ISSN 0188-7297







Relación entre resistividad eléctrica, temperatura de medición, área de agregado grueso y porosidad en núcleos de concreto

Andrés Antonio Torres Acosta Alejandro Moreno Valdés Jesús Daniel Rangel Reséndiz María Guadalupe Lomelí González Miguel Martínez Madrid

> Publicación Técnica No. 547 Sanfandila, Qro, 2019

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Relación entre resistividad eléctrica, temperatura de medición, área de agregado grueso y porosidad en núcleos de concreto

> Publicación Técnica No. 547 Sanfandila, Qro, 2019

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural, del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Andrés Antonio Torres Acosta, el Ing. Alejandro Moreno Valdés (consultor externo, auxiliar de investigador), el Ing. Jesús Daniel Rangel Reséndiz (estudiante de posgrado en Ingeniería de Materiales del Instituto Tecnológico de Querétaro), la Ing. María Guadalupe Lomelí González y el Dr. Miguel Martínez Madrid.

Se agradece la colaboración de API Progreso (Puertos Yucatán S.A. de C.V.) y la empresa COCONAL S.A. de C.V. por el apoyo en logística durante la fabricación y el transporte al Laboratorio de Desempeño de Vehículos y Materiales, de los núcleos de concreto usados para la caracterización de esta investigación.

Se agradece también al Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) el apoyo recibido en la entrega de la información del registro de temperaturas de la estación climática de Agrique, ubicada en el municipio de Pedro Escobedo, Querétaro, usado para una parte del desarrollo de la presente investigación.

Esta investigación es el producto final del proyecto interno de investigación El 33/18: Relación entre la resistencia eléctrica, área de agregado y prueba índice de durabilidad en núcleos de concreto.

Contenido

Índice de figuras		v
Índice de tablas		ix
Sinopsis		xi
Abstract		xiii
Resumen	ejecutivo	xv
Introducción		1
Capítulo 1.	Antecedentes	5
Capítulo 2.	Metodología experimental	7
Capítulo 3.	Resultados	15
Capítulo 4.	Análisis de resultados	21
Capítulo 5.	Conclusiones	43
Bibliografía		45
Anexo 1		47
Anexo 2		49

Índice de figuras

Medición de resistencia eléctrica del bulk	7
Corte de núcleos en rodajas	8
Medición de resistencia eléctrica en rodajas	8
Identificación de rodajas	8
Escalado de imagen	10
Imagen binaria y con ajuste de contraste en color azul	10
Imagen de una rodaja antes y después de colocar polvo de carbón	11
Rodajas en proceso de absorción	12
RE en <i>bulk</i> y rodajas	21
RE en <i>bulk</i> y sumatoria de rodajas	22
Correlación empírica entre RE del <i>bulk</i> vs suma de RE en rodajas	23
Valores de REH con la temperatura mínima y media en series 1 a 4	24
Valores de REH con la temperatura mínima y media en series 5 a 7	25
	Medición de resistencia eléctrica del bulkCorte de núcleos en rodajasMedición de resistencia eléctrica en rodajasIdentificación de rodajasEscalado de imagenImagen binaria y con ajuste de contraste en color azulImagen de una rodaja antes y después de colocar polvo de carbónRodajas en proceso de absorciónRE en bulk y rodajasRE en bulk y sumatoria de rodajasCorrelación empírica entre RE del bulk vs suma de RE en rodajasValores de REH con la temperatura mínima y media en series 1 a 4Valores de REH con la temperatura mínima y media en series 5 a 7

Figura 4.6	Correlación empírica entre REH y temperatura mínima (a) y media (b), serie 1	26
Figura 4.7	Pendientes de las líneas de tendencia utilizando la temperatura mínima, serie 1	29
Figura 4.8	Valores de REH vs temperatura mínima (a) y media (b) de la serie 1, corregidos con la fórmula de Arrhenius	31
Figura 4.9	Gráfica de valores acumulados de REH por rodaja	32
Figura 4.10	Gráfica de valores acumulados de AAG por rodaja	33
Figura 4.11	Gráfica de valores acumulados de Amp por rodaja	34
Figura 4.12	Gráfica de valores acumulados de %TV por rodaja	35
Figura 4.13	Gráfica de valores acumulados de $\epsilon_{\mbox{\tiny EF}}$ por rodaja	35
Figura 4.14	Correlación empírica entre REH y %TV	36
Figura 4.15	Correlación empírica entre REH y EEF	37
Figura 4.16	Correlación empírica entre $\boldsymbol{\epsilon}_{\text{EF}}$ y %TV	37
Figura 4.17	Correlación empírica entre REH y AAG	39
Figura 4.18	Correlación empírica entre AAG y %TV	39
Figura 4.19	Correlación empírica entre A_{AG} y ϵ_{EF}	40
Figura 4.20	Correlación empírica entre REH y AMP	40
Figura 4.21	Correlación empírica entre Amp y %TV	41

Figura 4.22	Correlación empírica entre A_{MP} y ϵ_{EF}	41
Figura 4.23	Correlación empírica entre AAG y AMP	42

Índice de tablas

Tabla 2.1	Identificación de núcleos por serie	9
Tabla 3.1	RE (RE _B) en <i>bulk</i> y rodajas (RE _R)	15
Tabla 3.2	Valores de REH y temperatura en las series 1 a 4	16
Tabla 3.3	Valores de REH y temperatura en las series 5 a 7	17
Tabla 3.4	Valores obtenidos en cada rodaja, series 1 a 4	18
Tabla 3.5	Valores obtenidos en cada rodaja, series 5 a 7	19
Tabla 4.1	Resultados de correlaciones entre REH y temperaturas mínimas y media, series 1 a 7	26
Tabla 4.2	Valores de REH(Ω .m), logaritmo natural (ln) y temperatura (°K)	28
Tabla 4.3	Valores de la pendiente, E A-Cond, y REH corregida de la serie 1, calculados con temperatura mínima	29
Tabla 4.4	Valores de la pendiente y E A-Cond obtenidos para cada núcleo	30
Tabla 4.5	Resultados promedio de correlaciones entre REH corregida y temperaturas mínima y media para cada serie	31

Sinopsis

En el presente estudio se caracterizaron físicamente núcleos (corazones) de concreto (5 cm de diámetro y 10 cm de altura), extraídos durante la fabricación de los concretos para trabes prefabricadas/presforzadas de una obra de concreto ubicada en una zona marina tropical. El monitoreo de la resistividad eléctrica húmeda (REH) de estos núcleos y la temperatura ambiental se realizó durante casi un año.

Finalizado este monitoreo, los núcleos se cortaron en cuatro partes de espesor similar (2.5±0.25 cm), y se continuó con el monitoreo de la REH y la temperatura ambiental. Al mismo tiempo de cortarse en rodajas, se tomaron fotografías en ambas caras de cada rodaja. Estas fotografías se evaluaron mediante un software analizador de imágenes, para determinar el área de agregado grueso (A_{AG}) y el área de macroporos (A_{MP}) en ambas caras de cada rodaja.

Por último, cada rodaja se utilizó para determinar dos indicadores de durabilidad más: porcentaje total de vacíos (%TV) y porosidad capilar (ϵ_{EF}). Una vez obtenidos los valores de REH, A_{AG}, A_{MP}, %TV y ϵ_{EF} para cada rodaja, se graficaron combinando estos parámetros a fin de determinar sus tendencias y posibles correlaciones.

Abstract

In the present investigation, concrete cores (5 cm of diameter and 10 cm of height, extracted during the manufacturing of prefabricated/prestressed concrete beams, from a concrete infrastructure construction located in a marine, tropical zone in Northern Yucatan, Mexico) were physically characterized. Wet electrical resistivity (WER) monitoring was done over a period of nearly a year. This task also included ambient temperature monitoring to determine possible effects on these measurements.

Once the WER vs. ambient temperature monitoring concluded, the concrete cores were sliced at similar thicknesses (2.5 ± 0.25 cm). After cutting them, WER and ambient temperature were monitored on each of the slices obtained. At the same time, both sides of the slices were photographed. These photographs were evaluated with image analyzer software, to determine the aggregated area (A_{AG}) and the macropore area (A_{MP}) on both faces of each slice.

Finally, each slice was used to determine two additional durability indicators: total percentage void content (%TV), and capillary porosity (ϵ_{EF}). Once the values for WER, A_{AG}, A_{MP}, %TV, and ϵ_{EF} were obtained from each slice, graphs were plotted between these parameters to determine their tendencies and possible correlations between them.

Resumen ejecutivo

Como parte de la caracterización de los concretos usados en la construcción de una obra importante ubicada en ambiente marino en la península de Yucatán, la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural (CIVIE) del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) apoyó en la supervisión de la durabilidad de los concretos usados en la fabricación de los elementos prefabricados/presforzados de esta obra de relevancia.

La supervisión incluyó la tarea de determinar si los concretos de estos elementos cumplían con lo establecido en el proyecto ejecutivo de la obra en cuestión, en lo que se refiere a su durabilidad. Para ello, personal encargado de la supervisión externa de esta obra hizo llegar núcleos de concreto extraídos de estos elementos estructurales (trabes prefabricadas o presforzadas y losas), transportados de manera cuidadosa y con protecciones contra golpes o vibraciones excesivas, al Laboratorio de Materiales del IMT.

Una vez los núcleos en el laboratorio, se generó un inventario de los mismos con las dimensiones en que se recibieron (diámetro y longitud). Después de conocer el número de ellos y sus dimensiones, se cortaron en cilindros de 5x10 cm dimensiones nominales. Ya teniendo los núcleos con dimensiones adecuadas, se continuó con un programa de monitoreo de la REH y la temperatura del medio ambiente durante un periodo de casi un año. Una vez terminado este monitoreo con los núcleos completos, cada uno se cortó en cuatro rodajas de 2.5±0.25 cm de alto.

Ya cortados los núcleos en cuatro rodajas cada uno, se continuó el monitoreo de la REH y la temperatura ambiental por un periodo de 200 días más. En paralelo, se tomaron fotografías a cada rodaja en sus dos caras de corte. Estas fotografías se evaluaron usando un analizador de imágenes para determinar el valor de A_{AG} de cada rodaja. Terminado el periodo de monitoreo de REH y temperatura, se continuó con el programa para determinar el %TV y la ϵ_{EF} , mediante técnicas ya conocidas de absorción-desorción de agua en la rodaja y su respectivo cambio de peso hasta peso constante.

Finalmente, con los datos recabados, se realizaron los análisis de los datos experimentales para determinar el efecto de la temperatura ambiental con los valores obtenidos de REH y las correlaciones entre REH, vs. A_{AG}, vs. A_{MP}, vs. %TV y vs. ϵ_{EF} para cada rodaja evaluada.

Introducción

Se sabe que las estructuras de concreto son durables en ambientes no tan severos, y esto se basa en el gran número de estructuras de este tipo aún en buen estado durante su vida de servicio. Se ha diseminado en todo el mundo la idea de que las estructuras de concreto son amigables con el medio ambiente por su durabilidad, lo que implica que no se necesite utilizar más material por el mantenimiento correctivo y, por ende, no se contamine el medio ambiente por la fabricación de estos materiales. Pero en realidad esta característica, casi universal, ha tenido ejemplos que lo contradicen, ya que muchas estructuras de concreto muestran deterioros en edades muy cortas de servicio, principalmente si los ambientes a que están expuestas son agresivos, como los entornos urbano, industrial o marino.

Por cuanto a infraestructura de transporte (como estructuras de concreto tipo puentes y muelles) ubicada en ambientes marinos e industriales (o una combinación de ellos), se ha encontrado que ésta se ve afectada en gran medida por daños cuya patología principal es la corrosión del acero de refuerzo o presfuerzo (Torres Acosta *et al.*, 2010 y 2012). Esta patología se ha observado en diversidad de países, sin importar su desarrollo económico o tecnológico: industrializados, emergentes o en vías de desarrollo, por lo que los daños no varían en función de los recursos económicos de que disponga el país afectado. En los casos de países en vías de desarrollo, su infraestructura corresponderá a este nivel, por lo que la cantidad de puentes (o muelles) afectados por corrosión del refuerzo será proporcional al producto interno bruto (PIB) respectivo. Por ello, la cantidad de inversión requerida para dar mantenimiento a la infraestructura de transporte guardará consonancia con la bonanza del país.

El principal problema que genera un acelerado índice de corrosión, en las estructuras de concreto dañadas en el mundo, es el poco conocimiento de los materiales usados para la fabricación de esta infraestructura de concreto y sobre cómo éstos reaccionan química y físicamente con el entorno al que están expuestos. Este desconocimiento genera que los profesionales de la construcción, principalmente ingenieros civiles y arquitectos, consideren en el diseño de una estructura de concreto las acciones mecánicas únicamente, entre otras: cargas gravitacionales (cargas muertas y vivas), cargas accidentales (vientos y sismos) y cargas de impacto (principalmente en puentes). Sin embargo, desconocen otro tipo de acciones meteorológicas y químicas del ambiente al que se expondrán.

Estas acciones ambientales son causadas principalmente por contaminación antropogénica (CO₂ y SO₂) en zonas urbanas e industriales, y iones cloruro (Cl⁻) en ambientes marinos. Estas acciones ejercen cargas ambientales a los materiales que

conforman las estructuras, por lo que reaccionan químicamente con ellos para intentar cambiar su estado químico artificial. El acero de refuerzo o presfuerzo, por ejemplo, es un material fabricado que, aunque carece de estabilidad termodinámica, puede modificarse para cambiar este estado inestable por uno más estable y natural, que es el óxido de fierro, lo cual produce la corrosión del mismo.

En el caso de concreto, considerado anteriormente una piedra artificial inerte, se ha demostrado que los productos de hidratación del cemento son también inestables y pueden reaccionar con agentes químicos que penetran en la porosidad del material y modifican su composición química. Estas reacciones generan modificaciones volumétricas de expansión dentro de la matriz del concreto, lo que forma tensiones internas y grietas (el concreto reacciona en forma adversa a los esfuerzos en tensión). Estos cambios en el concreto y el acero producen patologías variadas que se manifiestan principalmente con la aparición de grietas o manchas de óxido en la superficie de los elementos estructurales de concreto.

Es también importante mencionar que se desconocen los procedimientos adecuados para la construcción de estructuras durables, principalmente el uso conveniente de los materiales para la fabricación de este tipo de concretos (mezclado, transporte, colocado y curado). Por ello, es preciso definir, no sólo los procedimientos para el diseño de concretos durables (Torres Acosta *et al.*, 2018a), sino también los procedimientos constructivos y una adecuada supervisión de la construcción de estructuras durables que se expondrán a ambientes agresivos.

En trabajos anteriores, se han mostrado nuevos procedimientos propuestos por un grupo de investigadores e instituciones de educación superior que, trabajando con el firme propósito de modificar los procedimientos para diseñar, construir y supervisar obras de concreto durables expuestas a ambientes agresivos, buscando formular una nueva normativa mexicana con tal fin (Torres Acosta *et al.*, 2018a; Torres Acosta y Castro Borges, 2018).

En una referencia previa, se presentó la manera de seleccionar la materia prima (tipo de cemento, agregado y aditivo) para la fabricación de una mezcla de concreto que cumpliera con los requisitos previstos en el proyecto ejecutivo en términos de desempeño y durabilidad (Torres Acosta *et al.*, 2018a). En ésta, se explicó que el desempeño solicitado en el proyecto ejecutivo por cuanto a durabilidad se mide con la prueba estandarizada de resistividad eléctrica húmeda (REH) y la de permeabilidad rápida de cloruros (PRC), las cuales correspondían a los procedimientos normados NMX-C-514-2016 y ASTM C-1202, respectivamente.

En la etapa de la supervisión y el control de la calidad de concretos durables en obra, se debe dar un seguimiento cercano al proceso de fabricación, transporte, colocación, consolidación y curado, dosificación y cumplimiento en el espesor de recubrimiento de los elementos a fabricarse. Para el caso de la fabricación y dosificación del concreto para obras durables, es obligación de la contratista o la supervisión externa extraer testigos de concreto en elementos estratégicos para determinar que el concreto ya colocado y endurecido cumple con los requisitos proyectados de desempeño por cuanto a durabilidad: REH o PRC. De esta manera, el dueño se cerciora de la durabilidad de la infraestructura colocada en su obra.

La necesidad de verificar que el concreto colocado en los elementos estructurales cumple con el desempeño solicitado en el diseño se debe a que las pruebas realizadas en cilindros estandarizados, fabricados por laboratoristas o especialistas acreditados para su fabricación, podrían no reflejar el material realmente colocado en los diferentes elementos de concreto de la obra.

Las pruebas de indicadores de durabilidad, principalmente la de REH, han demostrado que son dependientes de la temperatura del ambiente de medición, por lo que se deben tomar ciertas precauciones para su adecuado uso en condiciones de temperaturas extremas o variables (Torres Acosta *et al.*, 2018b). Otro parámetro que podría afectar las mediciones en núcleos extraídos del concreto a evaluar es la heterogeneidad del concreto endurecido, ya que se compone de materiales sumamente disimilares, como sucede con la pasta de cemento y los agregados, sin contar los vacíos que pudieran formarse por burbujas o la porosidad del material cuando endurece.

Esta investigación, por lo tanto, aborda las posibles interferencias en las mediciones de las pruebas de indicadores de durabilidad, principalmente lo que se refiere a la REH, debido al tamaño de los núcleos extraídos y del agregado del concreto, así como a la temperatura del ambiente de medición en el mismo monitoreo de REH en el tiempo.

•

1 Antecedentes

A fin de determinar la durabilidad del concreto empleado en la construcción de una obra en un ambiente marino, se llevaron a cabo diversas pruebas físicas y mecánicas a los núcleos extraídos: resistividad eléctrica húmeda (REH), velocidad de pulso ultrasónico (VPU), porcentaje total de vacíos (%TV), porosidad efectiva (ϵ_{EF}) y resistencia a la compresión.

Se recibieron testigos de concreto de diferentes elementos estructurales (trabes prefabricadas o presforzadas y losas), lo que da un total de aproximadamente 340 núcleos, los cuales se inventariaron y cortaron para realizar las pruebas fisicomecánicas. En cada envío llegaron varias cajas de madera con los testigos de concreto (Torres Acosta *et al.*, 2016).

Cada caja contaba con los testigos de estos elementos estructurales. Los testigos se entregaron con una leyenda escrita, la cual indicaba la fecha de extracción, el tipo de elemento de donde se extrajo, la ubicación de la extracción en el elemento evaluado y el claro al que pertenecía (Torres Acosta *et al.*, 2016).

Se tomó evidencia fotográfica de cada uno de los testigos extraídos y recibidos en el IMT. Después, utilizando un vernier y una regla flexible, se procedió a realizar el levantamiento de las medidas longitudinales y transversales de cada uno de los testigos de cada serie recibida en el IMT. Una vez medidos los testigos, se guardaron en bolsas de plástico para conservar su humedad inicial y se almacenaron en sus respectivas cajas (Torres Acosta *et al.*, 2016).

Con el objeto de obtener el promedio de la altura, se tomaron tres lecturas a lo largo de cada testigo. Luego para medir el diámetro promedio de cada testigo, se midió el diámetro en la parte superior, media, e inferior. La pieza en estudio se rotó 90° para realizar las mismas mediciones, con lo que se obtuvo un total de seis lecturas para promediar el diámetro de cada uno de los testigos recibidos. Una vez obtenidos los promedios de las alturas y los diámetros de los testigos, se realizaron diagramas de corte, para determinar cuál de los testigos se utilizaría en las pruebas físicas y mecánicas listadas anteriormente (Torres Acosta *et al.*, 2016).

La selección de los testigos para cortarse en especímenes de dos dimensiones fueron cilindros de 10 cm de altura (especímenes RV) y rodajas de 3 a 5 cm de altura (especímenes VF). Los especímenes RV se destinaron a la realización de pruebas de VPU, REH y resistencia a la compresión. Los especímenes VF se utilizaron para realizar pruebas de %TV y ϵ_{EF} (Torres Acosta *et al.*, 2016).

Una vez definidos los diagramas de corte, utilizando la misma metodología que en Torres Acosta *et al.* (2016), éstos se ejecutaron haciendo marcas previas con ayuda de una regla flexible y un lapicero para garantizar la exactitud de las medidas.

Una vez marcados los cilindros, se realizaron los cortes con una cortadora de concreto de banco fijo, para luego volver a medir la probeta, ante la posibilidad de que se presentara una mínima variación en las medidas, ya fuera por pérdida de material o fracturas del espécimen. Una vez realizados los cortes, el exceso de agua se retiró con un trozo de tela y la pieza se registró con el código establecido previamente; los residuos de los corazones de concreto se almacenaron en las bolsas habilitadas para resguardar los especímenes al término de las pruebas respectivas.

Cortados los testigos de concreto en especímenes RV (cilindros para REH, VPU y resistencia a la compresión) y VF (%TV y ϵ_{EF}), se pesaron ambos tipos para registrar el peso húmedo inicial, luego se saturaron las muestras en recipientes con cal y se obtuvo el peso saturado superficialmente seco. Se continuó con esta medición hasta llegar a un valor constante. Cuando se llegó a peso constante en los RV y VF, se prosiguió con las pruebas asignadas a cada espécimen.

Los resultados de estas pruebas, para las siete series de núcleos evaluadas, se entregaron al cliente para corroborar la calidad de los concretos usados en la fabricación de las trabes prefabricadas o presforzadas (series 1 a la 6) y las losas (serie 7) de la obra en construcción (Torres Acosta *et al.*, 2016).

Existieron dudas sobre los resultados obtenidos de estos núcleos extraídos al azar, principalmente porque los valores de REH estuvieron por debajo de lo especificado en el proyecto ejecutivo (> 50 k Ω -cm), aunque los valores de %TV estuvieron por debajo de lo especificado en este mismo proyecto ejecutivo (< 15%). Por ello, se decidió continuar con el monitoreo de REH de los especímenes RV que se mantuvieron en el laboratorio y realizar pruebas adicionales para determinar la razón de los resultados emanados de las pruebas realizadas previamente en Torres Acosta *et al.* (2016).

2 Metodología experimental

2.1 Medición de resistencia eléctrica (RE) y resistividad eléctrica húmeda (REH)

Debido a que en otras publicaciones se ha detallado cómo se obtiene la REH (Torres Acosta *et al.*, 2018a y 2018b), sólo se explicará la forma en que se obtuvo la resistencia eléctrica (RE) en las rodajas usadas para esta investigación.

De los núcleos extraídos en diferentes trabes prefabricadas o presforzadas, se seleccionaron en forma aleatoria 27 núcleos, los cuales se pusieron a saturar en agua para medir periódicamente su resistencia eléctrica hasta que ésta fuera constante (figura 2.1). En esta etapa, luego de medir la resistencia eléctrica del *bulk* (núcleo completo), éste inmediatamente se cortó en rodajas de 2.3±0.3 cm de ancho (figura 2.2). Para reducir la pérdida de humedad y la variación entre la medición del *bulk* con las rodajas, conforme cada rodaja se fue cortando se midió su resistencia eléctrica (figura 2.3). Así, de cada núcleo se obtuvieron cuatro rodajas, identificadas del 1 al 4, siendo la rodaja exterior el número 1, la 2 y 3 las intermedias, y por último la 4 (figura 2.4).



Figura 2.1. Medición de resistencia eléctrica del bulk

De esta manera, se realizó el ejercicio de verificar si el comportamiento de los circuitos eléctricos es posible igualarlo en el concreto, sumando en serie las resistencias eléctricas de las cuatro rodajas e igualándolas con la resistencia del *bulk*.



Figura 2.2. Corte de núcleos en rodajas



Figura 2.3. Medición de resistencia eléctrica en rodajas



Figura 2.4. Identificación de rodajas

2.2 Efecto de la temperatura ambiental en las mediciones de REH

A fin de observar el efecto de la temperatura ambiental en la REH medida de los núcleos, se utilizaron mediciones de REH hechas a los 27 núcleos, en diferentes fechas, durante un periodo de 460 días (del 3 de junio de 2016 al 6 de septiembre de 2017), correspondientes a un estudio anterior realizado por el IMT (Torres Acosta *et al.*, 2018a). Los núcleos se agruparon en siete series, cada una compuesta de cuatro núcleos, con excepción de la serie 7, compuesta de tres, como se muestra en la tabla 2.1.



Tabla 2.1 Identificación de núcleos por serie

Como al momento de hacer las mediciones no se registró la temperatura en el laboratorio, fue necesario utilizar registros de temperatura mínima y media de la estación climática Agrique, cercana al IMT, ubicada en el municipio de Pedro Escobedo, Querétaro, con base en los datos obtenidos en un trabajo previo (Torres Acosta *et al.*, 2018a). Se utilizó la ecuación de aproximación de Arrhenius para corregir la variación en las mediciones de resistividad de los especímenes, y así comprobar la efectividad de la ecuación para la estandarización de la medida de resistividad a una temperatura de referencia (23 °C) (Torres Acosta *et al.*, 2018a).

2.3 Área de agregado grueso

La determinación del área de agregado grueso de cada rodaja se hizo utilizando un programa de procesamiento de imágenes llamado "ImageJ J", el cual tiene entre sus múltiples aplicaciones la capacidad de contar partículas y el área de éstas.

El procedimiento consistió en dar un tratamiento petrográfico a cada lado de las rodajas, utilizando un abrasivo a base de lijas del núm. 180 hasta el núm.800, ello con el propósito de tener una imagen más clara del agregado grueso. Una vez pulidas todas las rodajas con la lija del núm.800, se tomó una fotografía de cada lado de las rodajas. Junto a estas fotografías se colocó una regla, la cual sirvió para escalar la imagen al momento de usar el programa (figura 2.5).



Figura 2.5. Escalado de imagen

En cada imagen se delimitó posteriormente el área de interés, quedando sólo el área de la rodaja. Ésta se convirtió a una imagen binaria en blanco y negro y se ajustó el nivel de contraste para que resaltaran las partículas que se querían contar (figura 2.6). También se tuvo que especificar el tamaño mínimo de partícula (para este caso de 5 mm), y por último, se especificaron las unidades de medición.



Figura 2.6. Imagen binaria y con ajuste de contraste en color azul

El resultado derivado del programa fue una tabla en Excel® con la cantidad de elementos contados, su área y la fracción que representan respecto al área total de la rodaja. Así, el área utilizada en cada rodaja fue el promedio de ambos lados.

2.4 Área de macroporos

El área de macroporos, A_{MP} (definidos aquí como burbujas atrapadas o huecos), se determinó de manera similar al procedimiento usado para la obtención del área de agregado, con el mismo programa. En esta ocasión, en contraste, el procedimiento utilizado para lograr que resaltaran los poros del concreto fue el siguiente: se colocó carbón pulverizado en cada lado de la rodaja, procurando que éste penetrara en todos los huecos; después cada lado se limpió con un paño húmedo para retirar los excedentes del carbón, y por último, se tomó la foto en escala de grises, con lo que se logró obtener una imagen en la cual resaltaban en color negro los poros de cada rodaja. En la figura 2.7 se puede ver la imagen de una rodaja sin polvo de carbón en sus poros (izquierda) y a un lado la misma con polvo (derecha).



Figura 2.7. Imagen de una rodaja antes (izquierda) y después (derecha) de colocar polvo de carbón

2.5 Porcentaje total de vacíos (%TV)

Una vez obtenidas las áreas de agregado y huecos, las rodajas se dejaron saturando en agua hasta llegar a un peso constante, con lo que se estimó el valor de peso saturado (W_{Sat}). Después, con ayuda de una balanza hidrostática, se obtuvo el peso saturado sumergido (W_{Sat Sum}). Posteriormente, éstas se sometieron a un proceso de secado, colocándolas en un horno a 50 °C hasta lograr un peso constante, con lo que se obtuvo el peso seco (W_{seco}). Con estos valores, y utilizando la ecuación 1, se obtuvo el porcentaje total de vacíos (%TV) de cada rodaja.

$$\% TV = \frac{Wsat - Wseco}{Wsat - Wsat sum} x \ 100 \tag{1}$$

2.6 Absorción capilar

La absorción capilar se realizó siguiendo la metodología de Fagerlund, la cual es base de la normativa sueca que describe la cinética de la absorción capilar de morteros y concretos a través de tres coeficientes: **m** (resistencia a la penetración de agua), **K** (coeficiente de absorción capilar) y $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{EF}}$ (porosidad efectiva).

Para este ensayo, se utilizaron las mismas rodajas empleadas en el porcentaje total de vacíos. Secadas hasta un peso constante, se colocó parafina derretida en la superficie lateral de cada rodaja. Después se sometieron a un proceso de absorción, colocándolas en un recipiente de plástico para el almacenamiento de especímenes. En éste, se colocó una rejilla de acrílico para permitir el libre acceso de agua a la superficie expuesta de los especímenes durante la prueba. Se vertió agua en el recipiente hasta alcanzar un nivel de 3 mm por encima de la parte superior de la rejilla, teniendo cuidado de mantener el nivel del agua durante el ensaye (figura 2.8).



Figura 2.8. Rodajas en proceso de absorción capilar de agua

Posteriormente se midió la masa de cada espécimen ya cubierto de parafina y se registró como masa inicial (W_0), con una precisión de 0.01 g. Conforme se iban pesando se reinstalaban inmediatamente en el recipiente y se continuaba con la medición del tiempo. El cambio de peso (W_t - W_0) por unidad de área expuesta (A_0) del espécimen se registró a intervalos de tiempo de 0.25, 0.5,1, 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48, 72, 96,12, 144, 168 y 192 horas.

Los coeficientes de absorción se calcularon con base en las siguientes ecuaciones:

$$\boldsymbol{m} = \frac{t}{z^2} \left(s/m^2 \right) \tag{2}$$

$$\boldsymbol{k} = \frac{\frac{Wt - Wo}{A_0}}{\sqrt{t}} (kg/m^2 s^{1/2})$$
(3)

$$\varepsilon_{EF} = \frac{k\sqrt{m}}{1000} (\%) \tag{4}$$

A partir de la información anterior, la absorción capilar (S) se calculó como:

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} \left(mm/h^{1/2} \right) \circ \left(m/s^{1/2} \right)$$
(5)

Para efectos de la presente investigación, aunque se estimaron todos los parámetros de absorción de agua del material (ecuaciones 2 a 5), sólo se listarán los resultados de ϵ_{EF} (ecuación 4), mismos que servirán para compararlos con los obtenidos para la REH y %TV de cada rodaja.

3 Resultados

3.1 Resistencia eléctrica (RE) en bulk y rodajas

A continuación, en la tabla 3.1, se presentan las mediciones de RE en *bulk* y de cada una de las rodajas, R1 a la R4, donde R1 es la más externa del núcleo (superficie del elemento estructural de donde se extrajo el núcleo) y R4 es la rodaja más interna del espécimen.

	Resistencia RE en rodajas (KΩ)			% do vorioción			
Núcleo	del <i>bulk</i> (KΩ)	R1	R2	R3	R4	Sumatoria de RE	% de variación respecto al <i>bulk</i>
11	30.3	15.0	7.2	7.3	8.0	37.5	24
20	29.0	9.8	8.0	7.0	7.6	32.4	12
24	25.0	10.1	6.9	5.2	7.1	29.3	17
38	41.0	16.0	9.0	9.6	10.6	45.2	10
50	21.5	6.8	4.8	6.7	4.3	22.6	5
56	38.0	9.9	8.2	8.1	9.2	35.4	-7
63	21.0	6.3	4.3	4.2	6.3	21.0	0
67	28.0	7.3	5.9	6.0	7.2	26.4	-6
106	24.5	7.7	5.5	4.6	5.4	23.2	-5
109	25.0	6.7	4.9	5.2	7.1	23.8	-5
116	32.0	9.0	5.6	5.2	6.4	26.2	-18
136	17.5	5.4	3.5	3.5	4.9	17.3	-1
163	37.0	8.9	6.7	6.7	8.1	30.4	-18
174	34.0	8.3	6.0	6.4	7.6	28.3	-17
207	23.0	7.2	3.9	4.0	4.7	19.7	-14
244	20.0	7.1	6.6	6.1	7.2	27.0	35
252	27.0	7.9	5.3	5.8	6.8	25.8	-4
260	18.0	5.0	3.5	3.7	4.8	17.0	-6
312	28.0	5.3	3.6	3.6	4.7	17.2	-39
317	26.0	7.0	5.2	4.4	5.5	22.0	-15
325	17.0	4.4	3.1	3.3	4.5	15.3	-10
329	20.0	6.0	4.0	3.7	4.6	18.3	-9
332	26.5	9.7	5.0	4.8	7.0	26.4	0
339	20.1	5.5	4.0	4.5	5.7	19.7	-2
388	5.0	1.4	0.7	0.7	1.3	4.1	-19
406	6.0	3.2	1.2	1.1	3.2	8.7	44
410	4.0	1.4	0.7	0.8	1.8	4.7	17

Tabla 3.1 RE (RE_B) en *bulk* y rodajas (RE_R)

3.2 REH y temperatura ambiental

En las tablas 3.2 y 3.3 se muestran los valores de REH del *bulk* (antes de cortarlos en rodajas) y la temperatura del ambiente de todos los núcleos agrupados en series.

SERIE 1	IEN	IP °C		REH (KΩ.c m)			
Día	Min	Med	11	20	24	38	
6	13.2	19.4	26.5	29.5	31.6	37.4	
7	14.2	19.7	27.9	30.9	28.6	42.8	
10	14.5	19.7	26.5	29.5	27.7	37.4	
11	14.2	20.2	25.1	29.5	27.2	38.4	
12	15.5	19.5	24.6	29.5	27.2	38.4	
13	15.1	19.3	25.6	27.5	27.7	42.3	
59	12.1	19.6	31.5	33.4	27.1	45.3	
60	11.6	19.7	25.6	31.5	25.7	43.3	
61	14.6	21.3	29.5	29.5	27.7	41.3	
62	11.2	20.5	25.6	29.5	25.7	39.3	
63	13.5	19.6	23.6	29.5	23.7	27.5	
66	14.7	18.0	23.6	27.5	24.7	39.3	
68	14.8	19.3	23.6	25.6	23.7	37.4	
69	13.0	19.7	23.6	25.6	24.7	34.4	
70	13.8	20.3	23.6	25.6	24.7	34.4	
84	12.0	17.3	33.4	34.4	29.6	40.1	
91	15.4	15.8	31.8	35.2	29.6	46.8	
98	8.2	12.2	31.5	33.4	29.4	44.3	
103	12.0	14.2	32.0	32.4	28.6	45.1	
125	13.3	20.3	37.0	32.0	37.9	44.1	
147	9.1	14.5	39.3	39.5	33.6	44.7	
174	4.7	13.6	48.0	44.6	38.9	61.8	
194	0.5	13.8	43.3	44.2	36.5	59.0	
224	1.1	12.8	41.3	47.2	40.5	66.9	
251	2.9	14.8	42.5	45.2	35.4	57.4	
278	9.5	17.1	35.4	32.4	26.9	41.3	
329	13.1	19.8	26.1	32.4	27.7	39.3	
361	14.4	20.6	25.0	28.0	23.3	37.0	
SERIE 3	TEMP	°c		REH (k	Ω.c m)		
Día	Min	Med	106	109	116	136	
54	13.2	19.4	41 5	37.1	35.0	27.7	
58	13.2	18.6	37.2	31.2	34.2	25.4	
59	12.1	19.6	26.5	29.3	35.0	20.3	
60	11.6	19.7	29.6	29.3	33.0	21.5	
62	11.2	20.5	27.4	31.2	33.2	19.5	
70	13.8	20.3	24.1	26.3	29.4	19.3	
81	12.0	18.1	27.2	29.3	31.5	19.3	
87	13.9	19.8	26.1	27.5	32.9	18.6	
91	15.4	15.8	29.4	31.2	35.0	19.7	
98	8.2	12.2	29.4	31.2	35.2	19.9	
103	12.0	14.2	27.4	31.2	33.0	21.5	
125	13.3	20.3	25.7	28.9	31.7	19.3	
147	9.1	14.5	31.4	33.2	36.9	21.5	
174	4.7	13.6	35.3	39.0	41.8	24.4	
194	0.5	13.8	37.2	40.6	43.2	25.4	
224	1.1	12.8	35.3	37.1	40.8	24.4	
251	2.9	14.8	36.4	37.4	41.6	26.0	
278	9.5	17.1	31.7	34.1	37.9	23.4	
329	13.1	19.8	33.3	35.1	38.9	20.5	
361	14.4	20.6	29.4	33.2	35.0	19.0	

SERIE 2	TEMP	°c		REH (k	Ω.c m)	
Día	Min	Med	50	56	63	67
24	15.6	20.56	25.5	40.9	25.3	31.3
25	14	20.04	27.4	48.7	29.2	37.2
31	13.7	19.19	32.3	37.0	23.4	31.3
33	13.5	18.65	22.5	38.9	26.3	33.2
59	12.1	19.63	25.5	46.7	29.2	37.2
60	11.6	19.73	25.5	42.8	27.3	35.2
61	14.6	21.3	27.4	40.9	29.2	35.2
62	11.2	20.5	23.5	40.9	25.3	33.2
63	13.5	19.6	21.5	37.0	23.4	30.3
66	14.7	18.0	21.5	33.1	21.4	29.3
68	14.8	19.3	21.2	37.0	23.4	29.3
69	13.0	19.7	21.2	33.1	23.4	29.3
70	13.8	20.3	21.5	35.0	22.4	30.3
84	12.0	17.3	25.5	39.7	29.2	39.1
91	15.4	15.8	26.1	48.5	29.0	39.3
98	8.2	12.2	25.5	43.8	29.2	37.0
103	12.0	14.2	25.5	47.1	29.0	38.1
125	13.3	20.3	24.1	45.0	29.0	36.8
147	9.1	14.5	29.4	40.3	33.1	39.7
174	4.7	13.6	33.9	60.1	39.6	49.5
194	0.5	13.8	34.5	58.4	39.0	50.8
224	1.1	12.8	35.3	61.3	40.9	55.7
251	2.9	14.8	30.8	50.4	35.5	46.7
278	9.5	17.1	25.9	40.9	31.2	34.0
329	13.1	19.8	26.6	41.8	32.2	35.6
361	14.4	20.6	25.9	37.0	29.8	33.2

SERIE 4	TEMP	°c	REH (kΩ.c m)				
Día	Min	Med	163	174	207	244	
80	13.4	17.62	41.0	40.4	22.7	25.4	
82	14.1	17.31	39.0	38.6	20.7	23.4	
83	12.9	17.76	39.4	37.3	22.7	23.6	
84	12	17.28	39.0	36.9	21.7	24.4	
91	15.4	15.76	43.5	39.8	22.1	25.2	
98	8.2	12.16	41.0	36.5	21.7	23.6	
103	12.0	14.2	37.5	35.5	23.3	25.8	
125	13.3	20.3	39.0	36.9	21.7	23.4	
147	9.1	14.5	39.3	38.8	24.6	26.0	
174	4.7	13.6	50.6	44.6	28.0	30.4	
194	0.5	13.8	52.5	38.6	29.6	31.2	
224	1.1	12.8	48.8	44.6	29.6	29.3	
251	2.9	14.8	56.6	52.4	33.5	31.2	
276	5.3	17.4	58.6	53.0	33.1	31.6	
329	13.1	19.8	57.6	53.0	28.2	31.8	
361	14.4	20.6	53.1	48.1	27.0	28.9	
SERIE 5	TEMP	°c	REH(k Ω.c m)				
---------	------	-------	---------------------	------	------	------	--
Día	Min	Med	252	260	312	317	
84	12	17.28	42.3	33.0	36.0	42.9	
85	14.1	18.79	47.9	31.3	37.0	44.4	
86	14.5	19.39	43.7	32.7	36.8	44.8	
153	12.4	17.48	36.6	25.3	27.3	33.1	
154	13.7	16.34	38.7	29.2	31.2	39.0	
161	10.6	13.49	37.1	30.5	28.0	41.5	
174	4.7	13.6	40.4	29.2	32.1	39.0	
194	0.5	13.8	43.3	30.7	33.9	42.5	
224	1.1	12.8	38.5	29.2	33.1	37.0	
251	2.9	14.8	40.0	29.0	32.5	39.2	
273	11.2	14.5	34.6	25.7	28.4	33.7	
329	13.1	19.8	35.2	26.2	29.2	34.3	
361	14.4	20.6	33.7	23.9	26.5	32.1	

SERIE 6	TEMP	°c	REH (k Ω.c m)			
Día	Min	Med	325	329	332	339
172	3.5	13.3	19.9	24.9	31.5	21.9
173	3.3	12.7	16.4	19.4	21.7	16.7
174	4.7	13.6	17	21	27	17.2
178	6.6	15.1	16	19	24	16
181	7.0	15.6	15.7	13.5	23.8	15.4
194	0.5	13.8	16	17.5	21	16
224	1.1	12.8	16	17	21	15
251	2.9	14.8	17	18	22.5	15.5
276	5.3	17.4	17.5	19	23.5	16
329	13.1	19.8	17.7	18.2	22.1	15.5
361	14.4	20.6	15	17.2	21.6	15

SERIE 7	TEMP	°c	RE	Η (k Ω.c	m)
Día	Min	Med	388	406	410
44	11.4	18.6	2.5	6.2	3.3
47	14.3	18.9	2.9	7.0	4.1
51	12.5	19.0	3.3	7.4	4.3
54	13.2	19.4	4.4	9.2	5.5
58	13.2	18.6	4.8	9.2	5.9
62	11.2	20.5	4.6	8.8	5.7
65	16.4	19.0	4.4	8.2	5.3
67	16.3	19.6	4.8	9.0	6.1
69	13.0	19.7	4.8	9.6	6.1
72	12.0	19.7	4.3	8.6	5.7
79	12.6	17.7	4.3	8.4	5.3
80	13.4	17.6	4.3	8.6	5.5
82	14.1	17.3	4.4	9.2	5.9
86	14.5	19.4	4.3	8.8	5.5

En estas tablas se muestran los días en que se tomaron las mediciones de REH (primera columna); en las columnas dos y tres se muestran las temperaturas mínima y media (promedio) que correspondieron a los días en que se tomaron las mediciones de REH; las siguientes columnas (tres a cuatro columnas, dependiendo del número de especímenes evaluados) muestran los valores de la REH obtenidos en cada espécimen evaluado (núcleo cortado para obtener el espécimen RV).

3.3 RE, REH, %TV, ε_{EF} , áreas de agregado (A_{AG}) y áreas de macroporos (A_{MP})

En las tablas 3.4 y 3.5 se muestran los resultados experimentales obtenidos con cada una de las rodajas evaluadas, divididas por serie.

Carla	Núslaa	Dedeie		REH	9/ T \/		Area de a	gregado	Area d	e M.poros
Serie	Nucleo	NUUdja	KE(K 32)	(KΩcm)	70 I V	Ee (%)	mm ²	%	mm ²	%
		1	15.0	117.8	10.0	5.3	272.9	17.4	26.9	1.4
	11	2	7.2	61.5	11.4	5.4	357.6	19.3	28.4	1.4
		3	7.3	63.7	10.1	4.4	386.5	20.7	28.2	1.4
		4	8.0	68.3	9.3	4.9	384.8	20.5	18.2	0.9
		1	9.8	83.2	10.0	6.8	65.1	3.5	20.9	1.1
	20	2	8.0	59.7	9.4	5.0	183.2	9.7	45.2	2.3
		4	7.6	62.2	9.9	6.1	254.6	13.5	27.8	1.4
1		1	10.1	86.2	10.0	6.9	302.8	15.9	14.7	0.7
	24	2	6.9	58.9	9.7	6.6	364.2	19.4	13.0	0.7
	24	3	5.2	45.4	9.7	6.4	277.7	14.8	16.7	0.9
		4	7.1	58.3	10.4	6.1	218.8	11.6	18.0	0.9
		1	16.0	120.8	8.6	3.6	277.6	14.4	7.2	0.4
	38	2	9.0	88.3	9.4	3.7	356.7	20.5	9.5	0.5
		3	9.6	85.6	9.5	4.0	390.9	20.7	7.1	0.4
		4	10.6	80.0	8.9	4.1	420.0	23.7	8.1	0.4
		2	0.0	38.0	9.5	4.1	360.6	10.5	13.7	0.4
	50	3	6.7	54.8	9.3 8.4	3.3	387.2	20.4	21.9	0.7
		4	4 3	36.7	10.4	4.5	300.1	15.4	9.8	0.5
		1	9.9	84.5	9.6	6.5	450.5	23.9	33.9	1.7
	5.0	2	8.2	70.0	9.8	4.4	450.4	23.8	29.5	1.5
	56	3	8.1	70.7	9.1	4.4	441.6	23.4	16.7	0.8
2		4	9.2	78.1	8.5	4.9	435.5	23.3	26.8	1.4
2		1	6.3	53.3	10.3	6.1	480.2	25.0	9.8	0.5
	63	2	4.3	35.2	10.2	5.4	331.4	17.3	30.5	1.6
		3	4.2	33.9	12.1	7.5	411.8	21.2	8.1	0.4
		4	6.3	49.1	11.5	5.9	433.6	22.2	9.5	0.5
		2	7.5	50.4	9.1	2.5	320.5	25.0	6.1	0.3
	67	3	6.0	52.3	10.3	5.1	342.3	17.1	4.1	0.2
		4	7.2	61.5	9.8	4.9	422.8	21.6	3.8	0.2
		1	7.7	65.7	10.1	4.1	226.0	11.6	11.6	0.6
	106	2	5.5	46.9	10.8	4.0	249.7	12.7	7.4	0.4
	100	3	4.6	40.1	9.6	4.1	245.1	12.6	6.7	0.3
		4	5.4	46.1	9.9	3.8	320.0	16.3	4.7	0.2
		1	6./	59.3	9.8	3.4	492.9	25.3	13.8	0.7
	109	2	4.9	41.4	9.0	3.0	474.3	24.3	14.9	0.8
-		4	7.1	55.7	9.0	4.2	440.8	23.1	8.6	0.0
3		1	9.0	76.8	9.2	3.9	503.8	25.7	15.2	0.8
	110	2	5.6	47.8	8.5	4.1	564.9	28.9	6.8	0.3
	116	3	5.2	45.4	10.3	5.0	357.1	18.3	9.7	0.5
		4	6.4	54.6	10.4	5.1	407.2	20.8	16.1	0.8
		1	5.4	46.1	10.1	6.0	535.3	27.9	12.7	0.6
	136	2	3.5	29.9	9.8	4.0	450.7	23.9	20.2	1.0
		3	3.5	29.9	9.0	4.3	551.0	29.2	25.0	1.3
		4	8.9	76.0	10.7	6.3	595.9	30.4	21.5	0.4
		2	6.7	58.5	10.3	6.2	409.1	21.1	3.5	0.2
	163	3	6.7	57.2	10.3	5.1	490.7	25.1	26.4	1.3
		4	8.1	69.1	12.1	5.5	592.2	30.3	8.5	0.4
		1	8.3	70.8	8.9	4.6	527.1	27.4	11.2	0.6
	174	2	6.0	51.2	10.5	4.7	532.6	26.8	9.2	0.5
		3	6.4	54.6	9.8	4.7	491.8	25.3	13.5	0.7
4		4	7.6	62.2	10.8	4.1	407.5	21.0	8.1	0.4
-		2	7.2	32 0	10.0	4.5 4 0	407.0	20.9	27.6	0.7
	207	3	4.0	34.9	10.0	49	493.6	26.5	16.4	0.8
		4	4.7	38.0	9.5	6.0	400.4	21.6	27.7	1.4
		1	7.1	30.2	11.1	4.7	343.6	17.5	4.8	0.2
	244	2	6.6	56.3	11.4	4.9	222.0	11.3	11.4	0.6
	244	3	6.1	53.2	12.0	6.4	428.4	21.9	7.2	0.4
		4	7.2	61.5	11.4	5.1	461.9	23.4	6.4	0.3

Tabla 3.4 Valores obtenidos en cada rodaja, series 1 a 4

Area de agregado	Area de poros	os
Serie Nucleo Rodaja RE (K Ω) (KQ.cm) %TV $\mathbf{\mathcal{E}}e$ (%) mm ² %	mm ² %	%
	12.1 0.6	.6
	9.4 0.5	.5
252 3 5.8 49.5 10.2 5.8 505.9 27.1	9.5 0.5	.5
4 6.8 53.4 10.8 5.7 458.4 23.9	11.2 0.6	.6
1 5.0 40.9 11.1 19.7 485.2 25.6	13.4 0.7	.7
2 3.5 29.9 9.8 7.4 425.8 22.8	16.5 0.8	.8
260 3 3.7 32.3 10.8 5.7 620.1 28.0	11.6 0.6	.6
- 4 4.8 41.0 10.4 9.1 446.5 23.8	21.6 1.1	.1
5 1 5.3 44.8 11.2 6.9 512.7 26.0	12.9 0.7	.7
212 2 3.6 30.7 11.9 6.1 348.6 18.0	8.3 0.4	.4
312 3 3.6 31.4 11.4 5.0 320.4 16.3	7.8 0.4	.4
4 4.7 38.4 11.5 5.4 317.1 16.0	3.7 0.2	.2
1 7.0 59.7 11.1 4.0 385.1 19.6	19.1 1.0	.0
217 2 5.2 44.0 9.8 4.6 315.3 15.9	17.0 0.9	.9
317 <u>3 4.4 38.0 10.8 4.3 263.2 13.4</u>	40.7 2.1	.1
<u>4 5.5 46.9 10.4 4.6 252.7 12.8</u>	28.6 1.5	.5
<u>1</u> <u>4.4</u> <u>34.2</u> <u>11.2</u> <u>5.7</u> <u>569.7</u> <u>29.6</u>	15.8 0.8	.8
325 2 3.1 27.7 11.9 6.9 509.6 26.8	21.7 1.1	.1
<u>3 3.3 28.2 11.4 6.8 489.9 25.8</u>	12.4 0.6	.6
<u>4 4.5 26.8 11.5 5.9 537.5 28.1</u>	14.4 0.7	.7
<u>1 6.0 51.2 10.1 5.5 431.9 22.0</u>	11.0 0.6	.6
329 2 4.0 34.1 10.8 5.6 314.7 16.0	4.9 0.2	.2
<u>3</u> <u>3.7</u> <u>33.0</u> <u>9.7</u> <u>4.1</u> <u>315.1</u> <u>16.3</u>	13.6 0.7	.7
6 4 4.6 39.3 9.7 4.5 373.1 19.4	9.1 0.5	.5
<u>1 9.7 82.8 9.4 3.8 402.8 21.5</u>	15.0 0.8	.8
332 2 5.0 42.7 10.6 2.9 396.5 20.5	15.5 0.8	.8
<u>3 4.8 37.3 10.5 2.7 329.1 17.3</u>	27.3 1.4	.4
4 7.0 56.8 9.9 3.5 463.1 24.5	20.4 1.0	.0
<u>1 5.5 46.9 12.4 6.3 269.8 14.0</u>	8.0 0.4	.4
339 2 4.0 32.7 10.3 5.3 335.9 17.2	14.3 0.7	./
3 4.5 38.4 10.8 4.4 27.2 14.3	9.7 0.5	.5
4 5./ 40.6 12.0 5.5 350.6 17.9	15.4 0.8	.ŏ o
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	30.3 1.8	.8
$388 \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	20.0 1.4	.4
	41.0 2.1	.1
	45.5 2.2	.2
- 1 3.2 20.3 13.0 10.0	34.8 1.9	<u>.u</u> 8
7 406 $\frac{2}{3}$ 11 100 155 132 SIN DATOS	37.3 1.6	6
	271 1/	. <u>.</u> 4
	AA 3 2 2	3
1 1.7 11.0 22.0 15.5 50.5 10.0	25.6 1.3	3
410 2 0.7 0.4 21.0 17.3 302.7 13.4	45.7 2.2	3
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	26.7 1.4	.5

Tabla 3.5 Valores obtenidos en cada rodaja, series 5 a 7

Estas tablas muestran, en la primera columna el número de la serie del espécimen; la segunda columna el número del núcleo de donde se preparó el espécimen RV para mediciones de REH; la columna tres presenta el número de cada una de las rodajas (de la R1 a la R4); las columnas 4 a 7 muestran los valores medidos de los indicadores de durabilidad usados en esta investigación: RE, REH, %TV y ϵ_{EF} , respectivamente. Por último, las columnas 8-9 y 10-11 muestran los valores obtenidos de A_{AG} y A_{MP}, respectivamente, de cada rodaja evaluada.

En la tabla 3.5, se puede observar que en la serie 7 no se pudieron obtener algunos datos de A_{AG} debido a que éstos no se distinguían por tener un color similar a la pasta de cemento, y el software no pudo detectar diferencias.

4 Análisis de resultados

Teniendo los resultados de las pruebas a las rodajas de los 27 núcleos, se analizó la información para encontrar posibles correlaciones empíricas de los diferentes parámetros e indicadores de durabilidad.

4.1 RE en "bulk" y rodajas

En la figura 4.1 se muestra la RE de un núcleo en *bulk* (RE_B, barra azul) y de cada rodaja (barras rojas) y la sumatoria de éstas (barra roja a la derecha, ΣRE_R). Al comparar estos valores, se observa la RE_B ΣRE_R . También se observa que la rodaja 1 (R1) presenta un mayor valor que los tres restantes. Esto se repitió en casi todos los especímenes RV evaluados.



Figura 4.1. RE en *bulk* y rodajas

El hecho de que la primera rodaja de cada núcleo presente un valor de RE mayor que las otras tres puede deberse a las diferencias entre contenidos de agregado, ya que la rodaja R1, al ser del lado exterior del núcleo, tiene menor agregado grueso y mayor pasta de cemento que las otras rodajas más internas.

En la figura 4.2 se muestra la comparativa entre RE_B y la Σ RE_R en todos los núcleos. Se observa que, de los 27 núcleos, ocho presentaron RE_B < Σ RE_R, con valores entre 5% hasta 44% menores. En 17 núcleos, se registró una RE_B > Σ RE_R, con valores de entre 1% hasta 39% mayores. En los núcleos núm. 63 y núm. 332, se registró una RE_B ~ Σ RE_R.



Figura 4.2 RE en *bulk* (RE_B) y sumatoria de rodajas (ΣRE_R)

La diferencia de RE en un núcleo muestra la variabilidad entre los concretos usados para la fabricación de las trabes prefabricadas o presforzadas y losas de la obra en evaluación.

Al hacer este ejercicio, se observó que hay más variación entre las RE_B de cada serie, que la obtenida de la ΣRE_R . Esta desigualdad en resistencias puede deberse a la pérdida de longitud y homogeneidad del concreto al cortar el *bulk* en rodajas. Otro factor puede ser que la sumatoria de las longitudes de las rodajas no alcanza los 10 cm originales del bulk, sino 9 cm, debido al material perdido por los cortes.

En la figura 4.3 se muestra una gráfica comparativa entre los valores RE_B y Σ RE_R, junto con la ecuación de la línea de tendencia y su regresión. En ella se puede observar que la pendiente corresponde a un valor de ~ 0.90, lo que implica que existe una diferencia entre ambos valores de un 10%. También se observa que el coeficiente de regresión (R2) es alto, 0.82, por lo cual se considera muy buena correlación entre ambos valores.



Figura 4.3. Correlación empírica entre RE_B vs ΣRE_R

4.2 REH vs temperatura ambiental

En las figuras 4.4 y 4.5 se muestran los valores de REH vs temperatura mínima y media de los 27 núcleos agrupados por serie. Se observa que, con excepción de la serie 7, la cual fue evaluada en los meses de julio a septiembre de 2017, todas las demás presentan un aumento en la REH del día 150 al 280, debido a que en esas fechas se presentaron bajas temperaturas en Querétaro, principalmente a fines de noviembre de 2016 y principios de marzo de 2017.

Utilizando estos registros de REH y temperatura, se establecieron correlaciones entre sí usando las temperaturas mínima y media de la estación climática Agrique del INIFAP (Torres Acosta *et al.*, 2018b). Los resultados promedio de los coeficientes de correlación, para cada serie, se muestran en la tabla 4.1.



4



Figura 4.5 Valores de REH con temperatura mínima y media en las series 5 a 7

Tabla 4.1 Resultados de correlaciones entre REH y temperaturas mínimas ymedia, series 1 a 7

	Temp. mínima	Temp. media						
Serie	R ² (promedio)	R ² (promedio)						
1	0.54	0.52						
2	0.55	0.42						
3	0.23	0.23						
4	0.26	0.02						
5	0.04	0.01						
6	0.01	0.08						
7	0.08	0.02						

Se puede observar que la mejor correlación se presentó en la serie 1, con valores de 0.54 y 0.52 para las temperaturas mínima y media, respectivamente. En la figura 4.6 se observan dichas correlaciones y en el **anexo 1** se muestran las realizadas a las series 2 a 7.



Figura 4.6 Correlaciones empíricas entre REH vs temperatura mínima (a) y media (b), serie 1

4.2.1 Corrección de la medida de resistividad por efecto de la temperatura

Para corregir la variación en las mediciones de resistividad por efecto de la temperatura, se utilizó la ecuación de aproximación de Arrhenius, que se presenta a continuación en la ecuación (6), y utilizada esta aproximación en una investigación previa (Torres Acosta *et al.*, 2018b):

$$\rho_{t-ref} = \rho_t * exp\left[\frac{E_{A-Cond}}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{Ref}}\right)\right]$$
(6)

Donde:

- ρ t-ref Resistividad a la temperatura de referencia (Ohm-m)
- ρ_t Resistividad a la temperatura de prueba (Ohm-m)
- E A-Cond Energía de activación por conducción
- **R** Constante universal de gas [8.314J/(mol-K)]
- T Temperatura de la prueba (°K)
- *T_{Ref}* Temperatura de referencia a 23 °C (296.15 °K)

Para obtener el valor de la energía de activación por conducción de Arrenhius (E_{A-Cond}), expresada en la ecuación (6), se calculó el valor de la pendiente que resulta del gráfico obtenido del logaritmo natural de la REH (en unidades de Ω -m) en el eje de las ordenadas y la inversa de la temperatura (en grados Kelvin, 1/°K) en el eje de las abscisas. Multiplicando la pendiente por el valor negativo de la constante universal de gas [-8.314 J/(mol-K)] se obtiene el valor de E_{A-Cond}. Una vez obtenidos los valores de E_{A-Cond}, se sustituyeron éstos en la ecuación (6) y se obtiene la resistividad corregida (ρ_{t-ref}). El procedimiento a detalle se describe a continuación, utilizando los datos de la serie 1, correspondiente a los núcleos 11, 20, 24 y 38. Se procedió de manera similar para las demás series.

El primer paso fue convertir los valores de REH a unidades de Ohm-metro (Ω-m) y de éstos se obtuvo el logaritmo natural (In). Luego, los valores de temperatura se convirtieron a grados kelvin (°K) para obtener la inversa de temperatura, como se observa en la tabla 4.2.

alliplelital (N					
	REH (REH (Ω. m)			In de	REH		Tempe (°Kel	ratura vin)	1/T(°K	elvin)
11	20	24	38	11	20	24	38	Mínima	Media	Mínima	Media
265.4	294.9	316.0	373.8	5.58	5.69	5.76	5.92	286.4	292.6	0.00349	0.00342
279.2	308.7	286.4	427.9	5.63	5.73	5.66	6.06	287.4	292.9	0.00348	0.00341
265.4	294.9	276.5	373.8	5.58	5.69	5.62	5.92	287.7	292.8	0.00348	0.00341
250.7	294.9	271.6	383.6	5.52	5.69	5.60	5.95	287.4	293.4	0.00348	0.00341
245.7	294.9	271.6	383.6	5.50	5.69	5.60	5.95	288.7	292.6	0.00346	0.00342
255.6	275.3	276.5	423.0	5.54	5.62	5.62	6.05	288.3	292.5	0.00347	0.00342
314.6	334.3	270.6	452.5	5.75	5.81	5.60	6.11	285.3	292.8	0.00351	0.00342
255.6	314.6	256.8	432.8	5.54	5.75	5.55	6.07	284.8	292.9	0.00351	0.00341
294.9	294.9	276.5	413.2	5.69	5.69	5.62	6.02	287.8	294.4	0.00348	0.00340
255.6	294.9	256.8	393.5	5.54	5.69	5.55	5.98	284.4	293.7	0.00352	0.00340
235.9	294.9	237.0	275.4	5.46	5.69	5.47	5.62	286.7	292.8	0.00349	0.00342
235.9	275.3	246.9	393.5	5.46	5.62	5.51	5.98	287.9	291.1	0.00347	0.00344
235.9	255.6	237.0	373.8	5.46	5.54	5.47	5.92	288.0	292.4	0.00347	0.00342
235.9	255.6	246.9	344.3	5.46	5.54	5.51	5.84	286.2	292.9	0.00349	0.00341
235.9	255.6	246.9	344.3	5.46	5.54	5.51	5.84	287.0	293.4	0.00348	0.00341
334.2	344.1	296.3	401.2	5.81	5.84	5.69	5.99	285.2	290.4	0.00351	0.00344
318.5	352.0	296.3	468.2	5.76	5.86	5.69	6.15	288.6	288.9	0.00347	0.00346
314.6	334.3	294.3	442.7	5.75	5.81	5.68	6.09	281.4	285.3	0.00355	0.00350
320.5	324.4	286.4	450.5	5.77	5.78	5.66	6.11	285.2	287.3	0.00351	0.00348
369.6	320.5	379.2	440.7	5.91	5.77	5.94	6.09	286.5	293.5	0.00349	0.00341
393.2	395.2	335.8	446.6	5.97	5.98	5.82	6.10	282.3	287.7	0.00354	0.00348
479.7	446.3	389.1	617.8	6.17	6.10	5.96	6.43	277.9	286.7	0.00360	0.00349
432.5	442.4	365.4	590.2	6.07	6.09	5.90	6.38	273.7	287.0	0.00365	0.00348
412.9	471.9	404.9	668.9	6.02	6.16	6.00	6.51	274.3	286.0	0.00365	0.00350
424.7	452.2	353.5	574.5	6.05	6.11	5.87	6.35	276.1	287.9	0.00362	0.00347
353.9	324.4	268.6	413.2	5.87	5.78	5.59	6.02	282.7	290.3	0.00354	0.00345
261.5	324.4	276.5	393.5	5.57	5.78	5.62	5.98	286.3	293.0	0.00349	0.00341
250.0	280.0	233.1	370.0	5.52	5.63	5.45	5.91	287.6	293.8	0.00348	0.00340

 Tabla 4.2 Valores de REH (Ω.m), logaritmo natural (In) y temperatura ambiental (°K)

Ordenando los valores de menor a mayor, se graficó el logaritmo natural de la REH en el eje de las ordenadas y la inversa de la temperatura en el eje de las abscisas. Se agregó la línea de tendencia y su ecuación a las cuatro gráficas, como se puede observar en la figura 4.7. El valor de la pendiente de cada recta multiplicada por el valor negativo de la constante universal de gas [-8.314 J/(mol-K)] determinó el valor de la energía de activación por conducción (E_{A-Cond}) que, al sustituirlo en la ecuación (6) de Arrhenius (para cada núcleo y cada temperatura), permitió obtener los valores de resistividad corregidos (ρ_{t-ref}), que se muestran en la tabla 4.3 (en ésta únicamente se presentan los valores de la serie 1 utilizando la temperatura mínima).





Tabla 4.3 Valores de la pendiente, E A-Cond, y REH corregida de la serie 1,
calculados con temperatura mínima

	11				20				24	Ļ			38		
Pendiente	EAc	Ρt	-ref	Pendiente	EAc	Ρt	-ref	Pendiente	EAc	ρt·	-ref	Pendiente	EAc	Ρt	-ref
(J/mol-K	Ω.cm	KΩ.cm	I ((J/mol-K	Ω.cm	KΩ.cm	(J/mol-K	Ω.cm	KΩ.cm	(J/mol-K	Ω.cm	KΩ.cm
		171.0	17.1			206.0	20.6			229.2	22.9			261.0	26.1
		188.3	18.8			223.8	22.4			214.8	21.5			310.2	31.0
		181.5	18.1			216.3	21.6			209.5	20.9			274.0	27.4
		169.1	16.9			213.8	21.4			203.7	20.4			278.1	27.8
		175.9	17.6			224.4	22.4			212.7	21.3			291.9	29.2
		179.6	18.0			206.4	20.6			213.7	21.4			317.1	31.7
		192.6	19.3			223.9	22.4			189.1	18.9			303.0	30.3
		152.9	15.3			206.8	20.7			176.4	17.6			284.4	28.4
		202.6	20.3			217.1	21.7			210.2	21.0			304.0	30.4
		150.0	15.0			190.9	19.1			174.0	17.4			254.6	25.5
		154.1	15.4			208.3	20.8	1		173.6	17.4		-25702	194.5	19.4
		162.8	16.3			203.3	20.3			188.3	18.8			290.6	29.1
		163.6	16.4			189.5	19.0			181.4	18.1			277.1	27.7
2704	21/60	150.6	15.1	2020	25695	177.2	17.7	2764	22000	177.8	17.8	2001		238.6	23.9
3764	-31436	156.2	15.6	3085	-23065	182.6	18.3	2704	-22960	182.7	18.3	3091	-23702	245.9	24.6
		203.7	20.4			229.6	23.0			206.3	20.6			267.6	26.8
		226.9	22.7			266.9	26.7			231.3	23.1			355.0	35.5
		160.2	16.0			192.7	19.3			179.8	18.0			255.1	25.5
		195.3	19.5			216.5	21.6			199.4	19.9	1		300.6	30.1
		239.2	23.9			224.7	22.5			275.9	27.6	1		308.8	30.9
		209.1	20.9			236.0	23.6			211.6	21.2			266.5	26.7
		206.3	20.6			224.1	22.4			210.0	21.0			310.0	31.0
		150.9	15.1			187.2	18.7	•		169.3	16.9	1		249.7	25.0
		148.5	14.8	1		204.7	20.5			191.8	19.2	1		290.0	29.0
		167.1	16.7	1		211.2	21.1			178.9	17.9	1		268.1	26.8
		191.8	19.2	1		196.7	19.7	•		171.7	17.2	1		250.4	25.0
		167.7	16.8	1		225.7	22.6	•		199.9	20.0	1		273.7	27.4
		170.2	17.0			204.5	20.5			176.0	17.6	1		270.2	27.0

De manera similar, se procedió para cada serie y ambas temperaturas. En la tabla 4.4 se muestran los valores de la pendiente y energía de activación (E_{A-Cond}) de cada núcleo.

	Mature	T mín	ima	T media			
Corio	NUM.		EAc		EAc		
Serie	de núcleo	Pendiente	(J/mol- K)	Pendiente	(J/mol- K)		
	11	3783.7	-31457.7	6382.8	-53066.6		
4	20	3089.4	-25685.3	4955.1	-41196.7		
•	24	2764.0	-22979.9	4549.9	-37827.9		
	38	3091.4	-25701.9	5154.2	-42852.0		
	50	2590.3	-31457.7	4190.9	-34843.1		
2	56	2917.3	-24254.4	4728.0	-39308.6		
2	63	2958.8	-24599.5	4750.7	-39497.3		
	67	3075.7	-25571.4	4815.0	-40031.9		
	106	2443.9	-20318.6	4119.6	-34250.4		
2	109	1952.0	-16228.9	3246.9	-26994.7		
3	116	1756.2	-14601.0	2800.5	-23283.4		
	136	2063.2	-17153.4	3448.1	-28667.5		
	163	2501.7	-20799.1	4851.7	-40337.0		
4	174	2184.2	-18159.4	4081.0	-33929.4		
4	207	2462.9	-20476.6	4821.3	-40084.3		
	244	1811.0	-15056.7	3631.7	-30194.0		
	252	1422.4	-11825.8	1422.4	-11825.8		
5	260	1271.9	-10574.6	1271.9	-10574.6		
3	312	1554.0	-12920.0	1554.0	-12920.0		
	317	1499.5	-12466.8	1499.5	-12466.8		
	325	1124.1	-9345.8	1878.7	-15619.5		
6	329	2313.3	-19232.8	3868.0	-32158.6		
U	332	1657.9	-13783.8	2722.4	-22634.0		
	339	1265.0	-10517.2	2032.9	-16901.5		
	388	9667.9	-80378.9	15123.0	-125732.6		
7	406	5876.1	-48853.9	9499.8	-78981.3		
	410	8272.0	-68773.4	13209.0	-109819.6		

Tabla 4.4 Valores de la pendiente y E_{A-Cond} obtenidos para cada núcleo

En este caso, lo que se busca es que los valores de REH corregidos varíen lo menos posible, independientemente de la temperatura de prueba, lo cual se observa en las ecuaciones de las líneas de tendencia con valores de pendientes (*m*) cercanos a cero. Esto se puede observar en las gráficas de la figura 4.8, que muestran las correlaciones de la serie 1 con temperaturas mínima y media. Se observa que la correlación con temperatura mínima ejemplifica mejor que la fórmula de aproximación de Arrhenius, ya que presenta los valores promedio de *m* más bajos. Los resultados promedio por serie se muestran en la tabla 4.5.



Figura 4.8 Valores de REH vs temperatura mínima (a) y media (b) de la serie 1, corregidos con la fórmula de Arrhenius

Tabla 4.5 Resultados promedio de correlaciones entre REH corregida y
temperatura mínima y media para cada serie

	Temp.	mínima	Temp. media			
Serie	т	R²	т	R²		
1	0.09	0.05	0.33	0.09		
2	0.20	0.06	0.42	0.13		
3	0.18	0.12	0.38	0.15		
4	0.33	0.19	1.41	0.46		
5	0.42	0.34	0.40	0.09		
6	0.20	0.25	0.30	0.26		
7	0.24	0.49	0.57	0.56		

Como puede observarse en la figura 4.8, los valores de REH corregidos por temperatura (ρ_{t-ref}) muestran una línea casi horizontal, lo cual se aprecia mejor con la temperatura mínima (valores de la pendiente de x entre 0.085 - 0.172 para temperaturas mínimas; 0.217 – 0.397 para temperaturas medias). En el **anexo 2,** se muestran las gráficas de correlaciones entre REH corregida y temperaturas, así

como una tabla resumen con los valores de la pendiente (*m*) y R^2 de todos los núcleos.

Cabe aclarar que la variación de las temperaturas durante las fechas de medición de la REH para los especímenes RV evaluados no fueron muy marcadas: las mínimas variaron de 1 a 16 °C (Δ t de 15 °C); las medias variaron de 12 a 21 °C (Δ t de 9 °C). Este rango Δ t pudo no haber sido suficiente para modificar la REH, como lo observado en una investigación anterior (Torres Acosta *et al.*, 2018b). También el hecho de que los valores de REH, en su mayoría, fueran bajos (< 50 k Ω -cm) demuestra que el efecto de los cambios en las temperaturas del ambiente durante su medición no es importante, lo que corrobora los hallazgos de investigaciones anteriores (Torres Acosta *et al.*, 2018b).

4.3 Valores acumulados de REH en rodajas

Se presenta la gráfica de acumulados para la prueba de REH aplicada a las cuatro rodajas de todos los núcleos. En la figura 4.9, se puede observar el comportamiento de los resultados obtenidos. Destacan, en color gris, los valores para la R1, donde se tienen los mayores valores de REH que las demás rodajas. Los valores de R4 son los que le siguen a los de R1, y se observa que las rodajas R2 y R3 presentan valores muy similares.





4.4 Valores acumulados de A_{AG}

En la figura 4.10 se presenta la gráfica de acumulados de los valores de A_{AG} para las cuatro rodajas de todos los núcleos evaluados. Como puede observarse en esta figura, no se encontraron diferencias marcadas de A_{AG} entre las rodajas R2 y R4, lo que demuestra que el agregado grueso se dispersó de manera uniforme a estas profundidades de las trabes. Destaca que las R1 poseen una A_{AG} menor que las otras tres rodajas, y dos de ellas como dos de R2 tienen áreas menores que 100 mm². Las demás presentan valores que van de 180 a 600 mm².

Es importante aclarar que la R1 corresponde a la rodaja más extrema que, por condiciones de fabricación de elementos verticales de concreto (principalmente por el contacto con la cimbra y el vibrado de los elementos), es, por lo regular, la que posee menos agregado grueso, por lo que se conoce como el efecto piel del concreto. Esta región, al tener poco agregado grueso, es la más uniforme, ya que está formada principalmente por pasta de cemento o mortero (pasta de cemento con agregado fino), además de ser la más densa, propiedad que se puede corroborar con los valores de REH en la figura 4.9, los cuales fueron los mayores de todas las rodajas evaluadas.



Figura 4.10 Gráfica de valores acumulados de AAG por rodaja

4.5 Valores acumulados de A_{MP}

En la figura 4.11 se presenta la gráfica de acumulados de A_{MP} para las cuatro rodajas de todos los núcleos evaluados. Se tuvieron áreas muy similares en las cuatro rodajas, por lo que aparentemente los macroporos a lo largo del espécimen de concreto estuvieron repartidos uniformemente. El 90% de estos valores obtenidos fueron entre 4 y 30 mm²; el 10% restante, entre 32 y 47 mm².

De nuevo se observa que los valores de A_{MP} de la R1estuvieron entre los menores de las cuatro rodajas, lo que implica de nueva cuenta que esta capa, que corresponde a la piel del concreto, es la más densa de las cuatro rodajas evaluadas.





4.6 Porcentaje total de vacíos (%TV)

La figura 4.12 muestra los valores acumulados de %TV de todas las rodajas. Se observa que el 88% de todas las rodajas presentaron valores muy similares, con porcentaje de vacíos de 10 ± 2 %. No se observó diferencia alguna entre las cuatro rodajas, por lo que los valores del efecto piel de la R1 no se diferenciaron de los de las otras tres rodajas. Se observa que no hay diferencia entre los valores de la R1 con respecto a las otras rodajas, en contraste con lo obtenido de A_{AG} y A_{MP}:

4.7 Porosidad efectiva (ε_{EF})

La figura 4.13 muestra los valores acumulados de porosidad efectiva de todas las rodajas. Se observa que el 85% de todas las rodajas presentaron valores muy similares, con porosidad efectiva de 5±3%. Al igual que el parámetro %TV, tampoco se encontró diferencia alguna entre las cuatro rodajas, aunque la R1 presentara valores menores de A_{AG} y A_{MP} .



Figura 4.12 Gráfica de valores acumulados de %TV por rodaja



Figura 4.13 Gráfica de valores acumulados de εεF

4.8 REH vs %TV

La figura 4.14 muestra los resultados obtenidos de REH y %TV. Aquí se puede observar una variación de consideración en ambos indicadores de durabilidad: 5

 $k\Omega$ -cm < REH < 120 $k\Omega$ -cm y 4% < %TV% < 27%. Estas variaciones obedecen a las diferencias de los concretos usados en las trabes prefabricadas o presforzadas y las losas: en trabes la relación agua/cemento fue de 0.32 y en losas fue de 0.40; en trabes se usó 8% de microsílica.



Figura 4.14 Correlación empírica entre REH y % TV

En la figura 4.14 se puede observar un cambio radical en los valores de REH de los núcleos extraídos en la losa, siendo éstos los puntos por debajo de 10 k Ω -cm, que muestran valores de %TV entre 14 y 22%. Los valores obtenidos de los núcleos extraídos de las trabes, en cambio, mostraron valores de REH y %TV muy similares entre sí, lo cual demuestra que el control de calidad utilizado en la fabricación de las trabes fue mejor que en la losa de esta obra. Se observa que la correlación entre estos dos indicadores de durabilidad REH y %TV fue aceptable e igual a 0.71.

4.9 **REH vs ε**_{EF}

La figura 4.15 muestra los resultados obtenidos de REH y ϵ_{EF} . De nuevo, se alcanza a apreciar que existe una marcada diferencia entre los núcleos extraídos de las trabes (series 1 a la 6) y los extraídos de la losa (serie 7). Se observa una correlación adecuada entre estos dos indicadores, ya que el coeficiente de correlación fue de 0.58.



Figura 4.15 Correlación empírica entre REH y εεF

4.10 ϵ_{EF} vs %TV

La figura 4.16 muestra los resultados obtenidos de ϵ_{EF} y %TV de los especímenes evaluados. Se observa una correlación aceptable entre estos dos indicadores, ya que el coeficiente de correlación fue de 0.66.





Observando la línea de tendencia (que se ajustó para que pasara por el origen), se obtiene una relación entre ambos indicadores de durabilidad, lo cual define que el indicador ϵ_{EF} es un 60% del indicador %TV. Esta relación empírica corrobora las obtenidas en investigaciones anteriores, por lo que se podría dar una aproximación de que la ϵ_{EF} es regularmente entre 40 y 60% del indicador de %TV para concretos.

4.11 Efecto de la macroestructura del concreto (A_{AG} y A_{MP}) en los indicadores de durabilidad

Una vez evaluadas entre sí las posibles correlaciones empíricas de los indicadores de durabilidad, se continuó con la evaluación del efecto de la macroestructura del concreto en los valores de estos indicadores de durabilidad. Para tal efecto, se intentó correlacionar empíricamente los parámetros de la macroestructura del concreto, que en esta investigación se consideraron al A_{AG} y A_{MP} con los indicadores de durabilidad: REH, %TV y ϵ_{EF} .

Iniciando con el parámetro de A_{AG}, no se encontró una relación entre éste y los indicadores de durabilidad evaluados en esta investigación. Esto se puede observar en las figuras 4.18 a 4.20. Todos los indicadores, como lo muestran las figuras 4.17 a 4.19, muestran coeficientes de regresión muy bajos (<0.13). Esto puede deberse a que las áreas de agregado en todas las rodajas son muy similares, aunque la variación de los valores de REH, %TV y ϵ_{EF} sí fueron de consideración, por la diferencia entre los concretos usados en las trabes y las losas, factor aquí ya explicado.

Los valores bajos de REH se obtuvieron de los núcleos extraídos de otros elementos de la estructura, que en este caso corresponden a la losa (valores por debajo de 10 k Ω -cm), cuyo concreto registró un menor desempeño que el de las trabes prefabricadas o presforzadas. Esto se definió así en el proyecto ejecutivo debido a que la losa está a una elevación mayor que la de las trabes, por lo que la agresividad del medio ambiente marino es menor en la losa que en las trabes.

Aún estas diferencias en los valores de REH entre los concretos de trabes y losas, el efecto del A_{AG} en la REH aparentemente no es importante y esto se demuestra por la pendiente de la línea de tendencia, la cual es cercana a cero.



Figura 4.17 Correlación empírica entre REH y AAG



Figura 4.18 Correlación empírica entre AAG y % TV

Lo mismo se observa en las gráficas de los otros indicadores de durabilidad como el %TV y ϵ_{EF} , en donde los valores de las trabes están muy cercanos entre sí, en comparación con los núcleos extraídos en losas (ver figuras 4.18 y 4.19).



Figura 4.19 Correlación empírica entre AAG y EEF

Para el caso de las correlaciones empíricas utilizando los indicadores de durabilidad con el parámetro macroestructural denominado A_{MP}, las figuras 4.20 a 4.22 se generaron a partir de estos valores.



Figura 4.20 Correlación empírica entre REH y AMP



Figura 4.21 Correlación empírica entre AMP y %TV



Figura 4.22 Correlación empírica entre A_{MP} y ε_{EF}

Como puede observarse en las figuras anteriores, tampoco se encontraron correlaciones empíricas importantes entre el A_{MP} y los indicadores de durabilidad estudiados usando las rodajas de los núcleos extraídos en trabes y losas de la obra evaluada: todos los coeficientes de correlación R^2 estuvieron por debajo de 0.16.

Por último, se graficaron los valores de A_{AG} y A_{MP} para todas las rodajas estudiadas presentadas en la figura 4.23. De igual manera, no se encontró una correlación empírica entre ambos parámetros, al mostrarse un coeficiente de correlación extremadamente bajo (0.02), por lo que se podría decir que no existe una relación

entre la cantidad de agregado grueso y los macroporos formados en la matriz del concreto.



Figura 4.23 Correlación empírica entre AAG y AMP

5 Conclusiones

Con base en los resultados experimentales obtenidos en la presente investigación, se pueden definir las siguientes conclusiones:

Para el rango de valores de resistividad eléctrica húmeda (REH) encontrados en los especímenes de concreto evaluados, y las variaciones de temperatura del ambiente de medición, no se encontró una correlación significativa entre ambos parámetros. Esto corrobora lo encontrado en investigaciones anteriores, en donde concretos con valores de resistividad bajos (<20 k Ω -cm) y cambios de temperatura del ambiente de medición de consideración (>15 °C) mostraron variaciones pequeñas en la resistividad (<10%).

Se pudo determinar que para los núcleos de concreto evaluados, se cumple la relación física entre la resistencia eléctrica equivalente al de una serie de resistencias eléctricas conectadas entre sí, pero con una leve variación. Esto se debe a que se obtuvo un factor de corrección de 0.90 a los valores de la resistencia eléctrica del espécimen de longitud total, y la resistencia eléctrica del espécimen cortado en cuatro rodajas. Esta pequeña modificación se debió a que el espécimen sufrió pérdida del propio material al ser cortado en estas rodajas.

Se pudo observar que existe una correlación aceptable entre la REH y los otros dos indicadores de durabilidad (%TV y ϵ_{EF}), ya que los coeficientes de correlación estuvieron entre 0.58 y 0.70. También se pudo observar una buena correlación entre los indicadores de %TV y ϵ_{EF} , obteniéndose un coeficiente de correlación de 0.66.

Por último se pudo determinar que la resistencia eléctrica de la primera rodaja (y, por ende, su resistividad eléctrica), que corresponde a la rodaja más exterior de todas, mantuvo un valor mayor que las rodajas más interiores. Esto demuestra que una cantidad menor de agregado grueso (A_{AG}) y área de macroporos (A_{MP}) propicia un aumento en la resistividad eléctrica. No obstante, no se obtuvieron buenas correlaciones entre REH vs A_{AG} y REH vs A_{MP} con lo estimado en las rodajas internas, por lo que será necesario seguir evaluando estas correlaciones con nuevos estudios en un futuro próximo.

No se observaron buenas correlaciones entre la macroestructura del concreto (que en esta investigación fueron A_{AG} y A_{MP}) y los otros indicadores de durabilidad estudiados (%TV y ϵ_{EF}). Esto implicaría que, con los rangos evaluados en la presente investigación, el agregado grueso y los macroporos no afectaron estos indicadores de durabilidad en concretos de alto desempeño.

Bibliografía

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, 2.a edición. Julio.

Rodríguez Mendo, G. (2017). "Influencia de la temperatura en la medida de resistividad eléctrica y su asociación con diferentes relaciones agua/cemento: empleo de la ecuación de aproximación de Arrhenius", tesis, Universidad Veracruzana.

Torres Acosta, A. A., Moreno Valdés, A., Lomelí González, M. G., Martínez Madrid, M. y Díaz Cruz, L. A. (2018a). "Durabilidad de concretos autoconsolidables de baja relación agua-cemento y adicionados con microsílica", Publicación Técnica 512, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, ISSN: 0188-7297.

Torres Acosta, A. A., Moreno Valdés, A., Rodríguez Mendo, G., Lomelí González, M. G., Martínez Madrid, M. y Díaz Cruz, L. A. (2018b). "Efecto de la temperatura ambiental en la resistividad eléctrica húmeda en cilindros de concreto", Publicación Técnica (en prensa), Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, ISSN: 0188-7297.

Torres Acosta A. A. y Castro Borges, P. (2018). "La filosofía para obtener obras de concreto durables", IC Ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros Civiles de México, núm. 586, mayo, pp. 12-15.

Torres Acosta, A. A., Martínez Madrid, M. y San Martín Romero, J. (2016). Reporte Final de Proyecto EE 26/16 "Supervisión por durabilidad de la construcción de la segunda etapa del Viaducto Alterno en la API Progreso", Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, diciembre.

Torres Acosta, A. A., del Valle Moreno, A., Pérez Quiroz, J. T., Lomelí González, M. G., Mendoza Pérez, I. N. y Bustamante Altamirano, J. (2012). Reporte Final del Proyecto núm. EE 15/12: "Inspección preliminar de la infraestructura de muelles de 13 puertos federales mexicanos", Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, mayo.

Torres Acosta, A. A., del Valle Moreno, A., Pérez Quiroz, J. T., Martínez Madrid, M. y Backhoff Polhs, M. (2010). "Plan Nacional de Evaluación de Puentes Federales, Libres de Peaje, Dañados por Corrosión", Publicación Técnica 327, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, ISSN: 0188-7297.

Anexo 1



Figura A1.1. Correlaciones entre REH y temperaturas mínima (a) y media (b), series 2 a 4





Figura A1.2. Correlaciones entre REH y temperaturas mínima (a) y media (b), series 5 a 7

Anexo 2



Figura A2.1. Correlaciones entre REH corregida y temperaturas mínima (a) y media (b), series 2 a 4

Relación entre resistividad eléctrica, temperatura de medición, área de agregado grueso y porosidad en núcleos de concreto



Figura A2.2. Correlaciones entre REH corregida y temperaturas mínima (a) y media (b), series 5 a 7

Tabla A2.1. Va	lores de <i>m</i> y R² d	obtenidos de c	orrelaciones	entre REH
C	orregida y tempe	eraturas mínin	na y media	

	Núm. de núcleo	Temp. mínima			Temp. media				
Serie		m	m prom.	R ²	R² prom.	m	m prom.	R ²	R² prom.
1	11	0.01	0.10	0.03	0.05	0.36	0.33	0.06	
	20	0.09		0.04		0.34		0.09	0.00
	24	0.17		0.10		0.22		0.06	0.09
	38	0.12		0.05		0.40		0.13	
2	50	0.12	0.20	0.05	0.06	0.60	0.42	0.15	
	56	0.25		0.10		0.32		0.08	0.13
	63	0.11		0.05		0.40		0.17	
	67	0.34		0.04		0.36		0.12	
3	106	0.16	0.18	0.15	0.12	0.06	0.38	0.01	0.15
	109	0.15		0.09		0.43		0.19	
	116	0.11		0.07		0.33		0.14	
	136	0.31		0.17		0.69		0.25	
	163	0.17	0.33	0.15	0.19	0.82	1.41	0.42	0.46
4	174	0.55		0.30		1.93		0.55	
	207	0.13		0.11		0.85		0.39	
	244	0.48		0.21		2.06		0.49	
5	252	0.51	0.42	0.36	0.34	0.31	0.40	0.03	
	260	0.31		0.31		0.20		0.04	0.09
	312	0.40		0.33		0.51		0.15	
	317	0.48		0.35		0.58		0.15	
6	325	0.11	0.20	0.11	0.25	0.20	0.30	0.31	
	329	0.26		0.34		0.42		0.29	0.26
	332	0.28		0.27		0.35		0.16	
7	339	0.15		0.29		0.25		0.28	
	388	0.38	0.24	0.65	0.49	0.71	0.57	0.55	0.50
	406	0.13		0.11		0.54		0.56	0.56
	410	0.22		0.71		0.46		0.58	



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

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