.00
Agua (Kg.)	227.81	187.80
Total de cementantes (Kg.)	451.00	440.00
Relación agua/cemento	0.51	0.43

Con base en la información contenida en la tabla anterior, podríamos llevar a cabo un estudio económico, en donde se analizara el precio de cada uno de los componentes que integran la mezcla de concreto (el costo final de la mezcla) y los metros cúbicos de mezcla requeridos.

Pareciera que la mezcla de concreto que presenta un valor de 0.980 del factor edad “qb” es la mezcla que nos generaría el menor costo ya que solamente requerimos 5 cm de espesor, más sin embargo presenta un alto contenido de cemento lo cual hace que el costo de elaboración de la mezcla se incremente.



## ANÁLISIS Y CONCLUSIONES.

---

Con base en los criterios de durabilidad que marca el manual de la Red DURAR (2000) y en función de los resultados obtenidos en cada una de las pruebas realizadas a los testigos de concreto (resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión), la calidad de las siete mezclas de concreto elaboradas por la Cementera A y de las seis mezclas de concreto elaboradas por la Cementera B puede ser considerada como “*durable*”, a su vez, el riesgo de corrosión de las trece mezclas de concreto se clasifica como “*moderado*”.

Dentro de las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera A, la mezcla de concreto 3 (M-156) fue la que presentó un mejor desempeño (en términos de durabilidad) en la prueba de resistividad eléctrica a los 120 días de análisis, con un valor de 66.35 k $\Omega$ -cm. En este mismo ámbito, de las mezclas de concreto elaboradas por la Cementera B, la mezcla de concreto 1 (SACYR 1) fue la que presentó un mejor desempeño (en términos de durabilidad) en la prueba de resistividad eléctrica a los 177 días de análisis, con un valor de 116.67 k $\Omega$ -cm.

En la prueba de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) las mezclas de concreto 1 (M-151) y 6 (SACYR 6) presentaron los valores más altos, 4,566.78 m/s y 4,801.81 m/s respectivamente. El valor de la velocidad de pulso ultrasónico de la mezcla de concreto 1 (M-151) perteneciente a la Cementera A fue obtenido a los 120 días de análisis, el valor de la VPU de la mezcla 6 (SACYR 6) perteneciente a la cementera B fue obtenido a los 177 días de análisis.

Por lo que respecta a la prueba de compresión simple, las mezclas de concreto que presentaron un mejor desempeño fueron, la mezcla de concreto 1 (M-151) y la mezcla de concreto 4 (SACYR 4) con valores de 80.60 MPa (a los 120 días de análisis) y 91.53 MPa (a los 177 días de análisis) respectivamente.

No existe alguna mezcla de concreto que presente el mejor desempeño (en términos de durabilidad) dentro de las tres pruebas realizadas (resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión), por ejemplo, en la prueba de resistividad eléctrica destacan las mezclas de concreto M-156 y SACYR 1, mientras que en la prueba de resistencia a la compresión simple las mezclas de concreto M-151 y SACYR 4 presentan los mayores valores.

Debido a lo anterior, se concluye que: no se puede definir cuál de las trece mezclas elaboradas presenta el mejor desempeño con base en los criterios de durabilidad que marca el manual de la Red DURAR (2000), además dentro de esta clasificación no se toma en cuenta la agresividad del medio ambiente que rodeara a la estructura de concreto, por lo cual estaríamos determinando la durabilidad de las mezclas de concreto de una manera cualitativa y no cuantitativa.



Con el objetivo de subsanar la deficiencia mencionada en el párrafo anterior, es decir, determinar de manera cuantitativa la durabilidad de las trece mezclas de concreto y no solo de manera cualitativa, se calculó el tiempo que tardarían los iones despasivantes en atravesar el espesor de recubrimiento del acero de refuerzo, en función de la agresividad del medio ambiente, de las propiedades del concreto y del espesor de recubrimiento.

La mezcla de concreto que presenta el menor espesor de recubrimiento del acero de refuerzo para un periodo de iniciación ( $T_i$ ) de 100 años es la mezcla de concreto número 1 (SACYR 1), con un espesor de recubrimiento de 4.60 cm. Por lo tanto se podría decir que, la mezcla de concreto SACYR 1 elaborada por la Cementera B y sujeta a las condiciones más críticas, presenta el mejor desempeño en términos de durabilidad cuantitativa, comparado con el desempeño obtenido de las doce mezclas de concreto restantes, las cuales fueron analizadas bajo las mismas condiciones.

Las mezclas de concreto que arrojan los menores espesores de recubrimiento son las mezclas 1 (SACYR 1) y 3 (M-156), las cuales presentan los mayores contenidos de cementantes,  $550 \text{ kg/m}^3$  y  $553 \text{ kg/m}^3$  respectivamente. Con base en lo anterior, se podría enunciar lo siguiente: *“Entre mayor sea el contenido de cementantes menor será el espesor de recubrimiento requerido”*. La frase anteriormente citada es parcialmente cierta, ya que la mezcla con mayor contenido de cementantes (M-156) no necesariamente resulta en aquella mezcla que nos arroje el menor espesor de recubrimiento, por ende, la durabilidad cuantitativa de una mezcla de concreto no solo dependerá de la cantidad de cementantes sino también del tipo y de la proporción que guarden cada uno de ellos, además de otros factores.

Los ábacos o monogramas de diseño obtenidos relacionan el espesor de recubrimiento del acero de refuerzo con el valor del factor “ $q_b$ ” y este a su vez se relaciona con las cantidades de cada uno de los componentes de la mezcla. Estos ábacos de diseño representan una herramienta muy útil para el ingeniero que diseña mezclas de concreto, ya que existe la posibilidad de disminuir costos en la obra, jugando con las variables *“espesor de recubrimiento”*, *“tipo de cementantes”*, *“cantidad de cementantes”* y *“costo de los cementantes”*.

Los ábacos de diseño que emanan de esta investigación, pueden servir de base para generar otros ábacos de diseño en función de la *cantidad y tipo de cemento*, *cantidad y tipo de adición*, *del contenido de agua*, *de la cantidad total de cementantes así como del valor de la relación agua - cemento*.

No existe un elemento único para lograr la vida útil requerida de 100 años. Cada uno de los componentes del concreto debe cumplir con un desempeño adecuado y al mismo tiempo, al ser combinados en las proporciones adecuadas, deben interactuar de manera correcta para lograr que todas las propiedades necesarias puedan ser alcanzadas tanto en estado fresco como en estado endurecido a lo largo del tiempo.



## BIBLIOGRAFÍA.

---

- Aguilar, R. (2015, diciembre 20). *Comportamiento del suelo y obras en el ex lago de Texcoco*. Geotecnia, 238, pp. 1-6.
- Bentur, A., Diamond, S., and Berke, N.S., 1997. “*Steel Corrosion in Concrete*”, Modern Concrete Technology 6, Fundamentals and Civil Engineering Practice, Ed. E&FN SPON, first edition, Londres. Identificado como Migration Test Method.
- Hernández, O. & Mendoza, C. (2006). *Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico*. UNAM, pp. 57-70.
- Neville A. (2001). *Maintenance and Durability of Concrete Structures*. Concrete International. November.
- ACI-201, “*Proposed revision of guide to durable concrete*”, ACI Materials Journal, 88, 5 (1991): p.544.
- RILEM Report 12, “*Performance criteria for concrete durability*”, Eds. Kropp J., y Hilsdorf., (London, UK: E & FN SPON, 1996).
- DURAR (2000). “Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en Estructuras de Concreto Armado”. CYTED. Tercera edición. Agosto, ISBN 980-296-541-3.
- RILEM Report 14, “*Durability design of concrete structures*,” Eds. Sarja A. y Vesikari E., (London, UK: E & FN SPON, 1996).
- Torres, A. & Martínez, M. (2001). *Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad*. IMT, 181, pp. 1 - 39.
- Revista ALCONPAT, Volumen 1, Número 2, Mayo - Agosto 2011, Páginas 90 – 98.
- CEB, “*Durable concrete structures, design guide, eurointernational committee for concrete*,” (London, UK: Thomas Thelford Services Ltd., 1992).
- Tuutti, K., “*Corrosion of steel in concrete*” (Stockholm, Sweden: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982).
- Bazant, Z. P, “*Physical model for steel corrosion in concrete sea structures - theory*,” J. Struct. Div., ASCE, 105 (ST6), 1979a, pp. 1137-1153.
- Bazant, Z. P, “*Physical model for steel corrosion in concrete sea structures - application*,” J. Struct. Div., ASCE, 105 (ST6), 1979b, pp. 1155-1166.
- Browne, R. D., “*Mechanism of corrosion of steel in concrete in relation to design, inspection and repair of offshore and coastal structures*,” ACI SP-65, Ed. Malhotra, V. M., (Detroit, Michigan, USA: American Concrete Institute, 1980), pp. 169-204.
- Beeby, A. W., “*Cracking, cover, and corrosion of reinforcement*,” Conc. Intl., 5 (2), 1983, pp. 35-40.



Andrade, C., & D' Andrea, R. (2011). La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. *ALCONPAT*, 1(2), 92-94.

Kosmatka, Steven H.; Kerkhoff, Beatrix; Panarese, William C.; y Tanesi, Jussara: Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU., 2004.

PNE 83994-2, *Durabilidad del hormigón. Estrategia de comprobación de la durabilidad en niveles. Parte 2: Cálculo de la vida útil en relación a la corrosión de armaduras a través de la resistividad. Abril 2016.*

Picos, M. (2014). *Durabilidad en el hormigón armado: La resistividad eléctrica como indicador de durabilidad (tesis de grado)*. Universidade da Coruña, La Coruña, España.



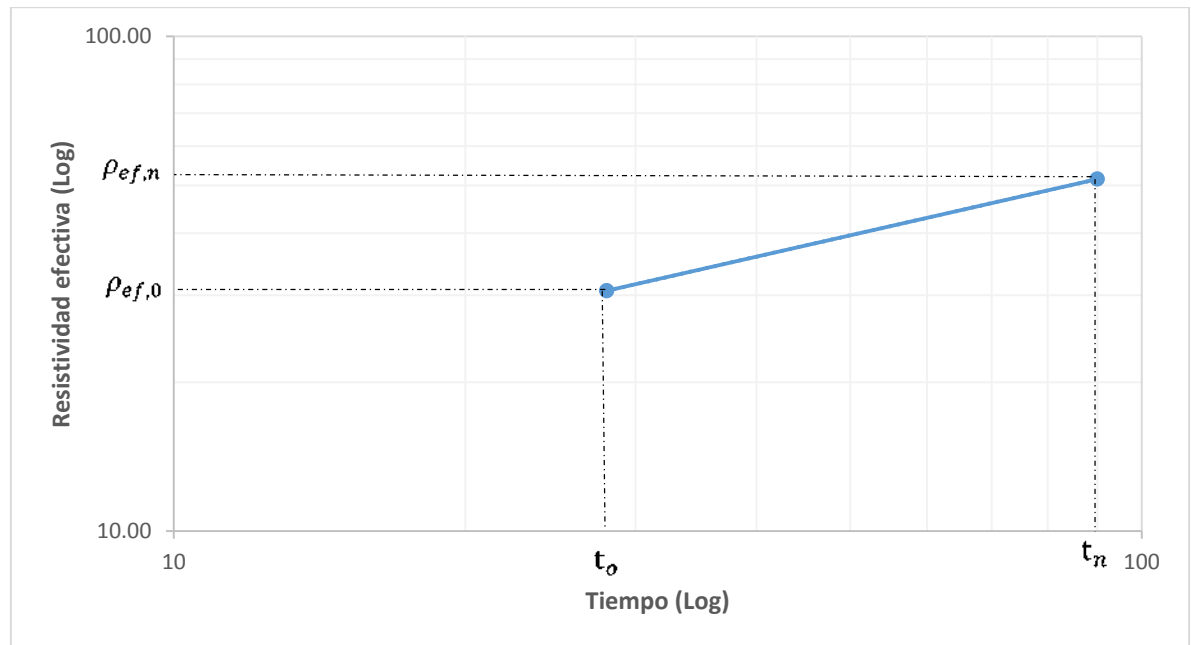
### ANEXO A (Informativo).

En este anexo, se muestra como el último valor de resistividad  $\rho_{ef,n}$  que se mide puede ser expresado de la forma (PNE 83994-2, 2016):

$$\rho_{ef,0} \left(\frac{t_n}{t_0}\right)^q \quad (A1)$$

Para obtener la expresión A1, debe seguirse una secuencia ordenada de pasos:

- Se obtienen los valores de resistividad efectiva a la edad de 28 días ( $t_0$ ) y a la última edad que se midió esta ( $t_n$ ).
- Se grafican ambos valores en escala logarítmica, colocando en el eje de las ordenadas los valores de resistividad efectiva y en el eje de las abcisas el tiempo  $t_0$  y  $t_n$ , obteniendo un gráfico como el que se muestra a continuación:



**Gráfica 69.** Valores de resistividad efectiva en los tiempos  $t_0$  y  $t_n$  (escala logarítmica).



De la gráfica 69 se infiere que:

$$\frac{\text{Log}(\Delta\rho)}{\text{Log}(\Delta t)} = \text{constante} \quad (\text{A2})$$

Recordemos que la pendiente de una recta es constante, la cual podría representarse con la letra “q”:

$$\frac{\text{Log}(\Delta\rho)}{\text{Log}(\Delta t)} = q \quad (\text{A3})$$

Sabemos que:

$$\text{Log}(\Delta\rho) = \text{Log}(\rho_{ef,n}) - \text{Log}(\rho_{ef,0}) \quad (\text{A4})$$

$$\text{Log}(\Delta t) = \text{Log}(t_n) - \text{Log}(t_0) \quad (\text{A5})$$

Sustituyendo las ecuaciones A4 y A5 en la ecuación A3:

$$\frac{\text{Log}(\rho_{ef,n}) - \text{Log}(\rho_{ef,0})}{\text{Log}(t_n) - \text{Log}(t_0)} = q \quad (\text{A6})$$

Despejando  $\rho_{ef,n}$

Aplicando las propiedades de los logaritmos base 10:

$$\frac{\text{Log}\left(\frac{\rho_{ef,n}}{\rho_{ef,0}}\right)}{\text{Log}\left(\frac{t_n}{t_0}\right)} = q \quad (\text{A7})$$

$$\text{Log}\left(\frac{\rho_{ef,n}}{\rho_{ef,0}}\right) = q \text{Log}\left(\frac{t_n}{t_0}\right) \quad (\text{A8})$$



$$\text{Log} \left( \frac{\rho_{ef,n}}{\rho_{ef,0}} \right) = \text{Log} \left( \frac{t_n}{t_0} \right)^q \quad (\text{A9})$$

Aplicando base 10 en ambos miembros de la ecuación A9:

$$10^{\text{Log} \left( \frac{\rho_{ef,n}}{\rho_{ef,0}} \right)} = 10^{\text{Log} \left( \frac{t_n}{t_0} \right)^q} \quad (\text{A10})$$

$$\frac{\rho_{ef,n}}{\rho_{ef,0}} = \left( \frac{t_n}{t_0} \right)^q \quad (\text{A11})$$

Despejando  $\rho_{ef,n}$  de la ecuación A11:

$$\rho_{ef,n} = \rho_{ef,0} \left( \frac{t_n}{t_0} \right)^q \quad (\text{A12})$$

Donde:

$\rho_{ef,n}$  = Último valor medido de Resistividad efectiva, la cual se calcula a partir de especímenes de concreto en estado saturado, en  $\Omega\text{-cm}$ .

$\rho_{ef,0}$  = Resistividad efectiva obtenida a los 28 días de curado en cámara húmeda a una humedad relativa superior al 95% y  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura, en  $\Omega\text{-cm}$ .

$t_n$  = Es la última edad que se mide la resistividad efectiva.

$t_0$  = Es la edad de 28 días en la que se toma el valor de resistividad. Ambas edades  $t_n$  y  $t_0$  deben introducirse en las mismas unidades.

$q$  = Es el factor edad (adimensional).