



---

---

# **DURABILIDAD DE CONCRETOS AUTOCONSOLIDABLES DE BAJA RELACIÓN AGUA CEMENTO Y ADICIONADOS CON MICROSÍLICA**

Andrés Antonio Torres Acosta  
Alejandro Moreno Valdés  
María Guadalupe Lomelí González  
Miguel Martínez Madrid  
L. Alejandra Díaz Cruz

**Publicación Técnica No. 512  
Sanfandila, Qro, 2018**



---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**  
**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Durabilidad de concretos autoconsolidables de baja  
relación agua cemento y adicionados con  
microsílica**

**Publicación Técnica No. 512**  
**Sanfandila, Qro, 2018**

---



Esta investigación, y consecuente transferencia tecnológica, fue realizada por el Dr. Andrés Antonio Torres Acosta, la Ing. María Guadalupe Lomelí González y el Dr. Miguel Martínez Madrid de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural (CIVIE) del Instituto Mexicano del Transporte (IMT); por el Ing. Alejandro Moreno Valdés, de la empresa EUCOMEX; y por la Ing. L. Alejandra Díaz Cruz, de la empresa COCONAL SA de CV.

Se agradece el apoyo económico y de logística de la Administración Portuaria Integral (API) de Progreso, y de las empresas COCONAL SA de CV y EUCOMEX SA de CV por el apoyo económico -vía becas de auxiliares de investigación- para la realización de este trabajo.

# Contenido

---

Índice de tablas		v
Índice de figuras		vii
Sinopsis		ix
Abstract		xi
Resumen	Ejecutivo	xiii
Introducción		1
Capítulo 1.	Antecedentes	3
Capítulo 2.	Metodología experimental	7
Capítulo 3.	Resultados	21
Capítulo 4.	Análisis de los resultados	35
Capítulo 5.	Conclusiones	41
Bibliografía		43

---

## Índice de tablas

---

Tabla 2.1	Criterios de evaluación de resistividad eléctrica en especímenes de concreto (NMX-C-514-ONNCCE-2016)	9
Tabla 2.2	Criterios de evaluación (Durar, 1998)	11
Tabla 2.3	Criterios de evaluación en base al porcentaje de porosidad (Durar, 1998)	11
Tabla 2.4	Criterios de evaluación para la resistencia a la compresión (Durar, 1998)	12
Tabla 2.5	Permeabilidad del ion cloruro basada en el paso de carga. (ASTM C-1202-12)	14
Tabla 2.6	Composición de las mezclas 1, 2 y 3	15
Tabla 2.7	Composición de las mezclas de Aditivo 3 y Aditivo 2	17
Tabla 3.1	Propiedades físicas de los agregados de Aditivo 3	21
Tabla 3.2	Pruebas en concreto fresco de Aditivo 3	21
Tabla 3.3	Resultados de PRC en mezclas de Aditivo 3	28
Tabla 3.4	Resultados de PRC en mezclas de Aditivo 1	28
Tabla 3.5	Resultados de PRC en mezclas de Progreso	31
Tabla 3.6	Resultados de las pruebas de PRC en mezclas de Progreso (8 de septiembre)	34



---

---

## Índice de figuras

---

Figura 2.1	Obtención de extensibilidad (izquierda) y contenido de aire (derecha)	8
Figura 2.2	Medición de la REH en cilindros de concreto	9
Figura 2.3	Prueba de VPU	10
Figura 2.4	Proceso de vacío en rodajas	13
Figura 2.5	Montaje de rodaja en celda de prueba y vaciado de soluciones	13
Figura 2.6	Conexión de celda a unidad de control	14
Figura 2.7	Elaboración de mezclas	17
Figura 2.8	Medición de extensibilidad de mezclas	18
Figura 3.1	Resultados de las pruebas de RC a 7 días en cada mezcla de Aditivo 3	22
Figura 3.2	Resultados de la prueba de VPU para mezclas de Aditivo 3	23
Figura 3.3	Resultados de la prueba de VPU para mezclas de Aditivo 1	23
Figura 3.4	Resultados de las pruebas de REH para M1 de Aditivo 3	24
Figura 3.5	Resultados de las pruebas de REH para M2 de Aditivo 3	24
Figura 3.6	Resultados de las pruebas de REH para M3 de Aditivo 3	25

---

Figura 3.7	Resultados de las pruebas de REH para M4, M5 y M6 de Aditivo 1	25
Figura 3.8	%TV para mezclas de Aditivo 3	27
Figura 3.9	%TV para mezclas de Aditivo 1	27
Figura 3.10	Comparación de la REH en mezclas de Aditivo 2 y Aditivo 3	29
Figura 3.11	Porcentaje Total de vacíos en ambas mezclas	30
Figura 3.12	Comparación de la REH en mezclas de Aditivo 1, Aditivo 2 y Aditivo 3	32
Figura 3.13	Porcentaje total de vacíos en las 4 mezclas	33
Figura 4.1	Correlación empírica entre REH y PRC	36
Figura 4.2	Correlación empírica entre REH y %TV	38
Figura 4.3	Correlación empírica entre %TV y PRC	39

# Sinopsis

---

Esta investigación incluye la evaluación de los índices de durabilidad de las mezclas de diseño de concretos autoconsolidables. Los índices de durabilidad que se han manejado en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) para caracterizar materiales base cemento (morteros y concretos) son: resistividad eléctrica húmeda (REH), velocidad de pulso ultrasónico (VPU), porcentaje total de vacíos (%TV), permeabilidad rápida de cloruros (PRC) y resistencia mecánica en compresión (RMC).

Las pruebas fueron realizadas con especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, los cuales fueron preparados en obra. Los cilindros una vez fabricados, descimbrados y curados por siete días como mínimo, fueron trasladados al Laboratorio de Desempeño Vehicular y Materiales (LDVM) del IMT. Una vez en el LDVM, los cilindros fueron colocados en tinas de curado hasta alcanzar las edades en las que fueron evaluados sus índices de durabilidad.

Los concretos evaluados incluyeron modificaciones en el tipo y marca del cemento, cantidad de material cementante, relaciones agua/cemento ( $a/c$ ), marca de los aditivos químicos y las adiciones minerales. Estas modificaciones fueron consideradas para que la mezcla de diseño cumpliera el desempeño establecido en las especificaciones de diseño de la obra.

# Abstract

---

This research includes the evaluation of the durability indices of the self-consolidating concrete design mixtures. The durability indexes that have been handled at the Mexican Institute of Transportation (IMT) to characterize cement-based materials (mortars and concretes) are wet electrical resistivity (REH), ultrasonic pulse velocity (VPU), total percentage of voids (% TV), rapid chloride permeability (PRC) and mechanical strength in compression (CMR).

The tests were carried out with cylindrical specimens of 10 cm in diameter and 20 cm in height, which were prepared on site. The cylinders, once manufactured, stripped and cured for a minimum of seven days, were transferred to the IMT Vehicle and Materials Performance Laboratory (LDVM). Once in the LDVM the cylinders were placed in curing vats until reaching the ages in which their durability indexes were evaluated.

The concretes evaluated included modifications in the type and brand of cement, amount of cementing material, water / cement ratio (a / c), brand of chemical additives and mineral additions. These modifications were considered so that the design mix fulfilled the performance established in the design specifications of the work.



## Resumen ejecutivo

---

Esta publicación presenta el procedimiento seguido en el IMT para caracterizar por durabilidad concretos denominados autoconsolidables. Con este se verifica el desempeño de diferentes mezclas de diseño de concreto autoconsolidable y se plantea como un procedimiento general para cualquier otro tipo de mezcla de diseño de concreto (o mortero) que busque tener las características de uno durable.

Se evaluaron tres grupos de mezclas de diseño fabricadas antes del inicio de una obra que se expondría a un ambiente marino tropical. Primeramente, se fabricaron las diferentes mezclas de diseño utilizando distintas marcas y tipos de cemento, así como diversas marcas y concentraciones de aditivos químicos reductores de agua de alto rango. Estas modificaciones a las mezclas de diseño fueron definidas para cumplir con la característica de que fuese un concreto autoconsolidable durable. También se evaluó el uso de microsíllica para reducir la porosidad del concreto ya endurecido.

Una vez fabricadas en obra estas mezclas, se prepararon cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de longitud, para la realización de las pruebas índice de durabilidad. Los cilindros fueron transportados de la obra al Laboratorio de Desempeño de Vehículos y Materiales (LDVM) del IMT, para realizar las siguientes pruebas índice: resistividad eléctrica húmeda (REH), velocidad de pulso ultrasónico (VPU), porcentaje total de vacíos (%TV), permeabilidad rápida de cloruros (PRC) y resistencia mecánica en compresión (RMC).

Las mezclas de concreto fueron elaboradas para que cumplieran con las siguientes especificaciones, solicitadas en el proyecto ejecutivo del viaducto:

- Consumo mínimo de cemento 480 kg/cm<sup>2</sup>.
- Peso volumétrico del concreto en estado plástico > 2 280 kg/m<sup>3</sup>.
- Extensibilidad de 65 ± 5cm, con caída máxima de 10 cm en 3 horas.
- Contenido de aire máximo 2.5.
- Considerar adición de microsíllica
- Resistencia a la compresión de 40 MPa a los 7 días.
- Resistividad eléctrica húmeda (REH) > 70 KΩ-cm a 90 días.
- Permeabilidad rápida de cloruros (PRC) < 1,000 Coulomb a 90 días.

La evaluación de los tres grupos de mezclas sirvió para definir el tipo de concreto a utilizar en la construcción de una obra a exponerse en ambiente marino tropical. Se encontraron algunas propiedades que deben cumplir las materias primas (cemento, agregado, aditivos, agua) seleccionadas para la fabricación de concretos durables autoconsolidables. Se compararon los resultados obtenidos y se hace mención de estas características que cada materia prima base del concreto a fabricar, debe de cumplir para tener la certeza de que la mezcla de concreto seleccionada, cumpla los valores índices de durabilidad.

Los resultados demostraron que los concretos autoconsolidables con mejor desempeño por durabilidad, que correspondían con los de mejores valores índice de durabilidad, fueron aquellos en los que se utilizaron cementos con un Blaine mayor a 400 m<sup>2</sup>/kg, una relación a/c menor a 0.35, adición de microsíllica del 8%, adiciones químicas de tercera generación (denominadas policarboxilatos) y los agregados tipo caliza con una densidad mayor a 2,400 kg/m<sup>3</sup> y arena con una finura no mayor a 3.



# Introducción

---

## Justificación

En la actualidad, las estructuras de concreto expuestas a ambientes agresivos (urbanos, marinos, industriales o marino/industriales) presentan daños prematuros durante su vida de servicio (menos de 10 años, luego de construirse y ponerse en servicio). La corrosión y sus manifestaciones de deterioro, conocido como patología de las construcciones, comúnmente son los agrietamientos y manchas de óxido en la superficie del concreto, y un proceso de deterioro aún más marcado, la delaminación del recubrimiento de concreto por la corrosión del acero de refuerzo o presfuerzo. Esta patología tan frecuente en la actualidad en estructuras de concreto regularmente se debe a que estas no han sido diseñadas con criterios de durabilidad sino un criterio mecanicista, por resistencia a las cargas mecánicas externas.

Usando criterios de selección de la mezcla de concreto que pueda resistir la agresividad del medio ambiente, se inicia el proceso del diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad. Una vez seleccionados los materiales que conformarán el concreto de la estructura por construir, el siguiente paso es el diseño de la misma estructura por resistencias mecánicas. Esto permitiría que dichas estructuras tengan una vida útil de diseño por arriba de los 80 años, para evitar así reparaciones costosas durante su servicio.

Es también importante mencionar que se desconocen los procedimientos adecuados para la construcción de estructuras durables, principalmente el uso adecuado de los materiales para la fabricación de este tipo de concretos (mezclado, transporte, colocado y curado).

Es por ello importante el definir los procedimientos para el diseño y la construcción de estructuras durables que serán expuestas a ambientes agresivos. En esta investigación se presentan los procedimientos de selección de los materiales para el diseño de mezclas de concreto con criterios de durabilidad.

## Objetivo general

Determinar los índices de durabilidad de mezclas de diseño de concreto, mediante pruebas de laboratorio; para seleccionar la que cumpla las características de concreto durable, basado en el desempeño solicitado en el proyecto ejecutivo de la obra que será construida en un ambiente marino tropical.

## **Metas**

1. Supervisar la fabricación de tres grupos de mezclas de prueba, realizados por personal de obra.
2. Realizar pruebas de laboratorio, denominadas pruebas índice de durabilidad, que el IMT promueve para obras durables de la SCT; las cuales son: resistividad eléctrica húmeda (REH), velocidad de pulso ultrasónico (VPU), porcentaje total de vacíos (%TV), permeabilidad rápida de cloruros (PRC) y resistencia mecánica en compresión (RMC).
3. Caracterizar datos obtenidos en pruebas físico-mecánicas realizadas a las mezclas de diseño fabricadas.
4. Analizar e interpretar los resultados de las pruebas índice de durabilidad, para tomar la decisión de cuál mezcla seleccionar y, con base en los resultados obtenidos, encontrar las características más importantes que deben cumplir los materiales que conforman el concreto para que cumpla el desempeño por durabilidad especificado en el proyecto ejecutivo.

# 1 Antecedentes

---

## 1.1 Diseño por durabilidad

Con base en la información disponible en códigos y reglamentos, el especialista responsable en durabilidad debe tomar en cuenta el ambiente al que van a estar expuestos la estructura y los materiales que serán empleados y poder ofrecer la vida de servicio esperada para la estructura. Hay que considerar aspectos como la agresividad química del medio y del suelo, atmósfera de exposición (HR y T) y otros agentes agresivos; los cuales influyen en la durabilidad de la estructura. Con base en estos y otros parámetros definidos en la literatura nacional e internacional, se debe establecer la vida de servicio de la estructura por diseñar.

Ante la necesidad de los usuarios y del fabricante, en calcular la durabilidad del concreto y poder mitigar los problemas causados por la corrosión, se comenzaron a investigar sus propiedades de transporte, concluyendo que sólo los métodos que miden directamente el transporte del dióxido de carbono o los iones cloruro son realistas (Andrade, 2011). La prueba más utilizada por las agencias estatales en Estados Unidos, para este propósito, es la PRC. Este método dura aproximadamente 6 horas y fue desarrollado originalmente por la Asociación de Cemento Portland (PCA) durante un programa de investigación financiado por la Administración Federal de Carreteras (FHWA), el cual, sustituyó al método de “Resistencia del Concreto a la Penetración del Ion Cloruro”, que usualmente duraba 90 días o más (Gudimettla, 2016).

En años recientes, el uso de la REH ha ganado bastante popularidad, ya que posee una gran correlación con la prueba de PRC (Gudimettla, 2016; Spragg R., 2013), y es un ensayo no destructivo mucho más sencillo de realizar. Varias investigaciones consideran que la resistividad eléctrica es además una propiedad capaz de mostrar aspectos del concreto; como su microestructura, porosidad y grado de saturación; así como un indicador del fraguado, resistencia mecánica, grado de saturación e impermeabilidad del concreto (Andrade, 2011); datos que pueden ser utilizados como indicador de corrosión para calcular los periodos de iniciación y propagación, además de modelar la vida útil de servicio de una obra civil (Andrade, 2004; Andrade, 2009).

## 1.2 Requisitos de durabilidad

La selección de las materias primas y el diseño de la mezcla de concreto con criterios de durabilidad deben hacerse siempre a partir de las características ambientales de exposición o de servicio de la estructura. Regularmente la Normativa

nacional e internacional propone recomendaciones generales que debe cumplir la mezcla de diseño de concreto para cumplir el desempeño propuesto en un ambiente de exposición determinado. En varias Normas se está considerando dentro del diseño por durabilidad del concreto y el desempeño de este, la resistividad eléctrica húmeda y al espesor de recubrimiento que el acero de refuerzo o presfuerzo deberá tener.

Estas mismas normas plantean limitaciones a la cantidad mínima de cemento Portland (en México su designación es CPO, Cemento Portland Ordinario) y la relación a/c máxima; de tal manera que se obtenga la resistividad eléctrica húmeda definida para el desempeño solicitado, en función del ambiente de exposición. Es posible hacer modificaciones a estas recomendaciones de cantidad de cemento CPO, tipo de cemento como utilizar otros tipos de cementos Portland; como el CPC, CPP, etc.), colocar adiciones minerales (ceniza volante, metacaolín, microsíllica, etc.) en remplazo del cemento y relación a/c, siempre y cuando cumplan los valores de resistividad eléctrica húmeda propuestos para cada ambiente de exposición.

### **1.2.1 Requisitos de dosificación y comportamiento del concreto**

Para conseguir una durabilidad adecuada del concreto, debemos cumplir los requisitos siguientes:

a) Requisitos generales:

- Relación a/mc máxima.
- Contenido mínimo de cemento tipo CPO (con un 95% de Clinker).

b) Requisitos adicionales:

- Contenido mínimo de aire incluido.
- Uso de cemento resistente a los sulfatos, en su caso (RS según designación de normativa mexicana de cementos).
- Resistencia a la erosión, en su caso.
- Resistencia a las reacciones álcali-agregado, en su caso.

### **1.2.2 Limitaciones a los contenidos de agua y de cemento**

En función de las clases de exposición a las que vaya a estar expuesto el concreto, se debe cumplir las especificaciones indicadas en las normas correspondientes. En el caso de que el tipo de ambiente incluya una o más clases específicas de

exposición; se fija, para cada parámetro, el criterio más exigente de entre los establecidos para las clases en cuestión.

## **1.3 Dosificación de mezcla**

Esta etapa se debe iniciar con evaluar las materias primas a utilizar para la fabricación de concretos durables; como es el caso del cemento, los agregados, el agua y los aditivos.

### **1.3.1 Material Cementante**

La dosificación del material cementante debe ser hecha siempre en masa. Hay que conocer el contenido de los óxidos del cemento por utilizar y la finura de este (también llamado Blaine, en  $m^2/kg$ ). Es de primordial importancia el conocer el contenido de Clinker del cemento, para así restringir el uso de adiciones minerales o fillers (reellenos) que pudieran mermar la actividad de cementar del propio material. Es recomendable el uso de cemento Portland tipo CPO, ya que su contenido de Clinker es mayor a 95%. Sabiendo este contenido, se puede entonces controlar en la mezcla de diseño las adiciones minerales al cemento por reemplazo, de tal manera que pueda saberse con exactitud el comportamiento por durabilidad del concreto endurecido.

Es también importante restringir al uso de cementos con una finura no menor de  $380 m^2/kg$ ; ya que la reactividad de los aditivos químicos reductores de agua de alto rango es mermada si se utilizan cementos o adiciones más gruesos. Es permitido el uso de otros tipos de cemento Portland (diferentes al Portland CPO), pero deben cumplir los requisitos de desempeño por con los que fueron diseñados, en lo que se refiere a la resistividad eléctrica húmeda.

### **1.3.2 Agregados**

La dosificación de la arena y la grava regularmente debe ser hecha en masa. El agregado tiene que cumplir requisitos mínimos en sus propiedades físicas, como una granulometría adecuada, una densidad específica no menor de  $2,400 kg/m^3$ , una absorción no mayor al 5% y un módulo de finura la arena no mayor de 3; esto para que los concretos finales no tengan alta porosidad o finos que puedan disminuir la potencialidad de los aditivos reductores de agua y, finalmente, no alcanzar el desempeño por durabilidad.

### **1.3.3 Agua**

La dosificación del agua de mezclado también regularmente debe ser hecha en masa, mediante peso directo de la cantidad requerida, o bien por medición del volumen equivalente ( $1 kg = 1 litro$ , aproximadamente). Hay que tener especial cuidado en obra que los contaminantes en el agua, como cloruros o materia

orgánica, también sean evaluados para evitar que el concreto final quede contaminado por estos o que, durante la fabricación, los aditivos químicos no reaccionen adecuadamente para estos concretos de baja relación a/c.

### **1.3.4 Aditivos**

Cuando está permitido el uso de aditivos, estos se dosifican en masa, si son sólidos; o bien pueden dosificarse en masa o por volumen, si son líquidos. En cualquier caso, la dosificación se es reportada con respecto a la unidad en masa del material cementante. Para su dosificación, tanto en masa como por volumen, debe contarse con dispositivos de medición con una precisión adecuada con respecto a las cantidades requeridas.

Una vez revisado que los materiales base para la fabricación de concretos durables cumplen con los requisitos antes descritos, se debe de exigir la fabricación de la mezcla de diseño del concreto para que cumpla los requisitos de desempeño; que regularmente es la resistividad eléctrica húmeda.

## **2 Metodología experimental**

---

El primer grupo de mezclas a evaluar estuvo compuesto de seis. Tres de estas denominadas M1, M2 y M3 fueron elaboradas el día 9 de julio del 2015, en el laboratorio de materiales de la planta de una empresa fabricante de aditivos; denominada Aditivo 3. Las otras tres mezclas -identificadas como M4, M5 y M6- fueron elaboradas por la empresa Aditivo 1, en diferentes fechas: 26 de junio, 17 y 22 de julio del 2015 respectivamente; de estas últimas se desconoce su composición ya que la empresa solo entregó los cilindros al LDVM del IMT.

El segundo y tercer grupo de mezclas se fabricaron en el laboratorio de pruebas de materiales de la supervisión de la obra en donde estaban siendo diseñadas las mezclas que cumplan el desempeño requerido en el proyecto ejecutivo. Las fechas de fabricación fueron definidas como fecha 1 y fecha 2. Para la evaluación de cada mezcla se utilizaron también cilindros de concreto de 10 x 20 cm; los que fueron entregados al LDVM del IMT, en diferentes fechas.

Se diseñaron los tres grupos de mezclas de concreto autoconsolidable, de tal manera que cumplieran con las siguientes especificaciones de proyecto:

- Resistencia a la compresión de 40 MPa a los 7 días.
- Resistividades de 70 K $\Omega$ -cm a 90 días.
- Extensibilidad de 65  $\pm$  5cm con caída máxima de 10 cm en 3 horas.
- Consumo mínimo de cemento 480 kg/cm<sup>2</sup>.
- Peso volumétrico del concreto en estado plástico > 2 280 kg/m<sup>3</sup>.
- Contenido de aire máximo 2.5.
- Considerar adición de Microsílica (MSA)

### **2.1 Pruebas realizadas en concreto fresco**

Las pruebas realizadas al concreto fresco fueron: peso volumétrico del concreto en estado plástico, extensibilidad y contenido de aire (ver figura 1).

Conviene aclarar en este punto que no se tenía experiencia en la fabricación de los cilindros de prueba de este tipo de concreto fluido -denominado autoconsolidable- ya que el procedimiento de todos conocido es para concretos con revenimiento; es

decir, semifluido. Es así como definió en este proyecto que se fabricaran los cilindros colocando el concreto hasta arriba del molde con una cantidad sobrante como “copete” del cilindro. Una vez lleno el cilindro, se le dieron 25 golpes ligeros al molde metálico utilizando un marro de goma; finalmente se enrazó el cilindro utilizando una llana metálica para nivelar esa superficie.



**Figura 2.1 Obtención de extensibilidad (izquierda) y contenido de aire (derecha)**

## **2.2 Pruebas realizadas en concreto endurecido**

Para la determinación de la durabilidad del concreto de cada mezcla, se llevaron a cabo diversas pruebas físicas y mecánicas en los cilindros de concreto de estas. Estas fueron: resistividad eléctrica húmeda (REH), velocidad de pulso ultrasónico (VPU), porcentaje total de vacíos (%TV), porosidad efectiva (PE), resistencia a la compresión y permeabilidad rápida de cloruros (PRC).

### **2.2.1 Resistividad Eléctrica Húmeda (REH)**

La resistividad eléctrica es una propiedad de los materiales que mide su capacidad para oponerse al flujo de una corriente eléctrica, y corresponde al recíproco de la conductividad; su unidad de medida es el  $k\Omega\text{-cm}$  u  $\Omega\text{-m}$ . En el caso del concreto, esta propiedad depende en gran proporción del grado de saturación de los poros y, en menor grado, de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Está en función de variables como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento y la porosidad de la estructura, entre otras.

Las mediciones de REH se realizaron con el equipo de medición de resistencia eléctrica marca Nilsson, modelo 400 (Figura 3.2). El equipo mide la resistencia eléctrica que el material a evaluar presenta cuando se le aplica un campo eléctrico entre dos platos metálicos, uno colocado en cada uno de los extremos del espécimen. Con la resistencia eléctrica obtenida se utiliza la fórmula siguiente para obtener la REH:



$$\rho = R * (A/L) \quad (1)$$

Déonde:

R = Resistencia eléctrica medida (k $\Omega$ )

A= Área transversal del espécimen (cm<sup>2</sup>)

L= Longitud del espécimen (cm)

Las mediciones de resistividad en los cilindros de concreto fueron realizadas por el método descrito en la norma NMX-C-514-ONNCCE-2016. El criterio de evaluación utilizado fue el descrito en esta, el cual se muestra en la tabla 2.1.



**Figura 2.2 Medición de la REH en cilindros de concreto**

**Tabla 2.1 Criterios de evaluación de resistividad eléctrica húmeda (REH) en especímenes de concreto (NMX-C-514-ONNCCE-2016)**

Resistividad	Durabilidad del concreto
$\rho > 200 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	Muy Alta
$100 > \rho > 50 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	Alta
$50 > \rho > 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	Moderada
$\rho < 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	Baja

## 2.2.2 Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU)

La velocidad de pulso ultrasónico se define como la relación que existe entre la distancia de viaje a través del concreto de una onda ultrasónica y el tiempo que tarda en recorrerla. Un impulso eléctrico generado por una unidad central se transmite a un emisor que excita un bloque de cristales; el emisor a través del bloque emite un pulso ultrasónico que viaja a través del concreto hasta que es detectado por el receptor; el tiempo entre la descarga inicial y la recepción del pulso se mide electrónicamente. Es así como la longitud de la trayectoria entre los transmisores, dividida entre el tiempo de viaje, da la velocidad promedio de la propagación de la onda. La fórmula empleada para calcular la velocidad de propagación de ondas es la siguiente:

$$V = L/T \quad (2)$$

Donde:

V= Velocidad de propagación en (km/s)

L= Distancia entre los puntos de acoplamiento (km/s)

T = Tiempo recorrido después de la emisión de la onda hasta su recepción (s).

Este es un ensayo no destructivo que tiene como objetivos principales:

- Verificar la homogeneidad; es decir, la uniformidad y calidad relativa del concreto.
- Detectar las fallas internas; es decir, la presencia de vacíos, introducidas durante la fabricación, la profundidad de las fisuras y otras imperfecciones.

En la prueba de VPU realizada a los cilindros de concreto se utilizó el equipo marca CONTROLS, modelo E48 (Figura 2.3) a las edades de 12 y 522 días.



**Figura 2.3 Prueba de VPU**

Esta prueba se realizó en base a la norma NMX-C-275-ONNCCE-2004. El criterio de evaluación utilizado fue el descrito en el Manual Durar (1998), el cual se muestra en la tabla 2.2.

**TABLA 2.2 Criterios de evaluación de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) (Durar, 1998)**

Velocidad de propagación	Calidad del concreto
< 2000 m/s	Deficiente
2001 a 3000 m/s	Normal
3001 a 4000 m/s	Alta
> 4000 m/s	Durable

### 2.2.3 Porcentaje total de vacíos (%TV)

El porcentaje de vacíos en el concreto está relacionado con la porosidad; es decir, los espacios vacíos que quedan en la masa del concreto a consecuencia de la evaporación del agua excedente al mezclarse, y al aire atrapado durante su fabricación. Esta prueba consiste en secar en horno a una temperatura de 50 °C la muestra de concreto, hasta llegar a peso constante ( $W_{seco}$ ); posteriormente se sumerge en agua hasta llegar a peso constante, se registra su peso fuera (saturado,  $W_{sat}$ ) y dentro de agua (saturado sumergido en agua;  $W_{satsum}$ ). Este último peso es determinado con ayuda de una balanza hidrostática. Calculamos el valor de %TV dividiendo la diferencia entre el peso saturado final menos el peso seco final, entre la diferencia entre los pesos saturados final menos el saturado sumergido, como muestra la fórmula siguiente:

$$\% \text{ Total de Vacíos} = \frac{W_{sat} - W_{seco}}{W_{sat} - W_{satsum}} \times 100$$

El criterio de evaluación en cuanto al porcentaje de porosidad (aquí llamado % total de vacíos, %TV) es el descrito en el manual DURAR (1998), el cual se muestra en la Tabla 2.3.

Cabe aclarar que este criterio de evaluación de la durabilidad de concreto en función a su porosidad está relacionado directamente con la porosidad capilar y no con el porcentaje total de vacíos (%TV). En mediciones realizadas en el IMT en los últimos proyectos de supervisión realizados en varios puertos federales, se ha encontrado que la porosidad efectiva es más o menos la mitad del %TV. Es por ello que se

considerará este criterio con cierta holgura tomando en cuenta que se tiene un factor de seguridad del doble para el caso de la determinación de %TV.

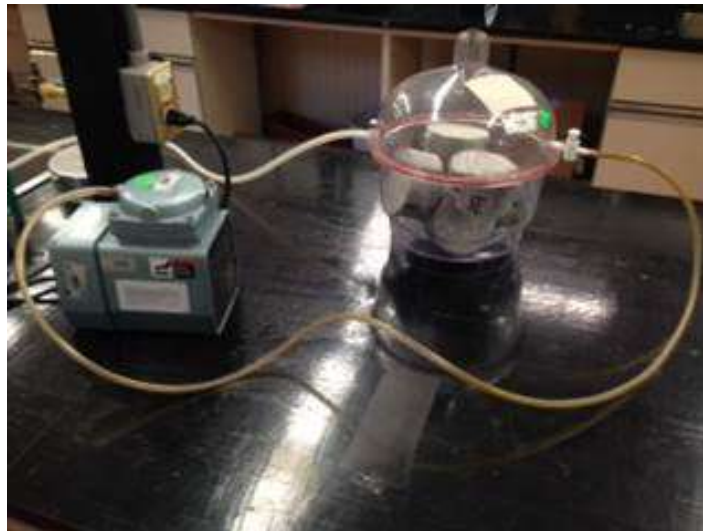
**TABLA 2.3 Criterios de evaluación en base a la porosidad (Durar, 1998)**

% de Porosidad	Calidad del concreto
< 10%	Buena calidad y compacidad
10% - 15%	Moderada calidad
>15%	Calidad inadecuada

## 2.2.4 Prueba de Permeabilidad Rápida de Cloruros (PRC)

Esta prueba determina la conductancia eléctrica del concreto, para proporcionar una indicación rápida de su resistencia a la penetración de iones de cloruro.

Este método de prueba consiste en monitorear durante un periodo de 6 h la cantidad de corriente eléctrica que pasa a través de una rodaja de concreto de 50 + 3 mm de espesor y 100 mm de diámetro. Una vez cortada la rodaja con una cortadora de disco, se coloca en un desecador y con una bomba se somete a un proceso de vacío a una presión menor de 50 mm Hg durante 3 horas (figura 2.4); pasado este tiempo, se interrumpe el vacío y se le vierte agua hervida previamente ya enfriada a temperatura ambiente y se reanuda el vacío por una hora más. Pasado este tiempo se suspende el vacío y se deja la rodaja saturada durante un periodo de 18 ± 2 horas. Posteriormente se retira del agua, se seca con un trapo y se le coloca papel film en toda la superficie lateral curva de la rodaja, teniendo cuidado de no cubrir las dos bases circulares de ésta.



**Figura 2.4 Proceso de vacío en rodajas**

Lo siguiente es colocar la rodaja en la celda de prueba, la cual tiene dos compartimientos; en uno va una solución de Cloruro de Sodio (NaCl) al 3% y en el otro una solución de Hidróxido de Sodio (NaOH) al 0.3 Normal (figura 2.5).



**Figura 2.5 Montaje de rodaja en celda de prueba y vaciado de soluciones**

En el exterior de cada compartimiento de la celda, se tiene un borne de conexión por donde se aplica una diferencia de potencial de 60 V dc. La terminal negativa se conecta en la reserva con NaCl y la terminal positiva se conecta a la reserva con NaOH (Figura 2.6). Los iones cloruros cargados negativamente migraran hacia la terminal positiva



**Figura 2.6 Conexión de celda a unidad de control**

Entre más permeable sea el concreto, más iones cloruro viajaran a través del espécimen, y una mayor corriente será medida. Está probado que la carga total en Coulombs se encuentra relacionada con la resistencia del concreto, a la penetración del ion cloruro.

Los valores de la cantidad de Coulombs se utilizan para caracterizar el concreto como se muestra en la tabla 2.4 (ASTM C 1202-12):

**TABLA 2.4 Permeabilidad del Ion cloruro basada en el paso de carga. (ASTM C-1202-12)**

Carga que pasa	Penetrabilidad del Ion Cloruro
>4000	Alta
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baja
100-1000	Muy Baja
<100	Despreciable

El equipo de permeabilidad usado fue el modelo PROOVE´it, marca Germann Instruments A/S.

## 2.3 Mezclas de diseño fabricadas en Planta (Aditivo 3)

Para estas mezclas, como primera variable, se seleccionaron tres bancos de agregados y se realizaron pruebas a sus materiales para seleccionar el que cumpliera con las características idóneas para fabricar un concreto durable. Se consideraron tres bancos para los agregados: Agregados 1, Agregados 2 y Agregados 3. Los resultados de las pruebas físicas de cada banco se muestran en el apartado de resultados.

De los tres bancos analizados, el que cumplía con las características de densidad  $>2,400 \text{ kg/m}^3$  (en grava), una granulometría aceptable en arena y grava y un módulo de finura menor a 3, fue el banco Agregados 1 por lo que de este se tomaron los agregados para las mezclas 1 y 2; y del banco Agregados 2 para la mezcla 3, y corroborar si los agregados pudieran afectar los índices de durabilidad del concreto endurecido. Agregado 3 no se utilizó en estas pruebas piloto en planta.

Para determinar si la especificación de uso exclusivo de cemento tipo CPO es aún aceptada, o si se puede utilizar otro tipo de cemento, se utilizaron dos tipos de cemento: Cemento 1; CPO 30R RS en las mezclas 1 y 3, y Cemento 2 CPC 40 RS en la mezcla 2. La tabla 2.5 muestra la composición de las tres mezclas.

**Tabla 2.5 Composición de las mezclas 1, 2 y 3**

Composición de la Mezcla	Mezcla No.1/ Agreg. 1 Cemento 1 CPO 30R RS	Mezcla No.2/ Agreg. 2 Cemento 1 CPO 30R RS	Mezcla No.3/ Agreg. 1 Cemento 2 CPC 40 RS
Cemento	480.00	480.00	480.00
Arena Caliza kg/ m <sup>3</sup>	665.00	665.00	665.00
Grava Caliza kg/ m <sup>3</sup>	958.00	970.00	958.00
Agua lt/ m <sup>3</sup>	166.00	166.00	166.00
Aditivo "A"	12.00 cc	17.00 cc	15.00 cc
Aditivo "B"	2.00 cc	2.00 cc	2.00 cc
MSA (Microsílica)	8%	8%	8%

Las pruebas realizadas al concreto fresco fueron hechas en las plantas de las empresas Aditivo 1 y Aditivo 3. Los resultados de estas pruebas para Aditivo 3 están en el apartado de resultados. La empresa Aditivo 1 no reportó resultados de concreto fresco para sus mezclas (M4, M5 y M6).

En este grupo de mezclas las pruebas realizadas al concreto endurecido fueron: RC (a 7 días), VPU, REH, %TV y PRC. De la RC solo se ensayaron cilindros de la empresa Aditivo 3. Las mediciones de VPU de estos cilindros fueron hechas a la edad de 12 y 522 días. En las mezclas de Aditivo 1 las mediciones fueron entre los 538 y 565 días.

Las mediciones de REH en los cilindros de Aditivo 3, se hicieron desde el primer día que los cilindros de las tres mezclas ingresaron al IMT. Estos se colocaron en recipientes con tapa y se mantuvieron húmedos durante todo el tiempo que duró su monitoreo, el cual estuvo comprendido por dos etapas; una de los 7 a los 120 días de edad y otra de los 411 a los 551 días. En el lapso intermedio, del día 121 al 410, no se realizó monitoreo alguno.

En los cilindros de la empresa Aditivo 1, que comprenden las mezclas M4, M5 y M6, también se tuvieron dos etapas de monitoreo de REH. La M4 se monitoreó de los 28 a 113 días y 404 a 545 días; la M5 de los 23 a 106 días y de 397 a 538 días; y la M6 de los 62 a 133 días y 424 a 565 días. Como se mencionó anteriormente, la diferencias entre los periodos de monitoreo se debe a las diferentes edades de cada mezcla.

Las pruebas de PRC en Aditivo 3 se realizaron a los 524 días, utilizando dos cilindros de cada mezcla. En Aditivo 1 la prueba de PRC se efectuó a los 551, 544 y 571 para las mezclas M4, M5 y M6, respectivamente. Cada cilindro se cortó en cuatro rodajas, las dos de en medio se usaron para PRC y los extremos para % TV.

## 2.4 Mezclas de diseño fabricadas en Obra, fecha 1

En la obra (zona tropical marina) participaron tres empresas, fabricantes de aditivos, en la elaboración de mezclas: Aditivo 1, Aditivo 2 y Aditivo 3 (se incluyó la empresa Aditivo 2, en esta segunda etapa de pruebas de mezclas). La empresa Aditivo 1 (misma de la primera etapa de pruebas) quiso utilizar metacaolín en lugar de la microsíllica, pero no pudo homogenizar su mezcla; por lo que no se tomaron muestras (cilindros de 10 x 20 cm) para su caracterización. El agregado usado fue el mismo en las tres marcas: Agregado 1.

Con la experiencia obtenida durante la mezcla de diseño fabricada en el laboratorio de materiales de la empresa Aditivo 3, se definió que los agregados empleados fueran del banco Agregados 1. La empresa Aditivo 3 utilizó Cemento1 CPO 30R RS, y la empresa Aditivo 2 utilizó la misma marca de cemento (Cemento1) pero del tipo CPC 40 RS. En la tabla 2.6 se muestra la composición de las dos mezclas y en la figura 2.7, la elaboración de estas. Se tuvo especial cuidado de que ambos cementos tuvieran un Blaine en el rango de los que se utilizaron en el primer colado de prueba realizado en la planta de la empresa Aditivo 3:  $\sim 4\ 000\ \text{cm}^2/\text{g}$ .

**Tabla 2.6 Composición de las mezclas de Aditivo 3 y Aditivo 2**

Composición de la mezcla	Mezcla Aditivo 3 - Cemento 1 CPC 40 RS	Mezcla Aditivo 2 - Cemento 1 CPC 40 RS
Cemento $\text{kg}/\text{m}^3$	480.00	518.40
Arena Caliza $\text{kg}/\text{m}^3$	635.00	698.61
Grava Caliza $\text{kg}/\text{m}^3$	945.00	853.86
Agua $\text{lt}/\text{m}^3$	165.00	165.00
Aditivo "A" $\text{kg}/\text{m}^3$	6.24	-
Aditivo "C" $\text{kg}/\text{m}^3$	0.96	-
Aditivo "D"	-	8.09
MSA (8%) $\text{kg}/\text{m}^3$	38.40	-
Aire (%)	1%	2%

Las pruebas en concreto fresco fueron las mismas que las hechas en planta de Aditivo 3. En la figura 2.8 se observa la medición de extensibilidad realizada por ambas empresas. No se tienen resultados de estas pruebas, pero las dos empresas estuvieron en el rango especificado (extensibilidad de  $65 \pm 5\text{cm}$ ).

Las pruebas realizadas al concreto endurecido fueron: REH, %TV y PRC. De la mezcla de Aditivo 2, se evaluaron cuatro muestras: entre los 52 y 306 días. De el Aditivo 3 solo dos: de los 33 a 289 días.

Las mediciones de REH en los cilindros se hicieron en diferentes edades; en Aditivo 2 de los 52 a los 306 días y en Aditivo 3 del día 33 al 289.



Las pruebas de PRC en Aditivo 2 y Aditivo 3 se hicieron a los 318 días. Posteriormente se hizo el %TV con las rodajas restantes.



**Figura 2.7 Elaboración de mezclas**

## **2.5 Mezclas de diseño fabricadas en obra, Fecha 2**

Con el fin de corroborar y mejorar lo antes fabricado en la fecha 1, se invitó de nueva cuenta a las tres empresas para que fabricaran otra mezcla de diseño. Participaron las mismas que en la elaboración de mezclas, con la denominación asignada en la fecha anterior: Aditivo 1, Aditivo 2 y Aditivo 3.

La empresa Aditivo 3 elaboró dos mezclas de diseño, una con el diseño original (contenido de cemento de  $480 \text{ kg/m}^3$  y 8% de microsíllica) y otra variando la cantidad de cemento ( $550 \text{ kg/m}^3$ ) y disminuyendo la cantidad de microsíllica a 5%. De cada mezcla de Aditivo 1, se tomaron dos muestras; de Aditivo 2, cuatro y de Aditivo 3, dos muestras de cada mezcla. No se entregaron las proporciones de las mezclas fabricadas en esta fecha 2, por lo que no se presenta una tabla detalladamente. El agregado usado fue el mismo en las tres marcas: Agregado 1.

Otra modificación realizada en este tercer colado de mezclas fue que el cemento usado en los tres fue CPC, de dos marcas. El CPC 1, usado por la empresa Aditivo 3, tuvo las características de tener un Blaine de  $4,400 \text{ cm}^2/\text{g}$ ; en comparación con el cemento usado por las empresas Aditivo 1 y Aditivo 2 que utilizó una marca diferente con un Blaine de  $3,800 \text{ cm}^2/\text{g}$ , con la idea que fue la marca utilizada en una etapa constructiva previa de la obra en estudio, pero en fechas previas a las pruebas de laboratorio que ahora se presentan.



**Figura 2.8 Medición de extensibilidad de mezclas**

Para este ejercicio, en el concreto fresco solo se evaluó la extensibilidad del concreto (no alcanzó el tiempo para obtener los vacíos). No se tienen resultados de estas pruebas, pero estuvieron en el rango especificado (extensibilidad de  $65 \pm 5$  cm). Las pruebas realizadas al concreto endurecido fueron REH, PRC y %TV.

Las mediciones de REH en los cilindros de todas las mezclas se hicieron en diferentes edades. Para los cilindros de Aditivo 1 sólo se realizaron 12 mediciones: una inicial a la edad de 59 días. Después de esta lectura se suspendió el monitoreo debido a que el concreto estaba muy heterogéneo, mostrándose capas de concreto de diferentes colores, producto de una mala dosificación del metacaolín. Posteriormente se volvieron a monitorear a los 438 días, seguida de diez mediciones más, llegando hasta los 531 días. De la empresa Aditivo 2 los cilindros se monitorearon de los 38 a los 292 días y los cilindros de las dos mezclas de Aditivo 3 de los 20 a los 276 días.

Las pruebas de PRC en Aditivo 1, 2 y 3 fueron realizadas a los 553, 318 y 304 días respectivamente. Posteriormente se hizo el %TV con las rodajas restantes de cada cilindro, en fechas similares a las pruebas de PRC.

## 3 Resultados

### 3.1 Mezclas fabricadas en planta, primera etapa

Cada empresa, Aditivo 1 y Aditivo 3, fabricó sus cilindros en sus respectivos laboratorios de prueba; el IMT únicamente tuvo acceso a la fabricación de las mezclas de Aditivo 3.

#### 3.1.1 Bancos de agregados

No se cuenta con resultados de pruebas físicas de los bancos que utilizó la empresa Aditivo 1, sólo los de Aditivo 3; éstos se resumen a continuación, en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Propiedades físicas de los agregados de Aditivo 3**

PROPIEDADES FÍSICAS	GRAVA			ARENA		
	Agreg 1 1/2"	Agreg 2 3/4"	Agreg 3 3/4"	Agreg 1 3/16"	Agreg 2 3/16"	Agreg 3 3/16"
DENSIDAD Kg/m <sup>3</sup>	2,449	2,222	2,308	2,427	2,404	2,463
ABSORCIÓN %	5.26%	7.07%	7.07%	4.17%	4.17%	2.04%
HUMEDAD %	3.00%	6.30%	4.10%	3.85%	4.50%	6.03%
MÓDULO DE FINURA (Adim.)	-	-	-	2.98	2.77	3.45

#### 3.1.2 Pruebas en concreto fresco

No se cuenta con resultados de la empresa Aditivo 1, sólo de Aditivo 3, estos se muestran en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Pruebas en concreto fresco de Aditivo 3**

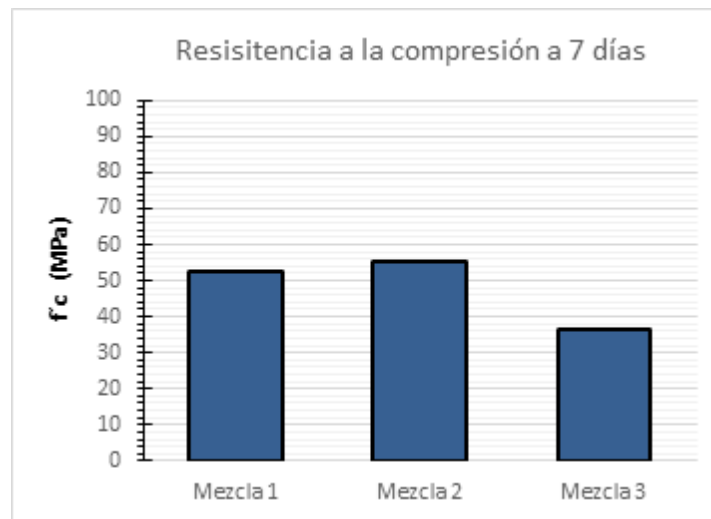
Pruebas en concreto fresco	Mezcla No.1 /Agreg.1 Cemento 1 CPO 30 RRS	Mezcla No.2 / Agreg.2 Cemento 1 CPO 30 RRS	Mezcla No.3 /Agreg.1 Cemento 2 CPC 40 RS
Peso volumétrico del concreto en estado plástico $\geq 2280$ kg/m <sup>3</sup> .	2,294.53	2,201.70	2,250.26
Extensibilidad: 65 $\pm$ 5cm	73	69	67.5
Contenido máximo de aire: 2.5%	1.7	3.9	2.4

### 3.1.3 Pruebas en concreto endurecido

Se muestran enseguida los resultados que se obtuvieron de los cilindros de concreto de cada mezcla de la empresa Aditivo 3; mediante las pruebas de RC (a 7 días), VPU, REH, %TV y PRC.

#### 3.1.3.1 Resistencia a la compresión a 7 días

Los resultados promedio (de dos cilindros) de resistencia a la compresión a 7 días fueron de 52, 55 y 36 MPa para las mezclas 1, 2 y 3 respectivamente de Aditivo 3 (ver figura 3.1).



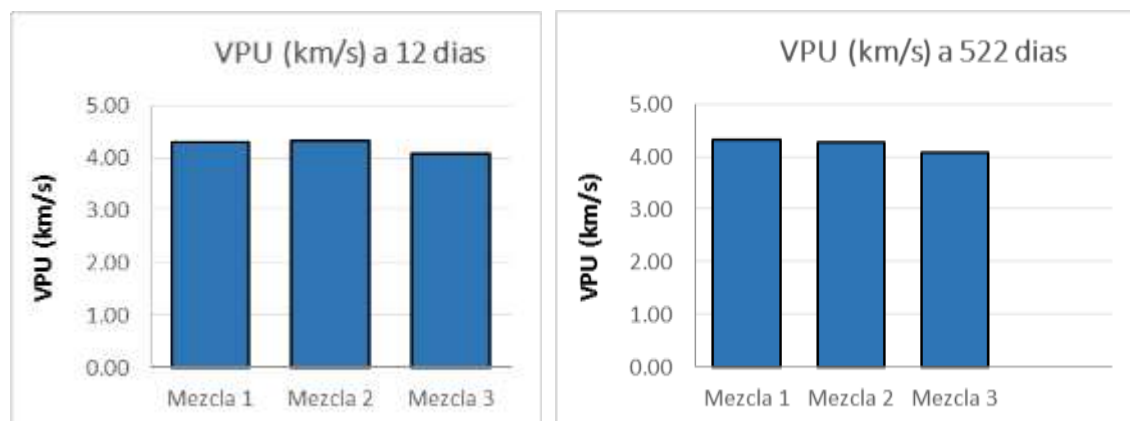
**Figura 3.1 Resultados de las pruebas de RC a 7 días en cada mezcla de Aditivo 3**

Como puede observarse, dos mezclas fabricadas por la empresa Aditivo 3 cumplieron con la RC de 40 MPa a 7 días, de acuerdo con la especificación del proyecto ejecutivo de la obra. Solo la M3 no cumplió con este requisito, que corresponde a la mezcla fabricada con el Agregado 2 que se estimó tener un agregado grueso con densidad baja ( $< 2,400 \text{ kg/m}^3$ ) y una absorción muy alta ( $>7\%$ ); lo que lo hace un agregado más poroso que el Agregado 1, que si mostró valores de RC a 7 días adecuados.

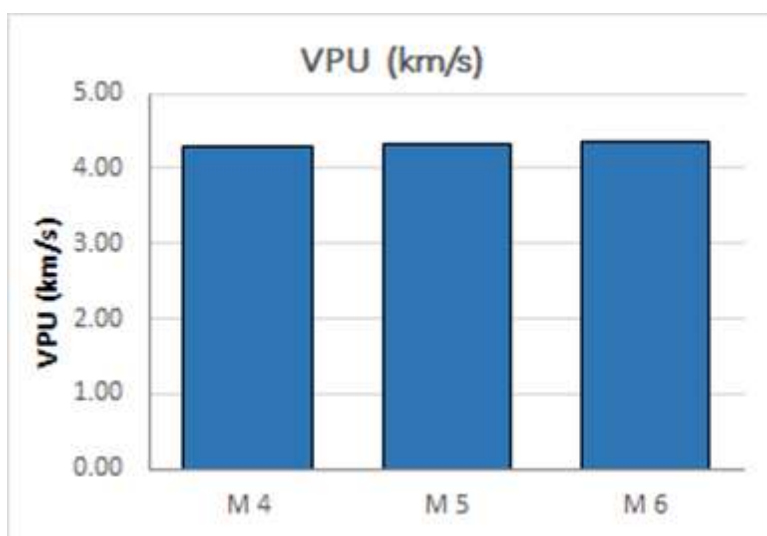
#### 3.1.3.2 VPU

La medición de VPU realizada a los cilindros de las tres mezclas de Aditivo 3 fue realizada a dos edades: 12 y 522 días (ver Figura 3.2). Se observan valores similares en ambos periodos de evaluación: 4.30, 4.32 y 4.07 km/s a 12 días y 4.35, 4.29 y 4.09 km/s a 522 días, respectivamente.

La medición de VPU realizada a los cilindros de las tres mezclas de Aditivo 1 (M1, M3 y M4) se hizo a las siguientes edades: 545, 538 y 565 días respectivamente (ver figura 3.3). Como puede observarse, los valores de VPU fueron muy similares para las mezclas de ambas marcas de aditivos. Esto hace pensar que la prueba de VPU podría no percibir los posibles cambios entre mezclas, por lo que se decidió no seguir usando esta prueba en las mezclas subsecuentes.



**Figura 3.2 Resultados de la prueba de VPU para mezclas de Aditivo 3**



**Figura 3.3 Resultados de la prueba de VPU para mezclas de Aditivo 1**

### 3.1.3.3 REH

Los resultados de las pruebas de REH a los 90 días realizada a los cilindros de concreto de las muestras de Aditivo 3 fueron: 25, 42 y 28 k $\Omega$ -cm para M1, M2 y M3, respectivamente (ver figuras 3.4, 3.5 y 3.6). Los resultados promedio a 90 días de las mezclas M4, M5 y M6 de la empresa Aditivo 1 fueron: 20, 22 y 74 k $\Omega$ -cm respectivamente (ver figura 3.7).



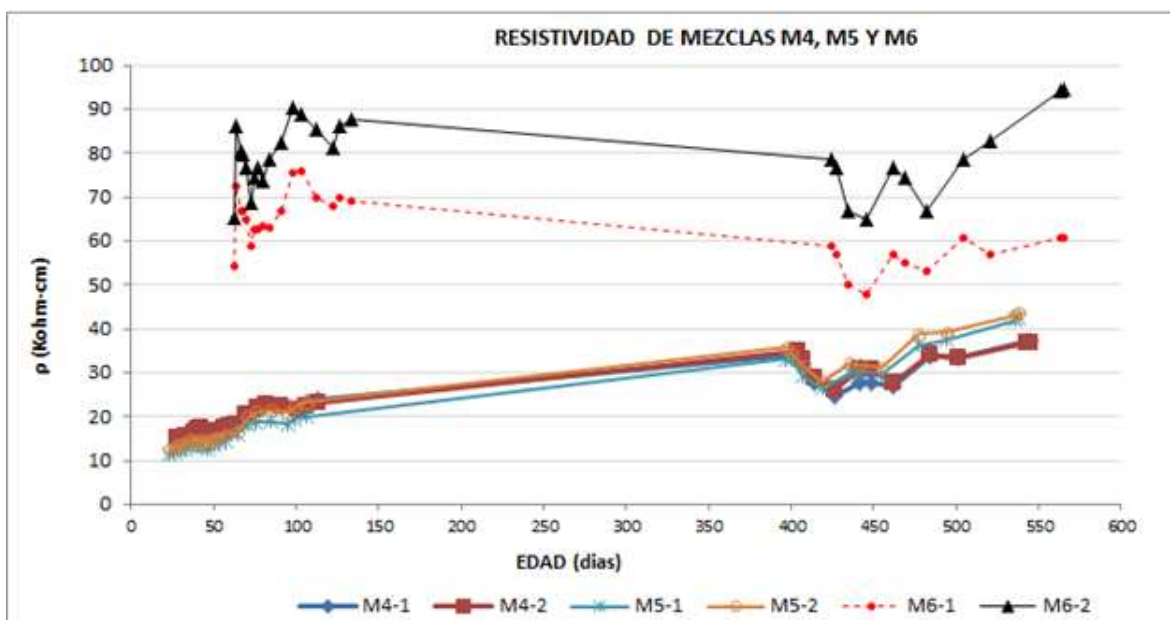
Figura 3.4 Resultados de las pruebas de REH para M1 de Aditivo 3



Figura 3.5 Resultados de las pruebas de REH para M2 de Aditivo 3



**Figura 3.6 Resultados de las pruebas de REH para M3 de Aditivo 3**



**Figura 3.7 Resultados de las pruebas de REH para M4, M5 y M6 de Aditivo 1**

Es claro observar que los valores de REH durante los primeros 90 días (fecha que define la especificación que el concreto endurecido debe llegar a 70 kΩ·cm) no llegaron al valor especificado, por lo que se planteó la realización de nuevas mezclas de prueba modificando los contenidos de aditivos para disminuir la cantidad de agua en la mezcla y, por ende, aumentar la resistividad eléctrica del concreto.

Únicamente la mezcla M6 de la empresa Aditivo 1 logró valores de REH por arriba de los especificados en el proyecto ejecutivo; por lo que se solicitó a esta empresa el que proporcionara las características de las mezclas usadas en la fabricación de

sus cilindros, para poder repetir la prueba con estas. Pero la empresa argumentó que no pudieron ubicar estos datos, lo que apoyó la idea de repetir las pruebas de ambas empresas (Aditivo 1 y Aditivo 3) en un lugar común (la obra) en vez de que las hicieran en sus respectivos laboratorios de pruebas.

Es así como nació la idea de repetir la fabricación de las mezclas de diseño de concreto con estas dos empresas, en un laboratorio común. Sabiendo esta oportunidad, la empresa Aditivo 2 solicitó que fuera incluida en las pruebas de fabricación, por lo que las tres empresas realizaron estas actividades en las mismas fechas.

Cabe aclarar que existe un lapso en que los cilindros dejaron de ser monitoreados (entre 120 y 400 días), por eso es que las figuras 3.4 a 3.7 muestran una línea continua en este tiempo. Esa es la fecha de 400 días en que se retoma la medición de estos cilindros, para conocer si hubo una modificación a los valores de REH, después de más de un año de la fabricación de estas mezclas.

También es claro observar que en la segunda etapa de monitoreo de la REH en estos cilindros hubo una variación de consideración en los valores obtenidos, lo que puso de manifiesto por primera vez que las mediciones de REH podrían estar afectadas por la temperatura del laboratorio en donde se realizaron estas mediciones. Esto fue observado en un momento en que hubo un cambio en la temperatura del laboratorio de caluroso (~400 a ~480 días) a templado (>500 días). Esto dio pie a que se tuviera más cuidado en realizar las mediciones cuando las temperaturas fueran similares.

### **3.1.3.4 Porcentaje total de vacíos (%TV)**

La figura 3.8 muestra los resultados obtenidos de %TV de las tres mezclas de Aditivo 3: 11.0, 12.4 y 11.2 % para las mezclas M1, M2 y M3, respectivamente. La figura 3.9 muestra los resultados obtenidos de porcentaje total de vacíos de las tres mezclas de Aditivo 1: 9.32, 8.88 y 8.72 %, para las mezclas M4, M5 y M6, respectivamente. Es claro observar que los valores de %TV para las mezclas fabricadas con Aditivo 3 fueron mayores que los obtenidos por la empresa Aditivo 1, que corrobora lo obtenido en las mediciones de REH: a mayor REH, menor %TV. Aun así, los concretos de ambos aditivos mostraron valores de %TV menores a los máximos permitidos para concretos durables (%TV < 15%).



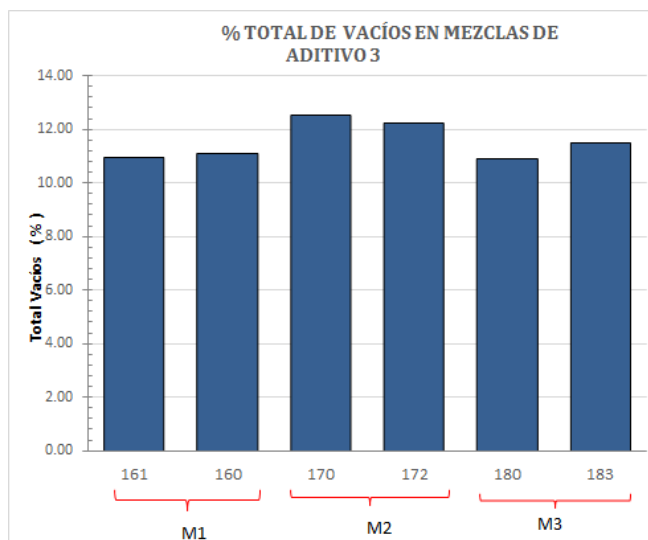


Figura 3.8 %TV para mezclas de Aditivo 3

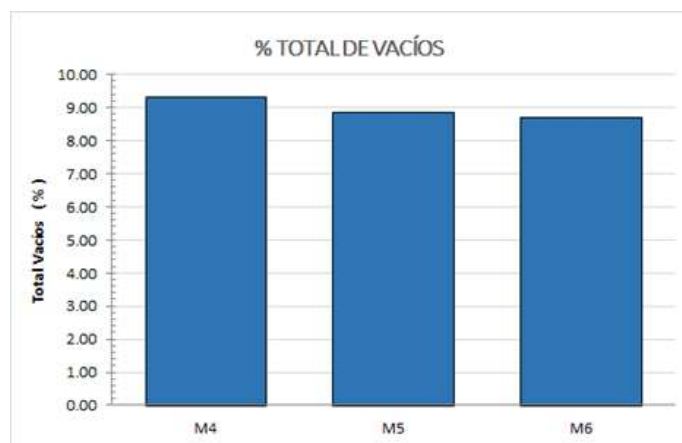


Figura 3.9 %TV para mezclas de Aditivo 1

### 3.1.3.5 PRC

Los valores de PRC en las tres mezclas de Aditivo 3 fueron: 823, 555 y 698 Coulombs, para M1, M2 y M3, respectivamente (ver tabla 3.3).

Tabla 3.3 Resultados de PRC en mezclas de Aditivo 3

Mezcla	Edad de ensayo (días)	Coulombs	Nivel de permeabilidad
1	542	823	Muy bajo
2	542	555	Muy bajo
3	542	698	Muy bajo

Los resultados de las mezclas M4, M5 y M6 (Aditivo 1) fueron: 689, 527, 343 y 206 Coulombs, respectivamente. Es importante mencionar que debido a las diferencias en resistividad de los dos cilindros de la mezcla 4, no promediaron los valores de permeabilidad en dicha mezcla. Los resultados se muestran en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Resultados de PRC en mezclas de Aditivo 1**

<b>Mezcla</b>	<b>Edad de ensayo (días)</b>	<b>Coulombs</b>	<b>Nivel de permeabilidad</b>
4	551	689	<b>Muy bajo</b>
5	544	527	<b>Muy bajo</b>
6-1	571	343	<b>Muy bajo</b>
6-2	572	206	<b>Muy bajo</b>

Puede observarse de los resultados obtenidos de PRC de ambas mezclas (tablas 3.3 y 3.4), que de nuevo los valores índices de durabilidad fueron mejores los de la mezcla con Aditivo 1 que los fabricados con Aditivo 3. Cabe aclarar que estos valores de PRC fueron obtenidos a edades > 500 días, muy por arriba de los 90 días que la especificación definía.

## **3.2 Mezclas fabricadas en obra, segunda etapa (Fecha 1)**

Se presentan los resultados de las empresas Aditivo 2 y Aditivo 3. La empresa Aditivo 1, que quiso utilizar metacaolín en lugar de microsíllica, no logró homogeneizar la mezcla; por lo que se desechó el material.

### **3.2.1 Agregados seleccionados**

Los agregados seleccionados fueron los del banco “Agregados 1”, el cual fue el de mejor desempeño que los otros dos restantes, de acuerdo a los resultados obtenidos de los concretos de la primera etapa fabricados en la primera etapa (planta de Aditivos 3).

### **3.2.2 Pruebas en concreto fresco**

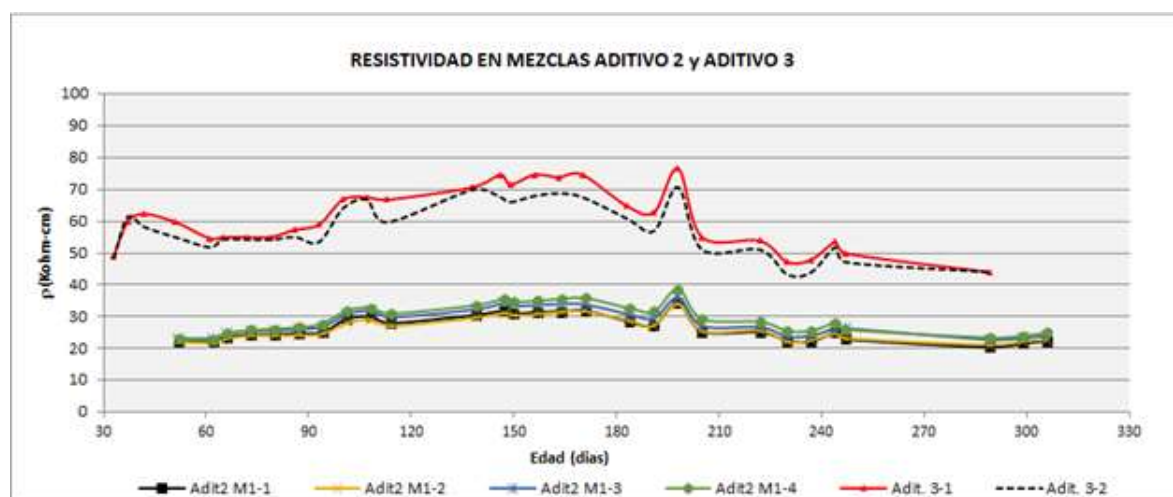
No se tienen resultados de estas pruebas para ambas empresas, pero estuvieron las dos en el rango especificado (extensibilidad de  $65 \pm 5\text{cm}$ ).

### 3.2.3 Pruebas en concreto endurecido

Se muestran los resultados que se obtuvieron de REH, %TV y PRC, en los cilindros de concreto de ambas mezclas.

#### 3.2.3.1 REH

Los resultados de las pruebas de REH del concreto de cada mezcla en el tiempo, están en la figura 3.10. Hay que recordar que la mezcla de la empresa Aditivo 1 tuvo problemas de segregación y falta de compacidad, por lo que no se pudieron fabricar cilindros de prueba con este concreto, desechándose el concreto fabricado por ellos. Se observa que la mezcla de Aditivo 3 presentó valores superiores que la de Aditivo 2, cuyos valores promedio a 90 días fueron de 60 y 26 k $\Omega$ -cm, respectivamente.



**Figura 3.10 Comparación de la REH en mezclas de Aditivo 2 y Aditivo 3.**

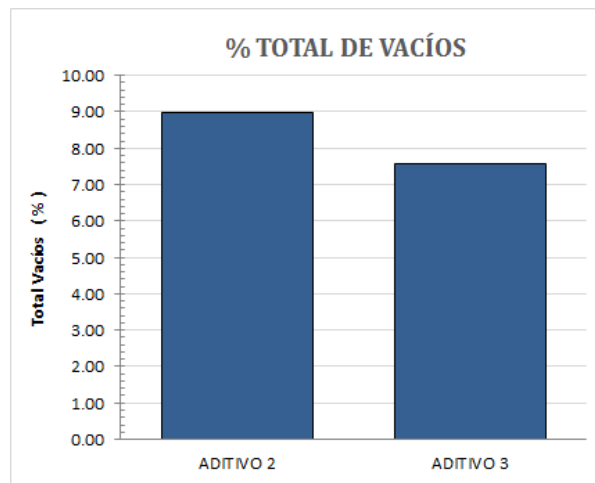
Es aquí donde se observó que el tipo de cemento y de aditivo puede modificar la durabilidad del concreto, si los demás componentes se mantienen constantes (agregado). Como puede observarse en la tabla 7, el cemento usado por la empresa Aditivo 3 fue CPO con un Blaine alto (>4,000 cm<sup>2</sup>/g); en cambio, la empresa Aditivo 2 utilizó un CPC con un Blaine menor. Aunque Aditivo 3 usó menos cemento 480 kg/m<sup>3</sup> que Aditivo 2 (518 kg/m<sup>3</sup>), utilizó además 8% de microsíllica, lo que demuestra que la microsíllica reacciona mejor para disminuir la porosidad del concreto que simplemente aumentando la cantidad del cemento.

Después de alcanzar la fecha de 90 días que pedía la especificación, y conocer el valor de REH de cada mezcla de las dos marcas de aditivos, se continuó con el monitoreo de la REH en el tiempo para ver su comportamiento a mayores edades. Los valores de REH de nueva cuenta fueron variando con el tiempo, principalmente por el cambio de la temperatura del laboratorio por las variaciones propias de las estaciones en el clima del lugar en donde se encuentra este (Querétaro).

Se pudo observar de nuevo que, cuando la temperatura aumentaba en el interior del laboratorio (verano/primavera al inicio, hasta 90 días, y al final de las pruebas, después de los 210 días), la REH era baja; contrapuesto a cuando la temperatura disminuía (invierno, entre 100 y 180 días), la REH aumentaba.

### 3.2.3.2 Porcentaje total de vacíos (%TV)

La figura 3.11 muestra los resultados promedio obtenidos de %TV de ambas mezclas, en donde se observa que Aditivo 2 presentó un porcentaje de vacíos de 9 % y Aditivo 3 de 7.6%.



**Figura 3.11 Porcentaje Total de vacíos en ambas mezclas**

De los resultados obtenidos de %TV, se observa que se alcanzó una mejoría en este índice de durabilidad con respecto a las mezclas fabricadas en la primera etapa: se redujo el %TV de 9% - 13% en la primera etapa, a 8% - 9% en esta segunda etapa. Esto demuestra que, a pesar de que los agregados usados en este estudio (provenientes de roca caliza muy porosa y densidad baja) no son adecuados para fabricar concretos durables, una buena selección de aditivos y relación agua/cemento (a/c) muy baja (<0.35) puede generar concretos con %TV menores del 10%.

### 3.2.3.3 PRC

Se realizó la prueba de PRC a la edad 318 días para los concretos de esta segunda etapa, fecha 1. Los resultados se muestran en la tabla 3.5. Se observa que la mezcla de Aditivo 2 presentó un nivel de PRC mayor a la de Aditivo 3, con valores de 1097 y 496 Coulombs respectivamente.

**Tabla 3.5 Resultados de las pruebas de PRC en mezclas de Progreso.**

Mezcla	Edad de ensayo (días)	Coulombs	Nivel de permeabilidad
Aditivo 2	318	1097	<b>Bajo</b>
Aditivo 3	318	496	<b>Muy bajo</b>

Es claro observar que los concretos fabricados por Aditivo 3 también lograron valores de PRC por debajo de la especificación pedida en el proyecto ejecutivo (<1,000 Coulombs). En cambio, los valores de PRC para la mezcla de la empresa Aditivo 2 fue un 10% mayor al límite solicitado en estas especificaciones.

### 3.3 Mezclas fabricadas en obra, segunda etapa (Fecha 2)

Las mezclas elaboradas en esta fecha fueron de las tres empresas: Aditivo 1, Aditivo 2 y Aditivo 3. De nuevo, los agregados usados fueron del banco de Agregado 1. La empresa Aditivo 1 que quiso utilizar metacaolín en lugar de microsíllica, no logró – otra vez- homogeneizar la mezcla. Aun así, se fabricaron unos pocos cilindros para medir sus propiedades índice.

#### 3.3.1 Pruebas en concreto fresco

Para este ejercicio solo se evaluó la extensibilidad del concreto. No se tienen resultados de estas pruebas, pero estuvieron las tres en el rango especificado (extensibilidad de  $65 \pm 5$ cm).

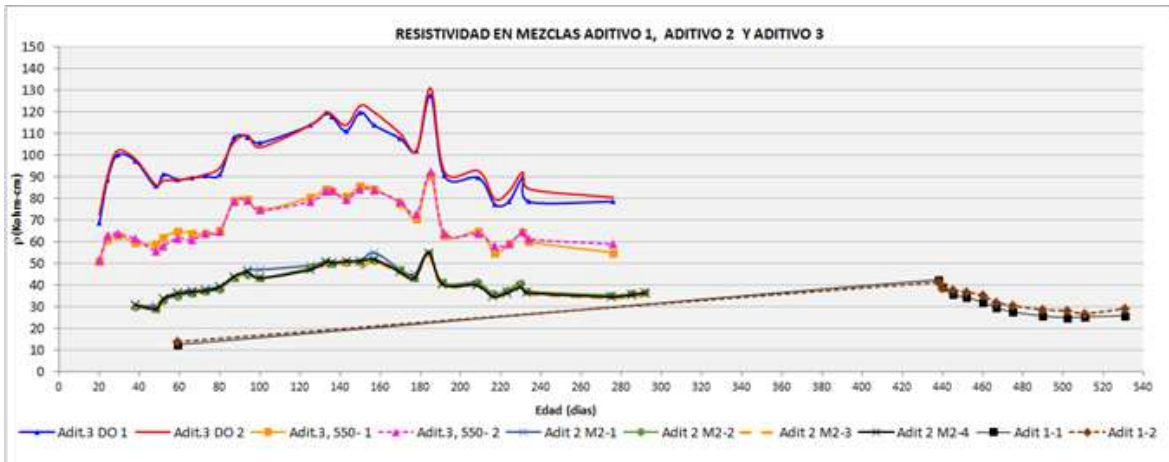
#### 3.3.2 Pruebas en concreto endurecido

Se muestran los resultados que se obtuvieron de REH, %TV y PRC en los cilindros de concreto de las mezclas fabricadas por Aditivo 2 y Aditivo 3. Para los pocos cilindros fabricados por la empresa Aditivos 1, se realizaron las pruebas de REH y PRC solamente.

##### 3.3.2.1 REH

La figura 3.12 muestra los resultados de las pruebas de REH del concreto de cada mezcla. Se puede observar que la mezcla de Aditivo 3 diseño original (D.O) presentó valores superiores al Aditivo3-550 y al Aditivo 2, con valores promedio a los 90 días de: 94, 79 y 46 k $\Omega$ -cm, respectivamente. Respecto a las mediciones de Aditivo 1, sólo se graficaron 12 mediciones; una inicial que apenas alcanzó los 13 k $\Omega$ -cm. a la edad de 59 días; otra máxima de 42 k $\Omega$ -cm a los 438 días y diez lecturas más a los 530 días, en las cuales no se rebasaron los 29 k $\Omega$ -cm.

De estos resultados, de nuevo se observa una variación de los valores de REH por la temperatura del ambiente en el interior del laboratorio, según la estación del año. También se puede observar que la mezcla de mejor desempeño fue la del concreto de Aditivo 3 con cemento CPC de Blaine alto y 8% de microsilica; le sigue la mezcla, también de Aditivo 3 de mismo cemento CPC que la anterior, pero con mayor contenido del mismo y menor contenido de microsilica; después, le sigue el desempeño de los concretos fabricados por Aditivo 2, con diferente marca de cemento CPC y menor Blaine y sin microsilica.



**Figura 3.12 Comparación de la REH en mezclas de Aditivo 1, Aditivo 2 y Aditivo 3**

Es así como se corrobora que el cemento tiene un efecto importante en el índice de durabilidad REH: mientras más reactivo es el cemento (mayor Blaine), la REH se incrementa en muy buena medida. Comparando el promedio de REH para Aditivo 3, sin microsilica y Blaine  $>4,000 \text{ cm}^2/\text{g}$  (Adit3, 550), los valores fueron del orden de  $80 \text{ k}\Omega\text{-cm}$  (invierno); mientras los de Aditivo 2 (sin microsilica y Blaine  $<4,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ), fueron de  $50 \text{ k}\Omega\text{-cm}$  (invierno), que corresponde a un 60% menos que el fabricado por Aditivo 1.

También se corrobora que la microsilica mejora este índice en un 50% al comparar los resultados (promedio en invierno) de la mezcla denominada Aditivo 1 DO ( $120 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ ), con los obtenidos por Aditivo 3 550 ( $80 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ ).

Por último, los valores de REH para la mezcla de la empresa Aditivo 1 alcanzaron valores muy por debajo de las otras dos marcas, y esto se debió de nuevo a que no hubo una buena homogeneidad de la adición del metacaolín con el cemento; generando un material poco compacto y con muchas oquedades en el interior, que hizo que la REH disminuyera radicalmente los primeros días.

### 3.3.2.2 Porcentaje total de vacíos (%TV)

La figura 3.13 muestra los resultados obtenidos de %TV de las cuatro mezclas, en donde se observa que Aditivo 3 DO presentó un %TV de 6.2 %, 6.5% la mezcla Aditivo 3-550, un 7.9 % la mezcla de Aditivo 2 y 10.6 % para la mezcla de Aditivo 1.

Es interesante notar que los valores obtenidos de %TV fueron los mejores en este tercer intento de encontrar la mezcla de concreto idónea para la construcción de la obra a ser colocada en un ambiente marino tropical, sabiendo la mala calidad de los agregados de la zona. En esta ocasión se alcanzaron valores tan bajos como 6%; lo que permite demostrar que no importa tanto la calidad del agregado en la creación de una mezcla de concreto altamente durable para ambientes muy agresivos, en este caso por cloruros marinos.

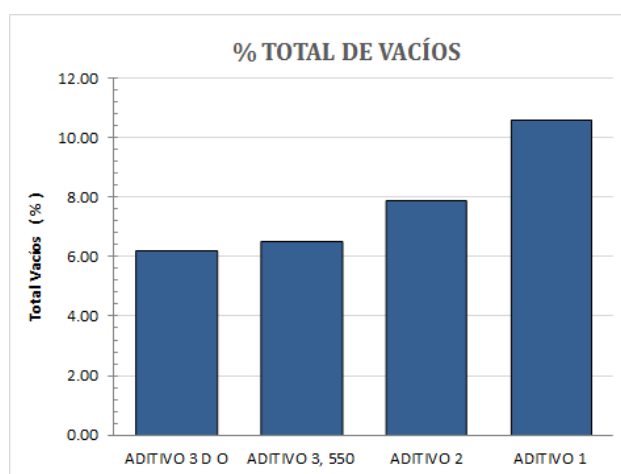


Figura 3.13 Porcentaje total de vacíos en las 4 mezclas

### 3.3.2.3 PRC

Se realizó la prueba de PRC a la edad 304 días, en las muestras de Aditivo 3, a 318 días en las de Aditivo 2 y a los 553 días las de Aditivo 1. De nueva cuenta se cumple que el mejor desempeño fue la mezcla fabricada por la empresa Aditivo 1 (CPC, Blaine >4,000 cm<sup>2</sup>/g, 8% microsíllica), dando valores de PRC tan bajos como 200-300 Coulombs. Le sigue la mezcla fabricada también por Aditivo 1, pero sin microsíllica (CPC, Blaine >4,000 cm<sup>2</sup>/g) con valores de PRC del orden de 600 Coulombs, que también fueron menores a lo especificado en el proyecto ejecutivo de la obra. Por último, la mezcla no homogénea fabricada por la empresa Aditivo 3 obtuvo valores de PRC por debajo también de los 1,000 Coulombs del proyecto ejecutivo, pero sin cumplir con el índice de REH.

**Tabla 3.6 Resultados de las pruebas de PRC en mezclas de Progreso  
(8 septiembre)**

<b>Mezcla</b>	<b>Edad de ensayo (días)</b>	<b>Coulombs</b>	<b>Nivel de permeabilidad</b>
Aditivo 3, DO	304	233	<b>Muy bajo</b>
Aditivo 3, 550		299	<b>Muy bajo</b>
Aditivo 2	318	622	<b>Muy bajo</b>
Aditivo 1	553	930	<b>Muy Bajo</b>



## 4 Análisis de los resultados

---

Una vez obtenidos los valores de las pruebas realizadas a las diferentes mezclas fabricadas en las tres fechas comentadas, el siguiente paso será analizar esta información para tratar de encontrar posibles correlaciones empíricas de los diferentes índices propuestos para calificar la durabilidad de mezclas de concreto.

Como se ha comentado antes; el índice denominado REH es el que más importancia se le ha dado en los últimos años, para determinar la durabilidad de concretos. Es así como se harán comparaciones de este índice con los otros dos medidos, y que fueron presentados a lo largo de este capítulo: %TV y PRC.

### 4.1 REH vs. PRC

La figura 4.1 muestra una gráfica compuesta por los resultados de REH y %TV de todas las mezclas evaluadas en esta investigación (12 en total). Como puede observarse, la correlación entre estos dos índices de durabilidad fue de 0.92; lo que la convierte en una herramienta numérica que pudiere ayudar a obtener el valor de uno de los índices sabiendo el valor del otro. Como la prueba de REH es rápida y más económica que la prueba de PRC, se podría muy bien utilizar la primera en campo o laboratorio y, la segunda, como una prueba de corroboración únicamente.

Se puede también observar que la correlación entre ambos índices de durabilidad no está afectada por el tipo de agregado, el tipo de aditivo o el tipo de cemento utilizado. Aunque si se alcanza a denotar una ligera mejoría en los valores de ambos índices para las mezclas con cemento con un Blaine mayor a los 4,000 cm<sup>2</sup>/g, que en esta investigación correspondió al CPC 40 R.

Las variaciones de estos índices con las propiedades del agregado utilizado también muestran diferencias considerables, como observan en los valores entre las mezclas M1 y M2, en donde solo modifica el banco de agregado de procedencia, y por ende sus propiedades físicas. Todas las demás mezclas fueron fabricadas con el Agregado 1, y las modificaciones entre ellas fueron en el tipo de cemento, marca del aditivo y adición (o no) de microsílica.

En la figura 2.2, aunque se observa que la mejor mezcla, la que tuvo los mayores índices de durabilidad REH y PRC, fue la M6; no se localizó la mezcla de diseño de esta mezcla preparada con el Aditivo 1, cemento CPO 30R RS y Agregado 1. Por ello se tuvo que desechar como propuesta final para el concreto a ser usado en la obra en cuestión. Es así como se seleccionó para la construcción de esta obra de concreto, ubicada en ambiente tropical marino, la mezcla Aditivo 3 DO.

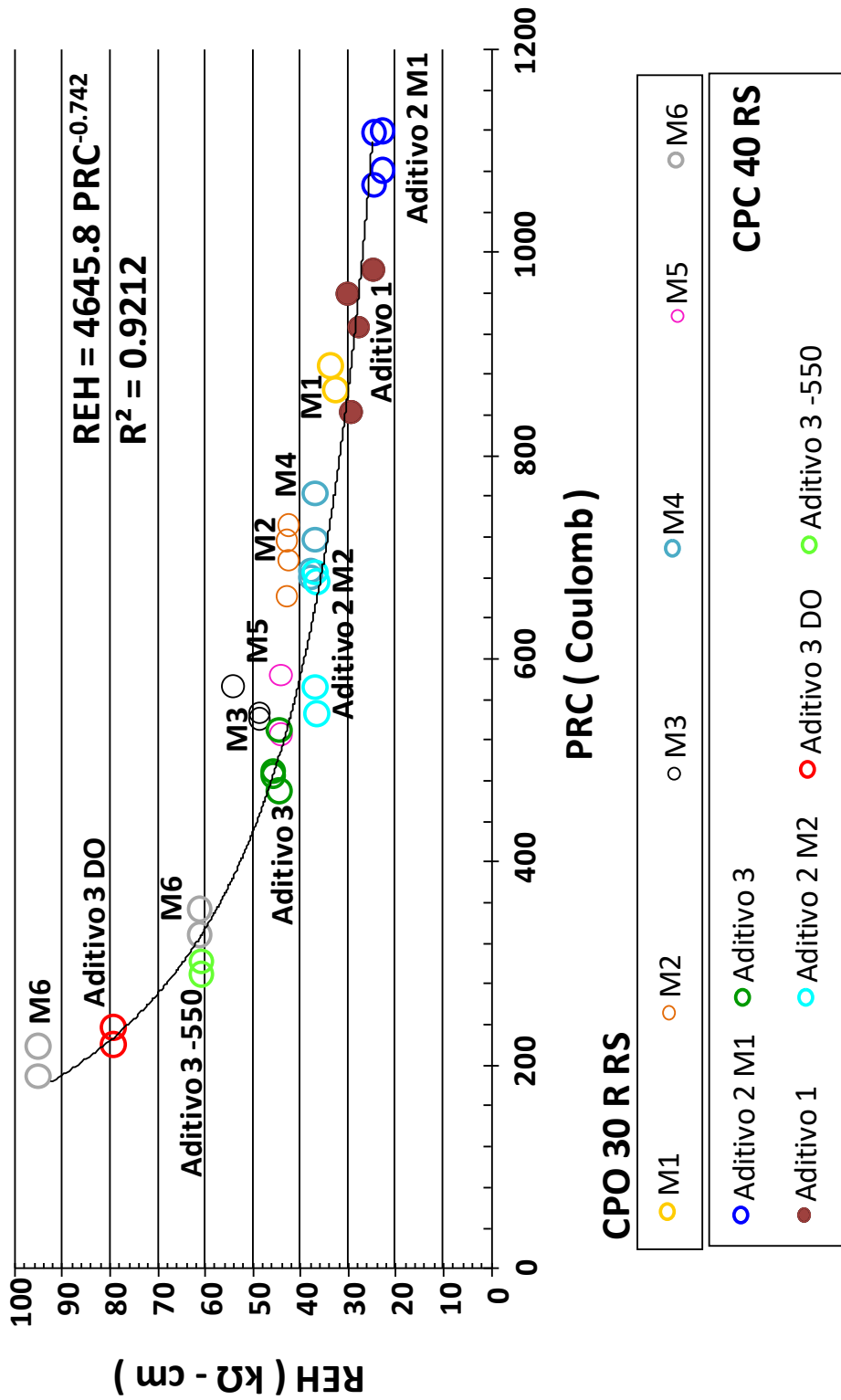


Figura 4.1 Correlación empírica entre REH y PRC.

## 4.2 REH vs. %TV

La figura 4.2 muestra la correlación entre los valores obtenidos de REH y %TV para las 12 mezclas estudiadas. Como puede observarse, los valores se pueden separar por tipo de cemento utilizado: CPO 30 R RS y CPC 40 RS. Al dividir los resultados en dos familias, se puede muy bien observar la codependencia de los dos índices estudiados, REH y %TV: a menor es el valor de %TV, mayor es el valor obtenido de REH.

Comparado con la correlación empírica entre REH y PRC, los resultados fueron más dispersos y los valores de correlación bajos ( $R^2= 0.20$  para CPO 30R RS y  $R^2=0.57$  para CPC 40 RS), tras considerar una relación lineal entre ambos índices (las cuales fueron aproximadamente  $[REH = -4.7 \cdot (\%TV) + 96.6]$  y  $[REH = -7.6 \cdot (\%TV) + 103]$  respectivamente). Es recomendable obtener un mayor número de resultados experimentales para poder encontrar una correlación más exacta entre los índices de durabilidad REH y %TV.

## 4.3 %TV vs PRC

Por último, la figura 4.3 muestra los valores índice de %TV y PRC entre los resultados de las 12 mezclas evaluadas. De nueva cuenta se observó una separación muy marcada entre los valores obtenidos de cada uno de los tipos de cemento utilizados en esta investigación; por ello fueron delimitados con una curva cerrada punteada color rojo.

Se obtuvo una correlación lógica entre los resultados, puesto que a mayor %TV, mayor es el valor obtenido de PRC. Aunque la pendiente de esta relación fue muy pequeña, ya que las mezclas evaluadas, si bien eran diferentes entre sí por el tipo de cemento y aditivo, no representaban una variación considerable en la relación agua/cementante (a/cm); lo que haría una diferencia muy marcada entre los concretos (se mantuvieron relaciones a/cm entre 0.35 y 0.38).

Considerando una relación lineal entre ambos índices (%TV y PRC), las correlaciones fueron  $[\%TV=0.0045 \cdot (PRC) + 7.6]$  y  $[\%TV=0.0042 \cdot (PRC) + 5.4]$  para cemento CPO 30R RS y cemento CPC 30 RS, respectivamente. Sus coeficientes de correlación fueron  $R^2=0.27$  y  $R^2=0.58$  para cemento CPO 30R RS y cemento CPC 30 RS, respectivamente. De nuevo, se recomienda obtener un mayor número de resultados experimentales, para poder encontrar una correlación más exacta entre los índices de durabilidad %TV y PRC.

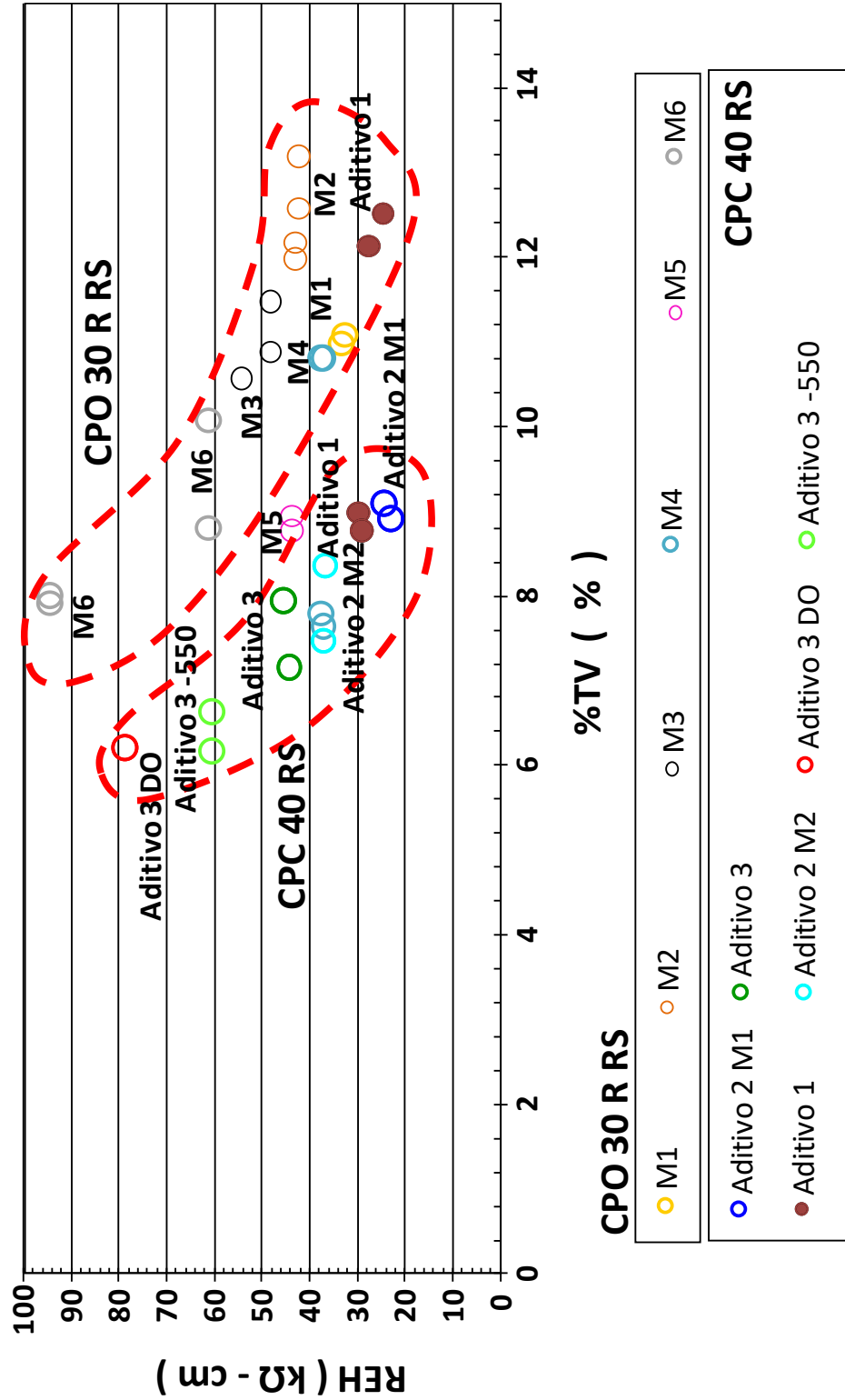


Figura 4.2 Correlación empírica entre REH y %TV

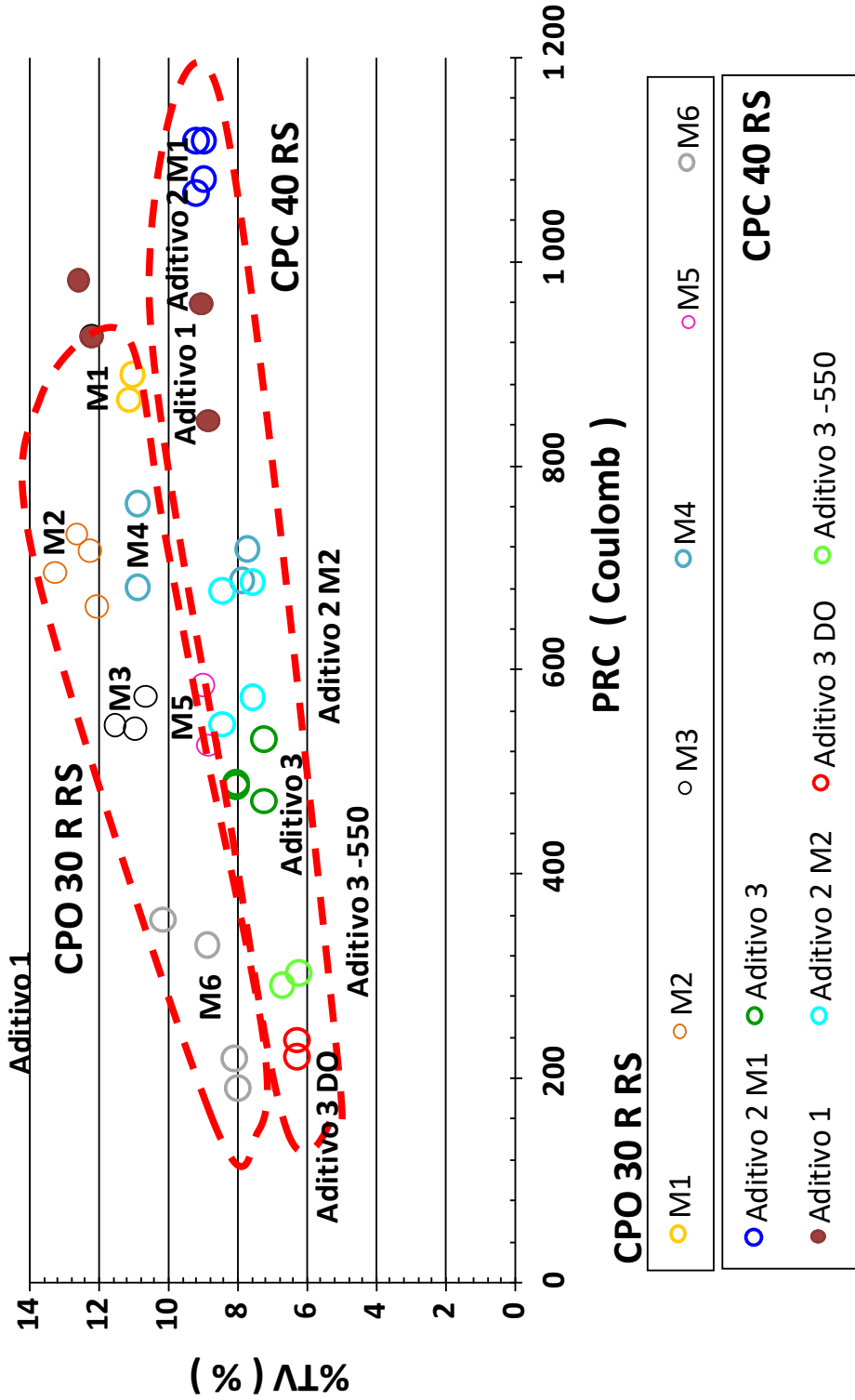


Figura 4.3 Correlación empírica entre %TV y PRC.



## 5 Conclusiones

---

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación, derivan las siguientes conclusiones:

- Para construir una estructura de concreto autoconsolidable (o uno normal con revenimiento) durable, primeramente, se debe evaluar los materiales que constituirán la mezcla de diseño del concreto antes de iniciar la obra. Esto para determinar las proporciones de cada uno de los materiales constituyentes de este (cemento, agua, agregados (fino y grueso) y aditivos químicos o minerales), y el concreto ya endurecido cumpla con los índices de durabilidad que en el proyecto ejecutivo hayan sido definidos.
- Se obtuvieron índices de durabilidad, en los concretos autoconsolidables, que permiten predecir que estos pueden ser usados en estructuras ubicadas en ambientes marino tropicales y pueden llegar a alcanzar vidas útiles por arriba de los 60 años.
- Los índices de durabilidad más importantes observados en esta investigación fueron la resistividad eléctrica húmeda (REH), la permeabilidad rápida del ion cloruro (PRC) y el porcentaje total de vacíos (%TV); por lo que se recomienda que estos sean los que deben ser definidos en el proyecto ejecutivo de una obra de concreto autoconsolidable que sea durable.
- El índice de durabilidad denominado velocidad de pulso ultrasónico (VPU) únicamente se utilizaría para determinar las posibles variaciones entre mezclas fabricadas en diferentes fechas. Es decir, será un índice que ayudará a determinar la homogeneidad de las mezclas fabricadas en diferentes fechas.
- Las propiedades físicas de los agregados afectan considerablemente a los valores índice de durabilidad, siendo la densidad específica y la absorción las más importantes. Los agregados a ser usados en mezclas de concreto autoconsolidable durables, deben tener una densidad específica por arriba de 2.4 y una absorción de humedad no mayor de 5%. En específico, el agregado grueso no debe tener un desgaste en la prueba de los ángeles mayor a 40%; y para el agregado fino se debe de seleccionar uno cuyo módulo de finura debe ser no mayor a 3.
- Se debe también tener mucho cuidado en la selección del cemento, ya que se demostró en esta investigación que su reactividad puede asegurar una buena dispersión de los aditivos químicos reductores de agua de alto rango, de tercera generación, como el utilizado en esta investigación (policarboxilatos). Esta

reactividad está principalmente afectada por la finura del cemento, sin importar el tipo del mismo (CPO, CPC u otro tipo). Es por ello que se recomienda, para concretos autoconsolidables durables, el uso de cementos tipo Portland con un Blaine mayor a los 4 000 cm<sup>2</sup>/g, para que se obtengan los índices adecuados para ser estructuras durables.

- **REH:** Este índice de durabilidad podría ser el más recomendado para la aceptación o rechazo de la mezcla de diseño, antes de iniciar la construcción de la obra. Esto porque es una prueba muy sencilla de realizar, en laboratorio y en campo, y provee de valores fáciles de evaluar en pocos minutos, que es lo que dura esta prueba en cada cilindro de concreto. El único inconveniente, para cilindros de 10x20 cm como los que se utilizaron en esta investigación, es el efecto de la temperatura del ambiente; que puede generar variaciones de la medición entre un 20% y un 30%. Por ello, se recomienda controlar la temperatura del laboratorio donde se realizarán las mediciones.
- **%TV:** Esta prueba es la más directa en cuanto a la posibilidad de medir la porosidad interna y la interconectividad del concreto autoconsolidable endurecido. Regularmente se especifica que un concreto de alta durabilidad debe tener un valor de %TV no mayor al 10%.
- **PRC:** Por último, se ha visto en la literatura que la prueba índice de PRC es la más utilizada en el mundo; el único inconveniente es lo tardada que puede ser y lo complicado en la preparación de las muestras y el costo de los equipos; comparado con los costos de un resistómetro o una balanza usados en las pruebas de REH y %TV respectivamente.



## Bibliografía

---

Atenta Nota 20161222 Torres Acosta Andrés A. Instituto Mexicano del Transporte, 2016.

C. Andrade, Calculation of initiation and propagation periods of service life of reinforcements by using the electrical resistivity, Institute of Construction Science "Eduardo Torroja", Madrid, España: CSIC, 2004.

C. Andrade, Normalización y Modelado de la Vida Útil en Estructuras de Hormigón, Madrid, España: Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja", CSIC., 2009.

J. Gudimettla, Resistivity Test for Concrete - Recent Field Experience, USA: ACI MATERIALS JOURNAL, V. 113, No. 4, August 2016.

C. Andrade, «La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad,» vol. 1, nº 2, Mayo-Agosto 2011.

RED DURAR (1998). Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela, 2da Edición. Julio.

J. W. Spragg R., Electrical Testing of Cement-Based Materials: Role of Testing Techniques, Sample Conditioning, and Accelerated Curing., West Lafayette, Indiana: Publication FHWA/IN/JTRP-2013/28. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, 2013.



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado-Galindo”  
Parque Tecnológico San Fandila  
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México  
CP 76703  
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610  
Fax +52 (442) 216 9671

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

<http://www.imt.mx/>

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad certificada bajo la norma ISO 9001:2015