



Efecto de la temperatura de prueba y la resistividad eléctrica húmeda en cilindros de concreto

Andrés Antonio Torres Acosta
Alejandro Moreno Valdés
Gabriel Rodríguez Mendo
María Guadalupe Lomelí González
Miguel Martínez Madrid

**Publicación Técnica No. 543
Sanfandila, Qro., 2019**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Efecto de la temperatura de prueba y la
resistividad eléctrica húmeda en cilindros de
concreto**

Publicación Técnica No. 543
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, el M. en V.T. Gabriel Rodríguez Mendo, la Ing. María Guadalupe Lomelí González y el Dr. Miguel Martínez Madrid.

Se agradece la colaboración de API Progreso (Puertos Yucatán SA de CV) y la empresa COCONAL SA de CV por el apoyo en logística durante la fabricación y transporte de los cilindros de concreto durante la ejecución de la obra del Nuevo Viaducto de Progreso.

Contenido

Índice de figuras		v
Índice de tablas		vii
Sinopsis		ix
Abstract		xi
Resumen	ejecutivo	xiii
Introducción		1
Capítulo 1.	Antecedentes	3
Capítulo 2.	Metodología experimental	11
Capítulo 3.	Resultados	15
Capítulo 4.	Análisis de resultados	17
Capítulo 5.	Conclusiones	27
Bibliografía		29

Índice de figuras

Figura 1.1	Efecto del campo eléctrico sobre los iones disueltos en los poros del concreto	5
Figura 1.2	Comparación de la relación entre RCPT y SR a 56 días [15]	7
Figura 1.3	Correlación entre RCPT (carga total superada 6 horas) y resistividad eléctrica [16]	8
Figura 2.1	Medición de la REH en cilindros de concreto	11
Figura 3.1	Valores de REH con la temperatura mínima [22]	15
Figura 3.2	Valores de REH con la temperatura media [22]	16
Figura 4.1	Correlación empírica entre REH y temperatura mínima	18
Figura 4.2	Correlación empírica entre REH y temperatura mínima	19
Figura 4.3	Pendientes de las líneas de tendencia utilizando la temperatura mínima de La Llave	26
Figura 4.4	Valores de REH de las tres mezclas corregidos con la fórmula de aproximación de Arrhenius, utilizando temperatura mínima	25
Figura 4.5	Valores de REH de las tres mezclas corregidos con la fórmula de aproximación de Arrhenius, utilizando temperatura media	26

Índice de tablas

Tabla 1.1	Criterio de evaluación de resistividad eléctrica real en especímenes de concreto usando los métodos 9.1.- Método directo o 9.2.- Método de Wenner [24]	6
Tabla 2.1	REH y temperatura en las dos estaciones climáticas	13
Tabla 4.1	Resultados de correlaciones entre resistividad y temperaturas mínimas y media	24
Tabla 4.2	Valores de resistividad ($\Omega.m$) y de temperatura ($^{\circ}K$)	28
Tabla 4.3	Valores del logaritmo natural de la resistividad e inversa de la temperatura	22
Tabla 4.4	Valores de la pendiente, E_{A-Cond} , y resistividad corregida calculados con temperatura mínima de la estación La Llave	24
Tabla 4.5	Resultados de correlaciones entre resistividad corregida y temperaturas mínimas y media	24

Sinopsis

La presente investigación incluye los resultados experimentales obtenidos con cilindros de concreto (10 cm x 20 cm) fabricados en sitio con materiales de la región, manteniendo lo solicitado en las especificaciones del proyecto ejecutivo del Nuevo Viaducto de Progreso, Yucatán, en México. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio Químico (LQ), de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural (CIVIE) del Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Se monitoreó la resistividad eléctrica húmeda (REH) por un periodo aproximado de 300 días, al término del cual, se recortaron los cilindros en cuatro rodajas, y se procedió a realizar otras pruebas, a saber: permeabilidad rápida de cloruros, porcentaje total de vacíos y absorción capilar de agua (cuyos resultados se presentaron en la publicación técnica núm. 512 del IMT).

Se observaron cambios significativos en el valor de REH durante el monitoreo, aparentemente debido a los cambios de temperatura. Por lo tanto, se solicitó el registro de la temperatura ambiente a las estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Estos registros incluyeron los valores mínimo, máximo y promedio diarios. Con los valores de REH y las temperaturas de las estaciones meteorológicas, se realizó un análisis de correlación usando las leyes de Arrhenius para determinar los factores de corrección a considerar para valores de la REH si la temperatura ambiente no se controla en el laboratorio.

Los resultados preliminares muestran una correlación aceptable entre la temperatura ambiente y la REH medida.

Abstract

The present investigation includes the experimental results obtained with concrete cylinders (10 cm x 20 cm) manufactured in situ, with materials from the region, in line with the specifications established in the executive project of the New Viaduct in Progreso, Yucatan, Mexico. Tests were performed at the Chemical Laboratory (LQ), of the Coordination of Vehicle Engineering and Structural Integrity (CIVIE) of the Mexican Transportation Institute (IMT). Wet electrical resistivity (REH) was monitored over a period of approximately 300 days. After this period, the cylinders were cut into four slices, performing other tests: rapid permeability of chlorides, total percentage of voids and capillary water absorption (results of which were presented in the IMT's technical publication No. 512).

Significant changes in the REH value were observed during monitoring, apparently due to temperature changes. Therefore, the registration of the ambient temperature was requested to the meteorological stations of the National Institute of Forestry, Agriculture and Livestock Research (INIFAP). These records included the minimum, maximum and average daily values. With the values of REH and temperatures of the meteorological stations, a correlation analysis was performed using the Arrhenius laws to determine the correction factors that should be considered for values of the REH if the ambient temperature is not controlled in the laboratory.

The preliminary results show an acceptable correlation between the ambient temperature and the measured REH.

Resumen ejecutivo

Las estructuras de concreto basan su durabilidad en la compacidad del material y su baja permeabilidad. A pesar de ello, se ha podido constatar en las últimas décadas un número creciente de deterioros que fundamentalmente se concentran en la corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto. Esta corrosión se produce en medios marinos y con cloruros por del ingreso de estos iones, o en medios industriales o urbanos por la penetración del dióxido de carbono gas (carbonatación) a través de la red de poros del concreto. Los cloruros producen una corrosión localizada y la carbonatación induce la corrosión general de la barra de refuerzo.

Existen técnicas establecidas, y demostradas, que ayudan a la determinación de la calidad del concreto y de su durabilidad en ambientes agresivos como los descritos anteriormente. Varias de estas pruebas pueden realizarse con especímenes del mismo material (mortero o concreto) fabricados para la caracterización física y mecánica del mismo. La resistividad eléctrica húmeda (REH) es una medida no destructiva que se puede realizar muchas veces en la misma probeta y cuyo valor se puede verificar en obra, por lo que presenta muchas ventajas frente a otras medidas para la caracterización de la durabilidad de concretos. Pero se ha encontrado que los resultados de esta prueba pueden verse afectados por la temperatura del ambiente durante la misma prueba, por lo que ciertas precauciones se deben de tomar en cuenta para aplicar esta técnica que ayuda a determinar el desempeño por durabilidad del concreto evaluado por esta técnica.

La presente investigación muestra resultados obtenidos de REH en cilindros de concreto (de 10 x 20 cm de dimensión), los cuales se monitorearon por un periodo de más de 300 días, en un laboratorio que carecía de un ambiente con temperatura controlada. A la par, se muestran resultados de las temperaturas diarias (mínima, alta y promedio) registradas en estaciones meteorológicas situadas en lugares cercanos a la ubicación del laboratorio de pruebas.

Estos resultados se correlacionaron entre sí (temperatura y REH) en el tiempo y se determinaron ecuaciones empíricas para relacionar dichas mediciones en el tiempo. Se encontró que estos valores de temperatura diaria (mínima, máxima y promedio) y REH mostraron un comportamiento que podría simularse con la relación de Arrhenius.

Se encontraron buenos factores de correlación entre la REH y la temperatura de medición, y se observó un efecto mayor en concretos cuya resistividad eléctrica es alta ($\geq 40 \text{ k}\Omega\text{-cm}$) y, si los concretos tienen una resistividad eléctrica baja ($< 20 \text{ K}\Omega\text{-cm}$), la temperatura no afecta sus valores de resistividad eléctrica.

Introducción

En la actualidad, el concreto con acero de refuerzo y preesfuerzo, o simplemente concreto reforzado, es reconocido a nivel mundial como el material más utilizado en el ámbito de la construcción de viviendas e infraestructura, debido a las ventajas económicas y estructurales que éste presenta [1]. Por considerársele una roca artificial, se creía que poseía una gran resistencia a los medios agresivos, o durabilidad, por lo que se pensaba que tendrían una vida útil superior a los 50 años [2], pero actualmente algunas obras de concreto reforzado presentan deterioros prematuros. Por estas razones, el material ha sido objeto de estudio de diversas investigaciones, algunas de las cuales buscan proteger el acero de refuerzo [3], aunque la gran mayoría están enfocadas en la capacidad del concreto para proteger el acero embebido de los agentes agresivos del medio ambiente, los cuales provocan el conocido fenómeno de la corrosión, es decir, investigan la durabilidad del concreto [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

La corrosión se considera el problema principal que se presenta en las construcciones de concreto reforzado, ya que cuando comienza a degradarse el acero, éste genera residuos que deterioran el concreto; además, el acero comienza a aumentar su volumen, lo que produce esfuerzos de tensión en el concreto, y provoca agrietamientos y, en casos extremos, desprendimientos del concreto, lo cual deja aún más expuesto al ambiente al acero y reduce la resistencia de la estructura para la cual fue diseñada, así como su eficiencia de servicio.

Este deterioro prematuro de las estructuras de concreto reforzado genera increíbles pérdidas económicas, principalmente en zonas costeras, debido a los grandes costos de mantenimiento y rehabilitación. En Estados Unidos de América se calcula un costo de 300 mil millones de dólares por fallas en la infraestructura [8]. En México, no se han realizado estudios completos que indiquen con claridad el impacto económico que causa el fenómeno de la corrosión [13], pero más de 700 puentes a cargo de la Red Federal de Carreteras presentan problemas de corrosión de alta prioridad, ya sea por penetración de cloruros, por carbonatación o ambos [11].

Ante la necesidad de los usuarios y del fabricante de calcular la durabilidad del concreto y poder mitigar los problemas causados por la corrosión, se comenzaron a investigar sus propiedades de transporte, y se concluyó que sólo los métodos que miden directamente el transporte del dióxido de carbono o los iones cloruro, son realistas [14]. La prueba más utilizada por las agencias estatales en Estados Unidos para este propósito es la prueba rápida de permeabilidad de cloruros (RCPT). Con una duración aproximada de seis horas, este método fue desarrollado originalmente por la Asociación de Cemento Portland (PCA) en el marco de un programa de

investigación financiado por la Administración Federal de Carreteras (FHWA, por sus siglas en inglés), el cual, sustituyó al método de “Resistencia del concreto a la penetración del ion cloruro”, cuya duración era de 90 días o más [15].

En años recientes, el uso de la resistividad eléctrica ha ganado bastante popularidad, ya que posee una gran correlación con la prueba de RCPT [15, 16], además de tratarse de un ensayo no destructivo mucho más sencillo de realizar. En varias investigaciones se considera 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 [14], que además se puede utilizar como indicador de corrosión para calcular los periodos de iniciación y propagación, amén de, permitir modelar la vida útil de servicio de una obra civil [17, 18].

No obstante, la medida de resistividad eléctrica no está exenta de presentar variaciones, que generalmente tienen lugar durante la realización del ensayo, por lo cual ha sido objeto de diversos estudios al respecto. Algunos autores han determinado que existen ciertos factores que pueden influenciar los resultados de resistividad eléctrica, como la temperatura. Este factor principalmente puede influenciar los resultados obtenidos y presentar una variación de hasta un 80% en el valor de la resistividad eléctrica, cuando la temperatura fluctúa entre 10 °C y 45 °C, y otros autores, reportan una variación del 3% cuando la temperatura varía solo 1 °C [19, 20, 21].

El presente trabajo pretende asociar los resultados de resistividad eléctrica y temperatura del ambiente durante la medición utilizando especímenes de concreto diseñados para la construcción del Nuevo Viaducto de Progreso, propiedad de la API Progreso, obra ubicada en el estado de Yucatán.

1 Antecedentes

El concreto, al igual que el resto de los materiales, posee propiedades que lo identifican y, en la actualidad, sus propiedades eléctricas —específicamente su resistividad eléctrica— son de particular interés. Dicha propiedad se ha comparado desde hace algunos años con la prueba rápida de permeabilidad de cloruros (RCPT), ensayo de durabilidad más aceptado, pero de difícil acceso, capaz de determinar la medida de penetración de agentes agresivos del medio al concreto, y se ha encontrado una fuerte relación entre ambos [15, 22].

Ante la creciente demanda de durabilidad en las estructuras de concreto de importancia nacional (por ejemplo, Nuevo Viaducto de Progreso, Yucatán; Nuevo Puente La Unidad, Campeche; Nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México, CdMx), la propuesta de la medida de resistividad eléctrica del concreto, responde al interés de aplicar ensayos no destructivos en las estructuras de concreto que permitan medir las características de calidad de la mezcla y, además, sean aplicables al control de calidad en obra y al autocontrol de indicadores de la durabilidad, que ayuden en el cálculo de la vida útil de servicio de la misma estructura [14, 18, 22].

1.1 Propiedades eléctricas del concreto

En aplicaciones específicas tales como en obras marítimas o expuestas a ambientes industriales agresivos (refinerías de petróleo, siderúrgicas, cementeras, etc.), las propiedades eléctricas son de gran interés. La resistencia eléctrica del concreto también influye en el progreso de la corrosión del acero de refuerzo embebido, ya que disminuye el flujo iónico en el material y, por ende, disminuye así la velocidad de corrosión del acero de refuerzo [14, 17-18].

El concreto ofrece una alta resistencia al paso de la corriente eléctrica hacia el acero o procedente del acero embebido. Esto se debe en gran medida al efecto electroquímico que el concreto tiene sobre el acero con el que está en contacto, surgido de la alcalinidad del electrolito dentro del mismo.

El concreto húmedo se comporta como un electrolito con resistividad por debajo de los 100 ohm-m aproximadamente, lo que lo coloca dentro del rango de semiconductores. El concreto secado al aire tiene una resistividad del orden de 10^4 ohm-m. Por otro lado, el concreto secado al horno tiene una resistividad cerca de 10^9 ohm-m, lo cual significa que dicho concreto es un buen aislante.

Este gran incremento de resistividad del concreto en la remoción de agua se explica al señalar que la corriente eléctrica se conduce a través del concreto húmedo esencialmente por medio electrolítico, es decir, por iones en el agua evaporable. Sin

embargo, cuando los poros capilares están segmentados, ocurre el paso de corriente eléctrica a través del agua de gel. La resistividad del agregado normal es infinitamente más grande. Para concreto de proporciones de mezclas dadas, el secado completo al aire incrementa la resistividad de la zona de superficie. Aunque hay sus excepciones cuando los agregados son menos densos que la pasta del cemento, como suele suceder en los agregados calcáreos de la península de Yucatán [22].

Por ello, puede esperarse que cualquier incremento en el volumen de agua y la concentración de iones presentes en el agua de poros disminuya la resistividad de la pasta cemento, y en medida indirecta la resistividad disminuye agudamente con un aumento en la relación agua/cemento.

Como otros iones del agua de poros, los cloruros reducen en forma importante la resistividad del concreto. La influencia de la salinidad del agua de mezclado sobre la resistividad es mayor en el concreto con altas relaciones agua/cemento y es mucho menor en concretos de alta resistencia [1].

Durante las primeras horas después del mezclado, la resistividad aumenta muy lentamente, después aumenta con rapidez hasta la edad de un día, y después incrementa de manera muy lenta o se vuelve constante, a menos que el concreto se seque por completo lo que incrementa la resistividad [1].

La relación entre la resistividad del concreto y la fracción de volumen ocupado por el agua puede derivarse a partir de las leyes de conductividad de conductores heterogéneos. Sin embargo, en el rango de mezclas normales del concreto, el contenido de agua varía comparativamente poco para una granulometría del agregado y trabajabilidad (medida indirecta de la fluidez) dadas, y la resistividad llega a ser más dependiente del cemento utilizado, ya que la composición química del cemento controla la cantidad de iones presentes en el agua evaporable [1].

1.2 Resistividad eléctrica del concreto

La Ley de Ohm indica que la resistividad eléctrica es una propiedad recíproca de la conductividad, se considera una propiedad volumétrica de los materiales que indica su resistencia al paso de las cargas eléctricas y se representa por la siguiente ecuación (figura 1.1):

$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{l}{A}$$

Donde R es la resistencia eléctrica que se mide aplicando un voltaje V y midiendo el paso de corriente I. Esa relación es igual a la resistividad por el factor geométrico l/A, es decir, por la l=distancia entre los electrodos y A=área transversal del paso de corriente.

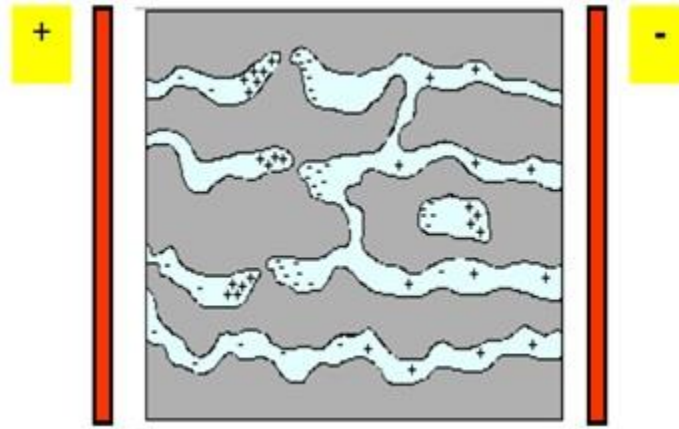


Figura 1.1 Efecto del campo eléctrico sobre los iones disueltos en los poros del concreto [23]

Cuanto mayor es la resistividad eléctrica, menor es la porosidad del concreto; por tanto, mayor será su impermeabilidad y resistencia mecánica, al contener más fase sólida por volumen. Además, si el concreto no se encuentra saturado de agua, la resistividad crece, debido a que el concreto no posee propiedades conductivas, es decir, las cargas eléctricas se transmiten a través de la fase acuosa presente dentro de la microestructura de poros, por lo que también es un indicador de su grado de saturación. Por lo tanto, la resistividad eléctrica es un indicador de la calidad del concreto al indicar, indirectamente, su porosidad y grado de saturación.

De acuerdo con el *Manual de la RED DURAR* [12], no existe un acuerdo de carácter general entre los investigadores acerca del nivel límite de resistividad eléctrica por encima del cual el riesgo de corrosión de las armaduras pueda considerarse despreciable. Sin embargo, la norma mexicana NMX-C-514-ONNCCE-2016 “Industria de la Construcción – Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico: Especificaciones y Métodos de Ensayo” [24] presenta criterios de evaluación de la medida de resistividad eléctrica en especímenes de concreto. En la tabla 1.1 se pueden apreciar estos criterios de evaluación.

1.3 Resistividad eléctrica como factor de durabilidad del concreto

De acuerdo con Andrade y D’Andrea [14, 23], la demanda de durabilidad es creciente siempre y cuando la resistencia mecánica se haya diseñado en forma adecuada y controlada. En los últimos años se ha tratado de relacionar determinados métodos de ensayo del concreto que midan sus propiedades mecánicas con su durabilidad. Es de destacar el libro que resume el trabajo del Comité de RILEM TC-116, dirigido primero por H. K. Hilsdorf y luego por J. Kropp. En él se describen los métodos más conocidos de medida de la permeabilidad del concreto y se valora su relación con la durabilidad, concluyendo que sólo los métodos que miden directamente el transporte de cloruros o el de dióxido de

carbono son realistas, aunque su uso para predecir el comportamiento a largo plazo sigue siendo una cuestión no resuelta.

Tabla 1.1 Criterio de evaluación de resistividad eléctrica real en especímenes de concreto usando los métodos 9.1.- Método directo o 9.2.- Método de Wenner [24]

Resistividad	Probabilidad de corrosión
$> 100 - 200 \text{ k}\Omega\text{-cm}$	El concreto es muy denso, por lo que su porosidad interconectada es extremadamente baja, al igual que el transporte de agentes hacia el acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy bajas, independientemente del contenido de cloruros o del nivel de carbonatación. No existe distinción entre acero en estado activo o pasivo.
$50 \text{ a } 100 \text{ k}\Omega\text{-cm}$	El concreto tiene una porosidad interconectada baja, lo que dificulta el transporte de agentes agresivos al acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son bajas.
$10 \text{ a } 50 \text{ k}\Omega\text{-cm}$	La porosidad interconectada de consideración en el concreto permite un transporte rápido de los agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son moderadas o altas en concretos carbonatados o con cloruros.
$< 10 \text{ k}\Omega\text{-cm}$	El concreto tiene una porosidad interconectada excesiva, lo que permite que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo sea extremadamente rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy altas en concretos carbonatados o con cloruros. La resistividad no es el parámetro que controla el proceso de corrosión. El valor de la velocidad de corrosión obtenido con la NMX-C-501-ONNCCE refleja la cota superior de la velocidad de corrosión en ese concreto para un determinado contenido de cloruros o nivel de carbonatación.

De ahí que, con base en la necesidad tanto de los fabricantes como de los usuarios, se requiere disponer de un ensayo no destructivo que permita el autocontrol del fabricante, así como el seguimiento de la calidad por parte del usuario a lo largo del ciclo de vida de la estructura. Los métodos de medida de difusión de cloruros y carbonatación no resultan fácilmente accesibles y su interpretación exige especialistas [15]. Este tipo de ensayos “directos” de medida de la penetración de agentes agresivos del medio al concreto son bastante usados por laboratorios especializados, pero sigue necesitándose un ensayo de control de calidad que permita una estimación de la durabilidad futura [15, 20]. Algunos autores como Andrade *et al.* [14, 17-18] proponen que puede ser la medida de resistividad eléctrica.

Desde 2003, el trabajo realizado por varios investigadores ha encontrado una fuerte relación entre la prueba rápida de permeabilidad de cloruros (*Rapid Chloride Permeability Testing*, RCPT) y las pruebas de resistividad eléctrica (en su mayoría de resistividad superficial [*Surface Resistivity*, SR]), como se puede observar en las figuras 1.2 y 1.3. Cabe mencionar que Chini *et al.* fueron los primeros en establecer esta relación [15, 16]. En Luisiana, EUA, se ensayaron más de 30 mezclas en

laboratorio, combinando materiales cementicios y relaciones agua-cemento. Incluso se realizaron pruebas de campo y se encontró que la relación entre estos dos métodos a 56 días era bastante buena con un coeficiente de correlación de 0.89. Además, a partir de investigaciones de la Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos, (*Federal Highway Administration, FHWA*), se encontraron relaciones similares entre las pruebas de SR y RCPT a los 56 días. Por su parte, Spragg *et al.* mostraron también que existía una excelente relación entre las pruebas de SR y la de resistividad volumétrica (*Bulk Resistivity, BR*), también llamada “resistividad directa” [15].

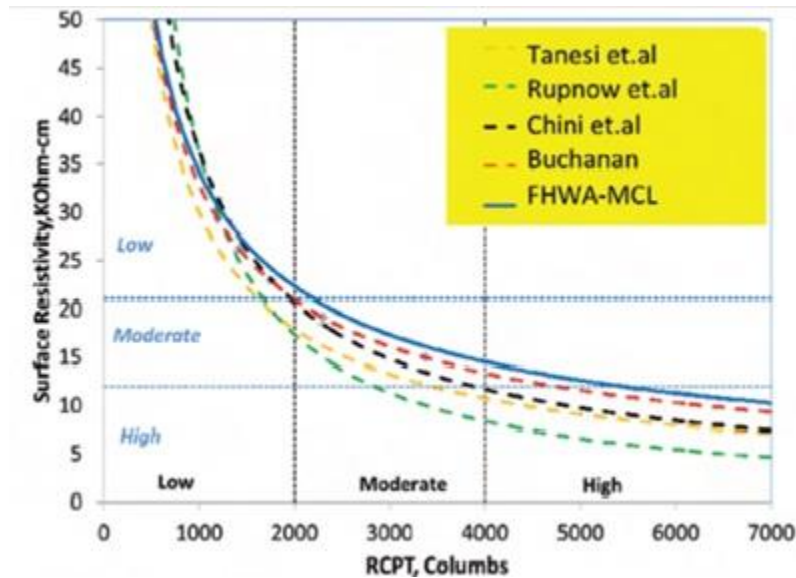


Figura 1.2 Comparación de la relación entre RCPT y SR a 56 días [15]

Gracias a estos estudios, se determinaron ventajas que presentan las pruebas de SR y BR, las cuales se enfocan en su practicidad, ya que a diferencia de la RCPT —prueba exclusiva de laboratorio basada en el conteo de coulombs o carga eléctrica que pasa por una celda electrolítica al cabo de 6 horas [22]—, las pruebas de SR y BR pueden llevarse a cabo en campo o en laboratorio y su duración es de 5 minutos aproximadamente [22].

Por lo tanto, se puede definir la resistividad eléctrica, ρ , como una propiedad del material, independiente de la geometría del espécimen y la configuración de los electrodos. Se trata, además, de una medida capaz de valorar aspectos del concreto como su microestructura, porosidad y contenido de agua. Y al ser un ensayo no destructivo que se puede repetir muchas veces sin perturbar el material, es muy adecuado para el control de calidad de los fabricantes y del usuario [14, 15, 22].

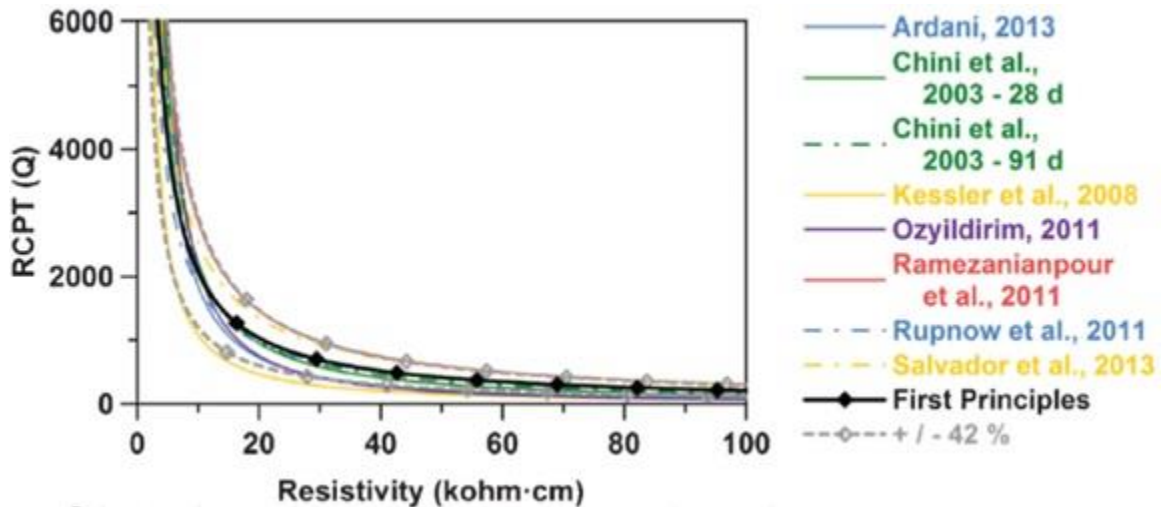


Figura 1.3 Correlación entre RCPT (carga total superada 6 horas) y resistividad eléctrica [16]

1.4 Influencia de la temperatura en la medida de resistividad eléctrica

Se ha encontrado que la temperatura puede influenciar significativamente en la medida de la resistividad eléctrica. Un incremento en la temperatura resulta en un incremento en la movilidad de los iones en la solución de poro y un decremento en la medida de resistividad [20, 22].

Algunos autores reportan que un cambio de temperatura de 1 °C (1.8 °F) puede resultar en un cambio en la medida de la resistividad eléctrica del concreto de hasta el 3% [19]. Y otros presentan que la resistividad medida usando la misma muestra madura puede variar hasta un 80% cuando la temperatura fluctúa entre 10 y 45 °C [20, 22].

Para que los valores de resistividad eléctrica sean representativos, algunos autores proponen que se deben estandarizar a una temperatura de referencia, la cual es 25 °C [17, 18] realizando los ensayos de resistividad a una temperatura controlada.

Por otra parte, se han propuesto varios enfoques para corregir dicha variación por temperatura. Algunos autores [16, 20] aceptan una fórmula basada en la relación exponencial de la energía de activación, conocida como “Aproximación de Arrhenius” (variación de la Ley de Arrhenius), como factor de corrección por temperatura, para estandarizar la medida de resistividad eléctrica del concreto obtenida. Dicha fórmula se presenta a continuación:

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

Donde:

ρ_{t-ref}	Resistividad a temperatura de referencia (Ohm*m)
ρ_t	Resistividad a temperatura de la prueba (Ohm*m)
E_{A-Cond}	Parámetro conocido como “energía de activación por conducción”
R	Constante universal de gas [8.314 J/(mol-K)]
T	Temperatura de la prueba (°K)
T_{Ref}	Temperatura de referencia a 23 °C (296.15 °K)

En 1888, el químico sueco Svante Arrhenius sugirió que las moléculas deben poseer una cantidad mínima de energía para reaccionar. Esa energía proviene de la energía cinética de las moléculas que colisionan. La energía cinética sirve para originar las reacciones, pero si las moléculas se mueven muy lento, sólo rebotarán al chocar con otras y no sucederá ninguna reacción. Para que se genere la reacción, las moléculas deben tener una energía cinética total que sea igual o mayor que cierto valor mínimo de energía, llamado “energía de activación”. Por tanto, la energía de activación es la energía que necesita un sistema antes de poder iniciar un determinado proceso, es decir, la energía mínima necesaria para que se produzca una reacción entre dos moléculas.

La energía de activación por conducción (E_{A-Cond}) puede determinarse usando la pendiente (R^2) que resulta del gráfico obtenido del logaritmo natural de la resistividad eléctrica ($\Omega \cdot m$) en el eje de las ordenadas y la inversa de la temperatura ($1/^\circ K$) en el eje de las abscisas. La pendiente multiplicada por el valor negativo de la constante universal de gas [-8.314 J/(mol-K)] determinará el valor de la energía de activación por conducción [20].

2 Metodología experimental

2.1 Medición de la resistencia eléctrica (RE) y estimación de la REH

En la publicación técnica IMT núm. 512 [22], se presentaron los antecedentes de las mediciones realizadas a los especímenes de concreto tipo cilindro de 10 x 20 cm de la obra denominada “Nuevo Viaducto de Progreso”, propiedad de la Administración Portuaria Integral (API) Progreso, en el estado de Yucatán.

Para medir la REH real (o *bulk*), el espécimen se extrae de la cámara o tina de curado; se coloca una esponja húmeda en cada uno de los extremos; se coloca una placa metálica (regularmente de un metal resistente a la corrosión como acero inoxidable o bronce) en cada extremo del cilindro, de tal manera que toque las esponjas, y se conecta a un equipo que aplique un voltaje entre las dos placas metálicas y, a la vez, mide la corriente iónica que pasa entre estas dos placas (ver figura 2.1).



Figura 2.1 Medición de la REH en cilindros de concreto

El equipo usa estos valores de voltaje y corriente para calcular la RE entre las dos placas, que sería la del espécimen de concreto (cilindro o cubo). Este valor RE se multiplica por una constante de forma que, para este caso de medición (conocido como “método directo” o *bulk*) es igual al área del espécimen (A), dividida por la longitud (L) del mismo (A/L), con lo cual se obtiene el valor de la resistividad eléctrica del material. Al medirse cuando el concreto está saturado de agua, se conoce como REH. Esta prueba tarda unos 1-2 minutos por espécimen evaluado.

2.2 Efecto de la temperatura en las mediciones de REH

A objeto de observar el efecto de la temperatura en la REH, se utilizaron mediciones que forman parte de un estudio anterior, realizadas a tres diferentes mezclas de concreto el 8 de septiembre de 2015. Las mezclas se denominaron M1, M2 Y M3 y cada una se compone de dos muestras. Las mezclas M1 y M2 se empezaron a monitorear a la edad de 20 días y la mezcla M3 a la edad de 38 días. Se evaluaron hasta la edad de 276 días, del 28 de septiembre del 2015 al 10 de junio de 2016 (figura 2.1).

Debido a que al momento de hacer las mediciones no se registró la temperatura del sitio, fue necesario utilizar datos de temperatura diaria de dos estaciones climáticas del estado de Querétaro, cercanas al IMT: la estación La Llave, ubicada en el municipio de San Juan del Río y la estación Agrique, en el municipio de Pedro Escobedo. De esta última, sólo se obtuvieron datos de temperatura a partir del día 20 de noviembre de 2015.

En la tabla 2.1 se muestran las mediciones de cada mezcla, así como los registros de temperatura de las estaciones climáticas antes mencionadas.

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) [24].

Tabla 2.1. Valores de REH y temperatura en las dos estaciones meteorológicas

Fecha	Edad	Resistividades (K Ω .cm)			Temperaturas (°C)					
					Estación: LA LLAVE			Estación: AGRIQUE		
		M1	M2	M3	MAX	MIN	MED	MAX	MIN	MED
28/09/2015	20	61.0	51.2		24.3	12.4	18.3			
02/10/2015	24	75.7	61.9		25.5	6.5	16.1			
07/10/2015	29	82.2	63.2		29.2	8.5	15.0			
16/10/2015	38	79.1	60.5	30.1	23.3	10.1	16.1			
26/10/2015	48	71.7	57.3	29.7	24.4	13.8	17.6			
30/10/2015	52	74.9	60.1	33.4	24.0	12.5	16.7			
06/11/2015	59	75.9	63.2	35.6	24.9	8.6	16.1			
13/11/2015	66	76.0	62.4	36.7	22.6	13.5	16.9			
20/11/2015	73	77.3	63.8	37.3	24.6	11.0	17.5			
27/11/2015	80	78.8	65.0	38.6	23.9	11.9	17.1	25.0	13.1	19.1
04/12/2015	87	92.9	78.7	43.4	20.0	8.0	12.2	22.4	7.5	15.0
11/12/2015	94	94.0	79.3	45.2	25.3	5.1	14.9	26.2	5.0	15.6
17/12/2015	100	89.6	74.6	43.2	27.9	4.3	14.9	27.0	3.2	15.1
11/01/2016	125	96.7	79.5	47.5	25.0	0.7	12.2	23.8	0.2	12.0
19/01/2016	133	101.7	83.8	49.9	21.7	1.5	11.2	21.2	1.8	11.5
22/01/2016	136	100.8	83.4	49.5	22.6	3.5	13.0	22.6	4.6	13.6
29/01/2016	143	96.4	80.3	50.1	21.3	3.1	11.1	22.4	3.0	12.7
05/02/2016	150	103.2	85.0	49.5	24.2	0.0	11.1	25.0	-1.3	11.9
12/02/2016	157	100.4	84.0	51.1	23.2	0.0	12.0	23.7	-0.7	11.5
25/02/2016	170	93.5	78.1	46.1	26.0	4.5	14.1	26.5	4.3	15.4
04/03/2016	178	86.9	71.7	43.2	23.0	4.1	14.2	24.4	3.3	13.9
11/03/2016	185	110.3	91.3	54.2	19.8	0.0	10.5	20.6	-0.2	10.2
18/03/2016	192	77.4	63.4	40.5	27.0	8.1	17.5	27.2	8.8	18.0
04/04/2016	209	77.7	64.2	40.5	30.3	7.3	18.4	30.9	6.1	18.5
12/04/2016	217	67.5	56.5	35.5	31.6	10.0	21.3	31.9	13.3	22.6
19/04/2016	224	69.9	58.9	36.8	27.9	10.5	18.4	28.8	11.0	19.9
26/04/2016	231	77.8	64.6	40.3	28.3	9.4	18.7	27.9	9.9	18.9
29/04/2016	234	71.1	60.7	36.7	32.5	13.0	22.2	31.2	10.1	20.7
10/06/2016	276	68.2	56.9	34.7	29.1	14.3	19.4	28.2	14.2	21.2

3 Resultados

3.1 REH y temperatura

En las figuras 3.1 y 3.2 se muestran los valores de REH de las tres mezclas respecto a la temperatura mínima y media de las estaciones La Llave y Agrique, respectivamente [22]. Se observa que con la temperatura mínima se encuentra una mejor correlación entre temperatura y REH, ya que las mediciones de REH se tomaron muy temprano en la mañana (9:30 horas) durante todo el periodo de evaluación. Se observa que a partir del día 90 y hasta el día 200, los valores de la REH aumentaron en las tres mezclas, lo cual coincide con las fechas en que se presentaron bajas temperaturas en Querétaro durante los meses de diciembre de 2015 a febrero de 2016. Se muestra cómo la temperatura fue muy similar en las dos estaciones climáticas, por lo que se tomará como base la más completa, que corresponde a la estación de La Llave, municipio de San Juan del Río.

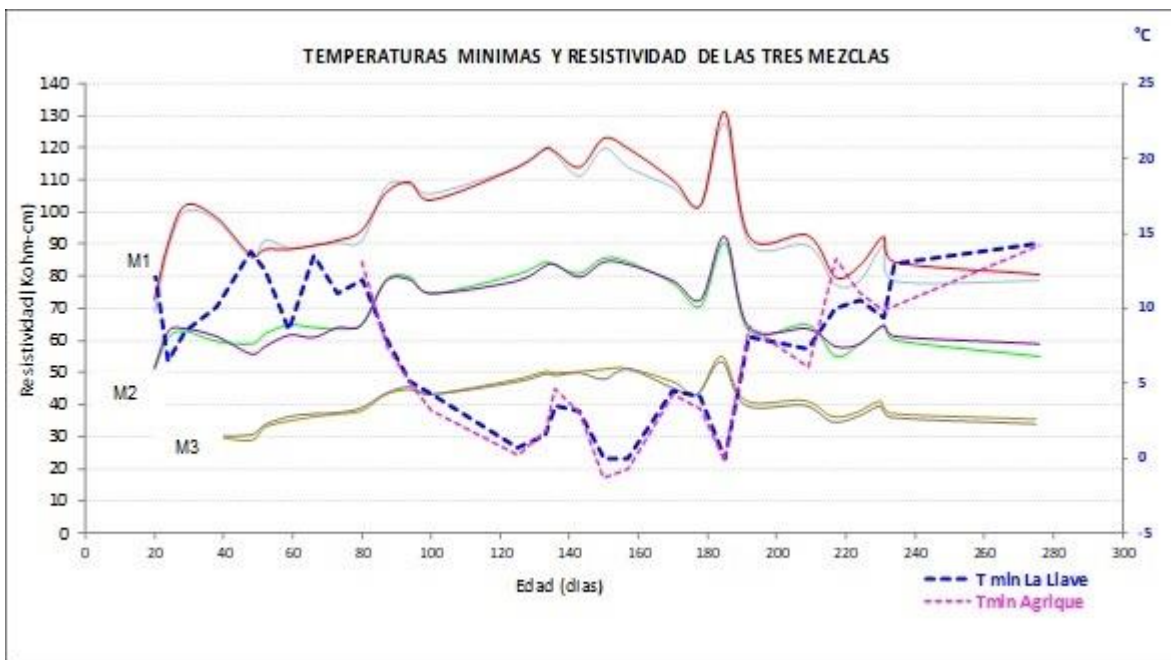


Figura 3.1 Valores de REH con la temperatura mínima [22]

Es también interesante observar que las líneas de los valores de REH medidos en los especímenes cilíndricos (cuyo eje de ordenadas es el que se encuentra de lado izquierdo de ambas gráficas) muestran una tendencia similar a la de temperatura mínima y media diaria, con la diferencia que está de cabeza la segunda con respecto a la primera. Esto da una idea de cómo ver ambos valores entre sí, REH y temperatura, como en un espejo.

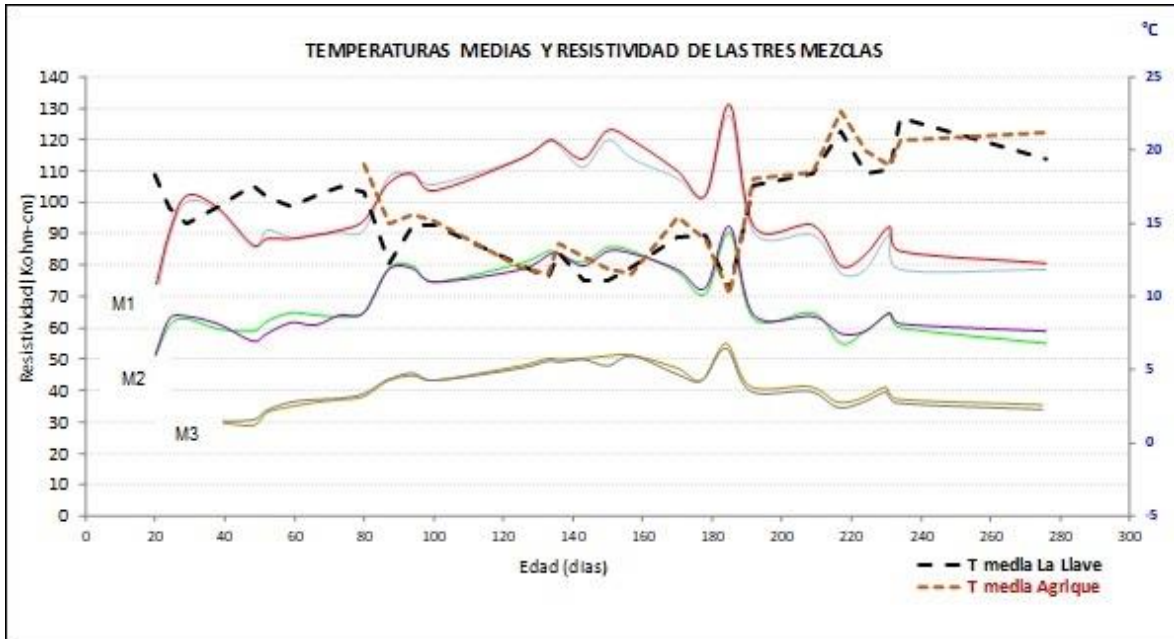


Figura 3.2 Valores de REH con la temperatura media [22]

4 Análisis de resultados

4.1 REH vs temperatura

Con los datos de temperatura mínima y media de las estaciones climáticas La Llave y Agrique, se hicieron correlaciones entre resistividad y temperatura de las tres mezclas. Los resultados se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Resultados de correlaciones entre resistividad y temperaturas mínimas y media

Mezcla	T mínima		T media	
	La Llave	Agrique	La Llave	Agrique
	R ²		R ²	
M1	0.79	0.80	0.82	0.93
M2	0.79	0.79	0.77	0.92
M3	0.80	0.84	0.59	0.93

Se puede observar que las mejores correlaciones fueron utilizando la temperatura media de la estación Agrique, con valores de 0.93, 0.92 y 0.93 para las mezclas M1, M2, M3, respectivamente.

En las figuras 4.1 y 4.2, se muestran las correlaciones realizadas para cada estación.

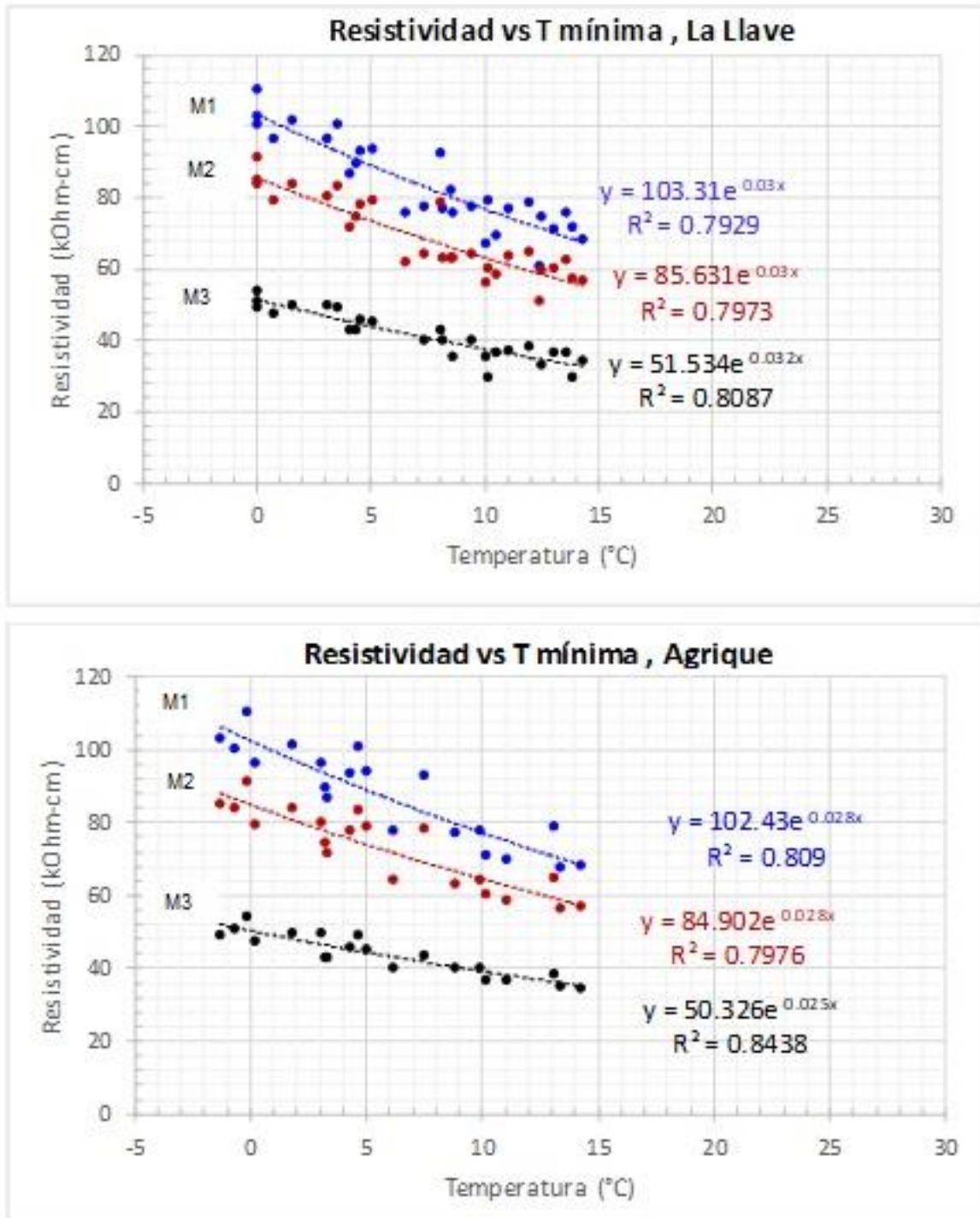


Figura 4.1 Correlación empírica entre REH y temperatura mínima

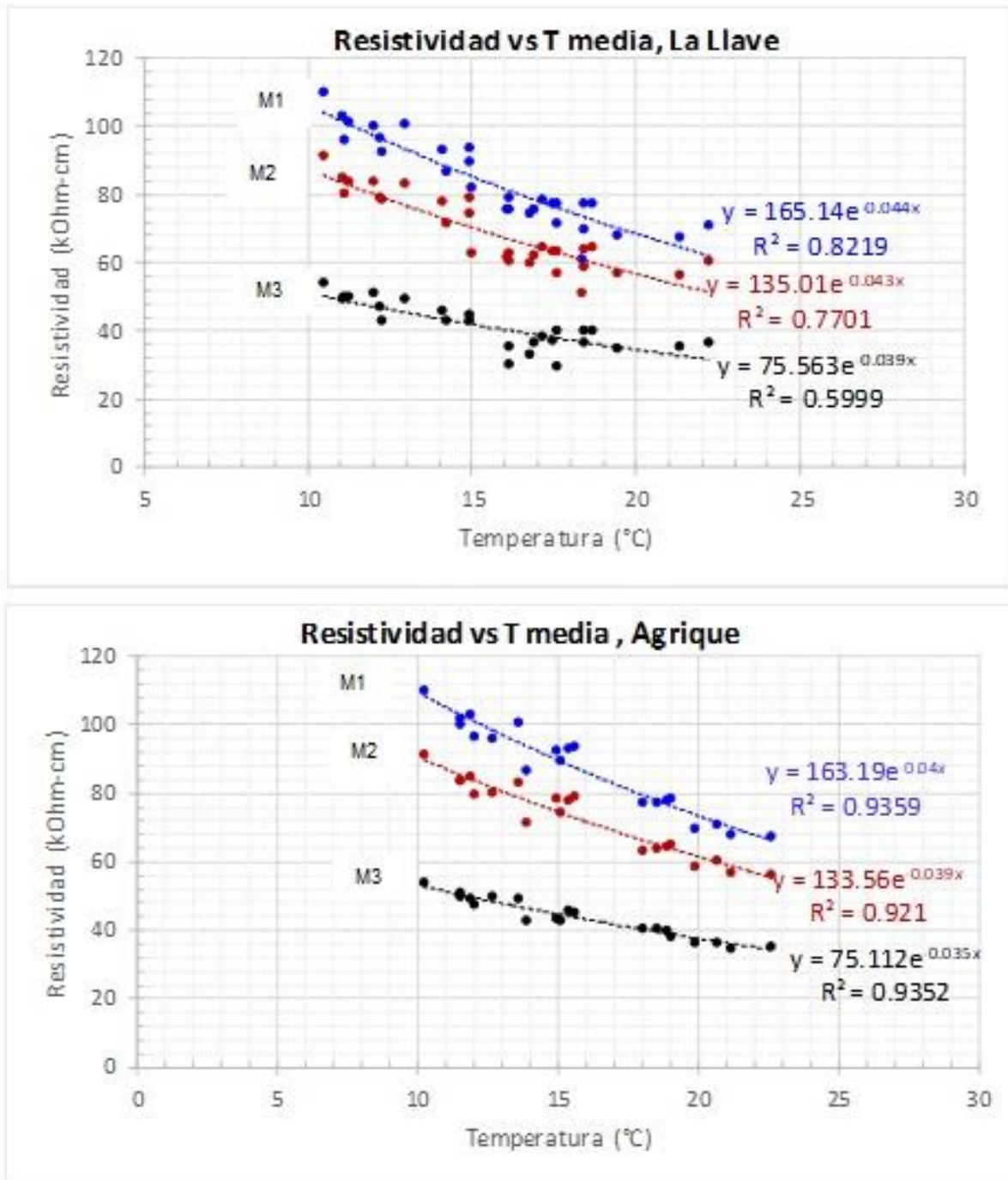


Figura 4.2 Correlación empírica entre REH y temperatura media

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, presentada a continuación:

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

Donde:

ρ_{t-ref} Resistividad a temperatura de referencia (Ohm-m)

ρ_t Resistividad a 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)

A objeto de obtener el valor de la energía de activación por conducción (E_{A-Cond}), se calculó el valor de la pendiente que resulta del gráfico obtenido del logaritmo natural de la resistividad eléctrica (en unidades de Ω -m) en el eje de las ordenadas y la inversa de la temperatura (en grados Kelvin, $1/^\circ K$) 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} , éstos se sustituyeron en la ecuación (1), y se obtuvo la resistividad corregida (ρ_{t-ref}). El procedimiento a detalle se describe a continuación:

El primer paso consistió en convertir los valores de resistividad eléctrica a unidades de Ohm-metro (Ω -m) y los valores de temperatura a grados kelvin ($^\circ K$). Estos resultados se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Valores de resistividad ($\Omega\cdot m$) y de temperatura ($^{\circ}K$)

Resistividades ($\Omega\cdot m$)			Temperatura ($^{\circ}K$)			
			La Llave		Agrique	
M1	M2	M3	Mínima	Media	Mínima	Media
609.7	512.5		285.6	291.5		
756.9	618.5		279.7	289.2		
821.7	632.2		281.7	288.2		
791.3	604.8	301.0	283.3	289.2		
716.7	573.3	297.5	287.0	290.7		
749.1	600.8	333.8	285.7	289.9		
758.9	632.2	356.4	281.7	289.3		
759.9	624.4	367.0	286.7	290.0		
772.6	638.1	373.1	284.2	290.6		
788.3	649.9	385.8	285.1	290.3		
928.7	787.4	433.9	281.2	285.4	280.7	288.1
940.3	792.8	451.6	278.2	288.0	278.2	288.8
896.3	746.1	432.0	277.4	288.0	276.4	288.3
967.0	795.2	475.2	273.9	285.3	273.4	285.2
1017.1	838.4	498.7	274.7	284.4	275.0	284.7
1008.3	834.5	494.8	276.7	286.1	277.8	286.8
964.1	803.1	500.7	276.3	284.3	276.2	285.9
1031.8	850.2	494.8	273.2	284.2	271.9	285.0
1004.3	840.4	511.5	273.2	285.1	272.5	284.7
934.6	781.5	461.4	277.7	287.3	277.5	288.6
868.8	716.7	432.0	277.2	287.3	276.5	287.0
1103.5	913.0	541.9	273.2	283.6	273.0	283.4
773.6	634.2	405.1	281.2	290.7	282.0	291.2
776.6	642.1	404.9	280.4	291.5	279.3	291.7
675.4	565.5	354.8	283.2	294.5	286.5	295.8
699.0	589.1	368.2	283.7	291.5	284.2	293.1
777.5	646.0	402.9	282.6	291.8	283.1	292.1
710.8	606.7	366.8	286.2	295.4	283.3	293.8
682.3	569.4	347.0	287.5	292.6	287.4	294.4

Después se obtuvieron los valores del logaritmo natural de la REH y la inversa de temperatura, como se observa en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Valores del logaritmo natural de la resistividad e inversa de la temperatura

ln de la Resistividad (ρ)			1/T(°K)			
			La Llave		Agrique	
M1	M2	M3	Mínima	Media	Mínima	Media
6.4	6.2		0.00350	0.00343		
6.6	6.4		0.00358	0.00346		
6.7	6.4		0.00355	0.00347		
6.7	6.4	5.7	0.00353	0.00346		
6.6	6.4	5.7	0.00348	0.00344		
6.6	6.4	5.8	0.00350	0.00345		
6.6	6.4	5.9	0.00355	0.00346		
6.6	6.4	5.9	0.00349	0.00345		
6.6	6.5	5.9	0.00352	0.00344		
6.7	6.5	6.0	0.00351	0.00344		
6.8	6.7	6.1	0.00356	0.00350	0.00356	0.00347
6.8	6.7	6.1	0.00359	0.00347	0.00360	0.00346
6.8	6.6	6.1	0.00360	0.00347	0.00362	0.00347
6.9	6.7	6.2	0.00365	0.00350	0.00366	0.00351
6.9	6.7	6.2	0.00364	0.00352	0.00364	0.00351
6.9	6.7	6.2	0.00361	0.00350	0.00360	0.00349
6.9	6.7	6.2	0.00362	0.00352	0.00362	0.00350
6.9	6.7	6.2	0.00366	0.00352	0.00368	0.00351
6.9	6.7	6.2	0.00366	0.00351	0.00367	0.00351
6.8	6.7	6.1	0.00360	0.00348	0.00360	0.00347
6.8	6.6	6.1	0.00361	0.00348	0.00362	0.00348
7.0	6.8	6.3	0.00366	0.00353	0.00366	0.00353
6.7	6.5	6.0	0.00356	0.00344	0.00355	0.00343
6.7	6.5	6.0	0.00357	0.00343	0.00358	0.00343
6.5	6.3	5.9	0.00353	0.00340	0.00349	0.00338
6.5	6.4	5.9	0.00353	0.00343	0.00352	0.00341
6.7	6.5	6.0	0.00354	0.00343	0.00353	0.00342
6.6	6.4	5.9	0.00349	0.00339	0.00353	0.00340
6.5	6.3	5.8	0.00348	0.00342	0.00348	0.00340

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 de las tres mezclas y para cada temperatura, como se muestra en la figura 4.3.

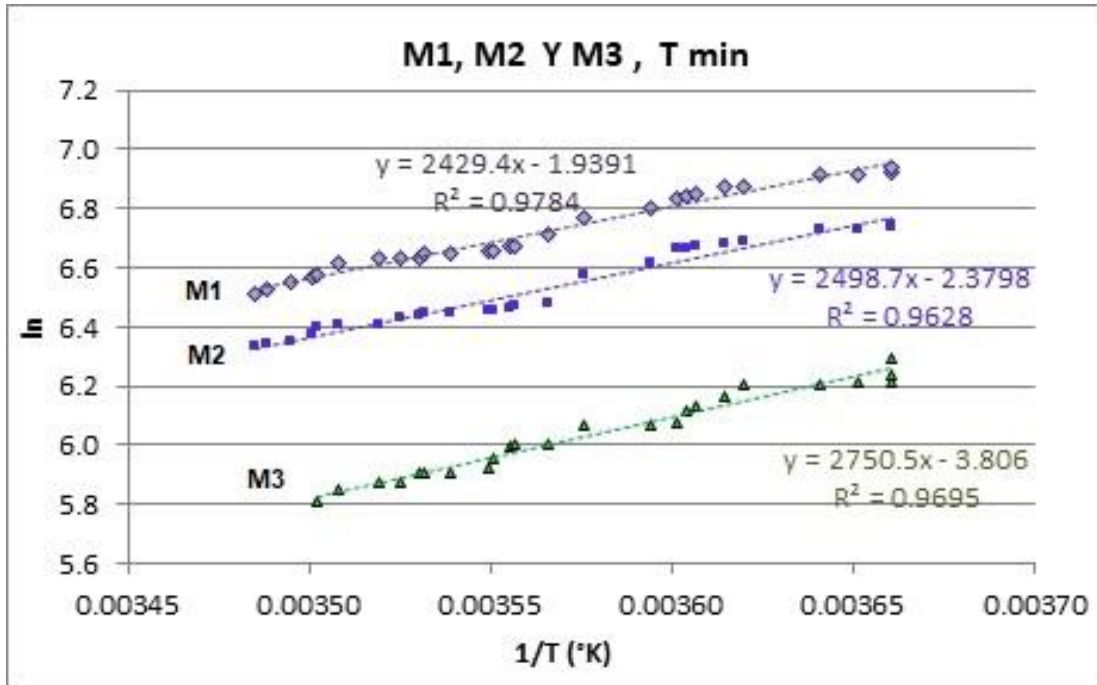


Figura 4.3 Pendientes de las líneas de tendencia utilizando la temperatura mínima de La Llave

Se agregó la línea de tendencia y su ecuación a las tres gráficas, como se puede observar en la figura 4.3. El valor de la pendiente de cada recta multiplicada por el valor negativo de la constante universal de gas [$-8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$] determinó el valor de la energía de activación por conducción ($E_{A\text{-Cond}}$) que, al sustituirlo en la ecuación (1) de aproximación de Arrhenius (para cada una de las mezclas y cada una temperatura), permitió obtener los valores de resistividad corregidos ($\rho_{t\text{-ref}}$), que se muestran en la tabla 4.4. En ésta únicamente se presentan los valores de la estación La Llave, donde se utiliza la temperatura mínima. De manera similar, se procedió para la temperatura media y las dos temperaturas de la estación Agrique.

Con los datos de temperatura mínima y media de las estaciones climáticas, se hicieron correlaciones entre resistividad corregida y temperatura de las tres mezclas. Los resultados se muestran en la tabla 4.5.

En este caso, lo que se busca es que los valores de resistividad corregidos varíen lo menos posible, independientemente de la temperatura de prueba. Esto se puede observar en las gráficas de las figuras 4.4 y 4.5., en las cuales también se muestran las correlaciones realizadas para cada estación. De éstas, se seleccionó la correlación que tuvo el menor valor de R^2 por ser la que mejor garantiza que la fórmula de aproximación de Arrhenius funciona. En este caso, las correlaciones hechas con temperaturas medias de la estación Agrique presentaron los menores valores de R^2 .

Tabla 4.4 Valores de la pendiente E_{A-Cond} y resistividad corregida, calculados con temperatura mínima de la estación La Llave

M1				M2				M3			
Pendiente	EAc (J/mol-K)	ρ t-ref		Pendiente	EAc (J/mol-K)	ρ t-ref		Pendiente	EAc (J/mol-K)	ρ t-ref	
		$\Omega.cm$	K $\Omega.cm$			$\Omega.cm$	K $\Omega.cm$			$\Omega.cm$	K $\Omega.cm$
2 429.4	-20 198.0	448.9	44.9	2 498.7	-20 774.2	374.0	37.4	2 750.5	-22 867.7		
		465.8	46.6			375.3	37.5				
		537.8	53.8			408.8	40.9				
		543.7	54.4			411.1	41.1			196.8	19.7
		550.0	55.0			436.7	43.7			220.5	22.0
		553.2	55.3			439.9	44.0			236.8	23.7
		498.0	49.8			410.0	41.0			221.2	22.1
		578.1	57.8			471.3	47.1			269.3	26.9
		545.5	54.6			446.1	44.6			251.6	25.2
		571.9	57.2			467.1	46.7			268.2	26.8
		598.6	59.9			501.1	50.1			263.9	26.4
		553.7	55.4			459.8	46.0			247.9	24.8
		514.7	51.5			421.7	42.2			230.5	23.0
		495.0	49.5			399.4	39.9			222.6	22.3
		534.3	53.4			432.4	43.2			240.6	24.1
		564.6	56.5			459.6	46.0			256.6	25.7
		533.1	53.3			436.6	43.7			256.0	25.6
		516.5	51.6			417.3	41.7			226.0	22.6
		502.7	50.3			412.4	41.2			233.7	23.4
		540.2	54.0			444.7	44.5			248.1	24.8
		495.7	49.6			402.4	40.2			228.8	22.9
		552.4	55.2			448.1	44.8			247.6	24.8
		500.0	50.0			404.8	40.5			247.1	24.7
		489.7	49.0			399.6	40.0			240.2	24.0
		462.7	46.3			383.2	38.3			231.2	23.1
		486.2	48.6			405.5	40.5			244.1	24.4
		523.1	52.3			429.7	43.0			257.2	25.7
		532.8	53.3			451.0	45.1			264.6	26.5
		531.4	53.1			440.4	44.0			261.5	26.1

Tabla 4.5 Resultados de correlaciones entre resistividad corregida y temperaturas mínimas y media

Mezcla	T mínima		T media	
	La Llave	Agrique	La Llave	Agrique
	R ²		R ²	
M1	0.0096	0.0096	0.0096	0.00001
M2	0.0113	0.0393	0.0495	0.0004
M3	0.059	0.0245	0.2362	0.0078

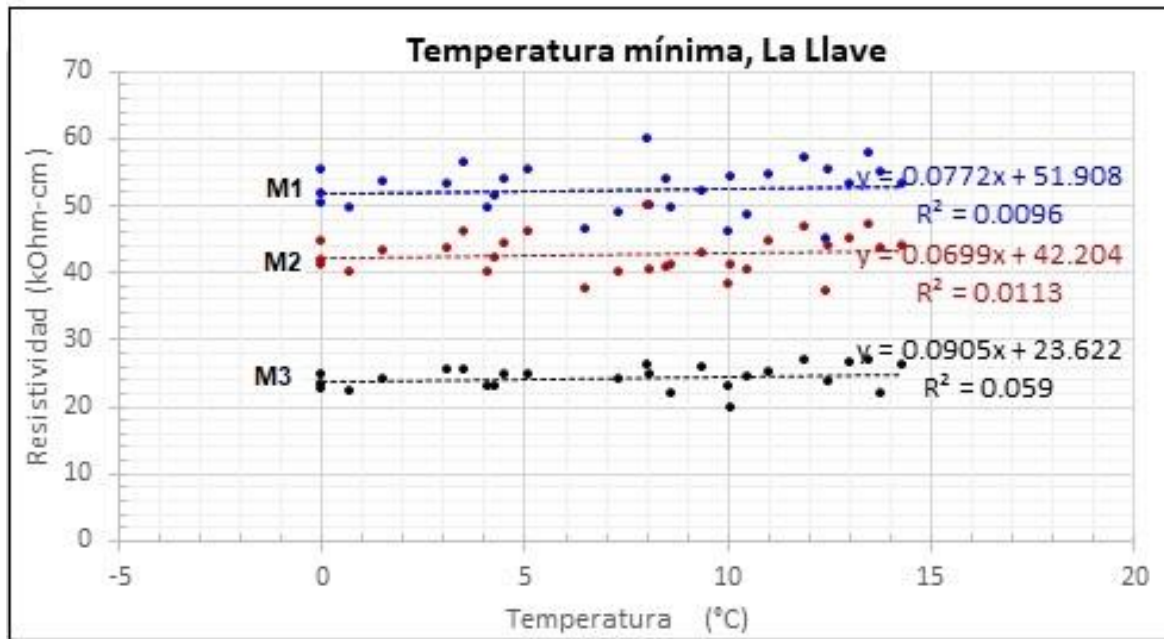
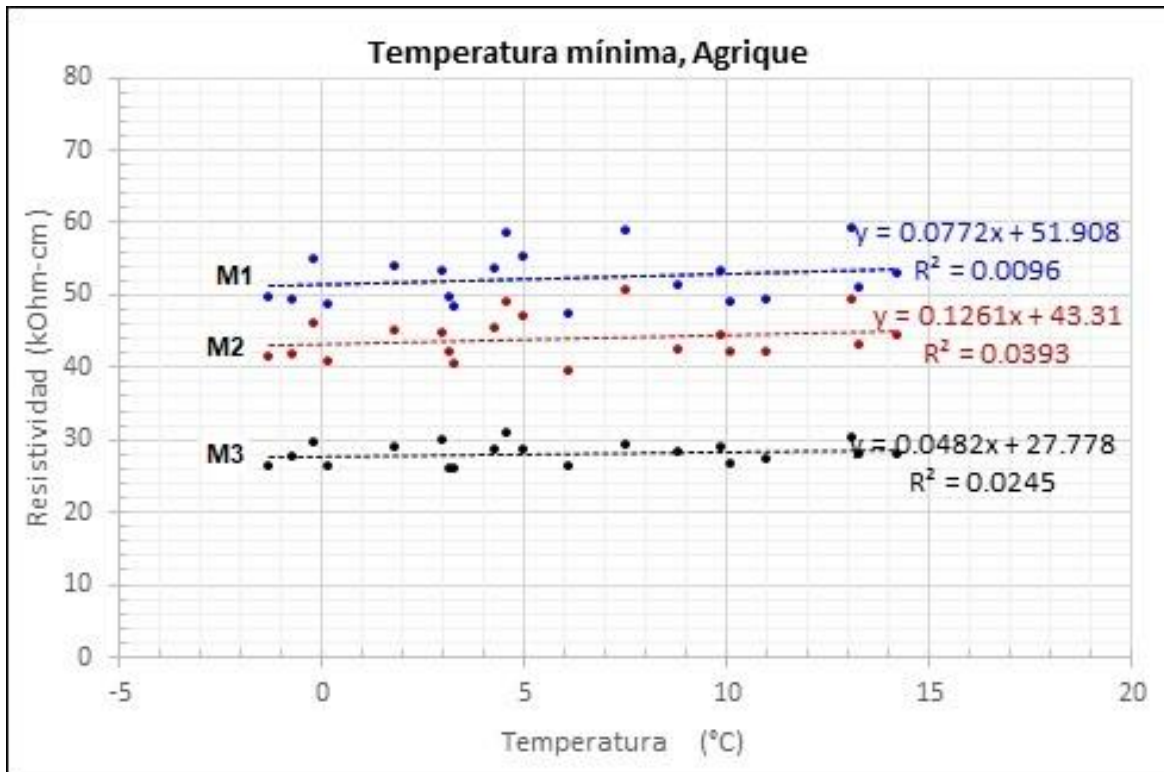


Figura 4.4 Valores de REH de las tres mezclas corregidos con la fórmula de aproximación de Arrhenius, utilizando temperatura mínima

Como puede observarse en las figuras 4.5 y 4.6, los valores de REH corregidos por temperatura (ρ_{t-ref}) muestran una línea casi horizontal (valores de la constante de x entre 0.0482-0.1261 para temperaturas mínimas y 0.0024-0.4698 para temperaturas medias), con una marcada diferencia entre los valores de REH altos

(> 40 kΩ-cm), que fueron más constantes que los de REH bajas (< 20 kΩ-cm), los cuales mostraron cierta pendiente positiva en lugar de que su tendencia fuera horizontal (constante de $x > 0.10$).

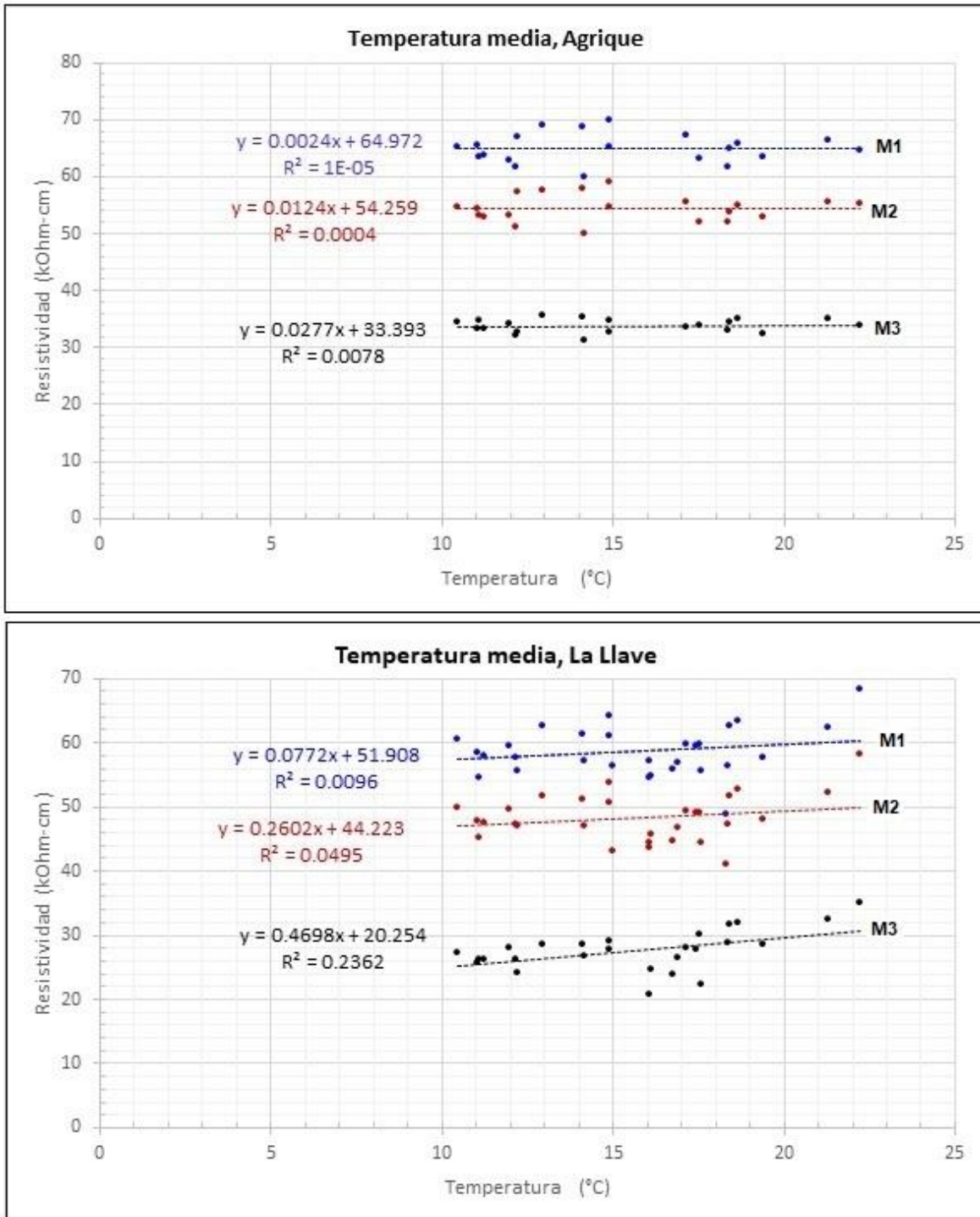


Figura 4.5 Valores de REH de las tres mezclas corregidos con la fórmula de aproximación de Arrhenius, utilizando temperatura media

5 Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos en la presente investigación, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Rangos de temperatura de 0 °C a 32 °C obtenidos en el ambiente del laboratorio de pruebas de esta investigación generaron variaciones de entre 20% y 30% en las mediciones de REH, por lo que, al utilizar este índice de durabilidad, se debe especificar a qué temperatura se realizarán las mediciones.

Se pudo corroborar que la REH sigue una relación de cambio por temperatura de tipo Arrhenius, por lo que se plantea el uso de esta relación para modificar los valores de REH a la temperatura que define la norma mexicana de resistividad eléctrica de concreto NMX-ONNCE-C-514-2016 de 23 °C.

Los cambios en los valores de la REH en concretos con bajo desempeño (< 10 kΩ-cm) o desempeño intermedio (entre 10 kΩ-cm y 40 kΩ-cm) por variación en la temperatura del ambiente de medición se ven afectados en menor grado que los observados en concretos de alto desempeño (> 40 kΩ-cm). Es por ello que deberá estimarse el valor de energía de activación por conducción (E_{A-Cond}) de los concretos a evaluar, para así obtener la constante de modificación de temperatura de medición de la REH medida en campo (o en otro lugar sin control de temperatura ambiental) con temperatura diferente a los 23 °C, con apego a lo establecido en la NMX-ONNCE-C-514-2016.

Bibliografía

- [1] 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.
- [2] Nawy, E. G., *Concreto reforzado: un enfoque básico*, México: Prentice-Hall, 1988.
- [3] Poblano Salas, C. A., A. Torres Acosta y M. Martínez Madrid, “Sistemas de protección contra la corrosión en puentes: investigaciones recientes”, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, Qro., 2000.
- [4] Solís Carcaño, R. G., P. Castro Borges y É. I. Moreno, “Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera”, *Ingeniería*, vol. 9, núm. 1, pp. 13-18, 2005.
- [5] Castañeda Valdez, A. y M. Rodríguez Rodríguez, “Las pérdidas económicas causadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado”, CENIC. *Ciencias Químicas*, vol. 45, pp. 52-59, 2014.
- [6] Sosa Baz, M. R., T. Pérez López, F. E. Corvo Pérez, A. Torres Acosta y O. Trocónis de Rincón, “Estudio del deterioro de especímenes de concreto armado expuestas a 300 m de la costa de Campeche, México”, CENIC. *Ciencias Químicas*, vol. 46, pp. 81-89, 2015.
- [7] Rojas López, M. D. y J. J. Arenas Giraldo, “Comparación técnico-financiera del acero estructural y el hormigón armado”, *Dyna*, año 75, núm. 155, pp. 47-56, 2008.
- [8] Del Valle Moreno, A., T. Pérez López y M. Martínez Madrid, “Pt. 182 - Fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado”, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, 2001.
- [9] Muñoz Salinas, F. y C. J. Mendoza Escobedo, “Durabilidad en las estructuras de concreto reforzado desde la perspectiva de la norma española para estructuras de concreto”, *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, vol. 4, núm. 1, pp. 63-86, julio-diciembre de 2012.
- [10] Hernández Castañeda, O. y C. Mendoza Escobedo, “Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico”, *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, vol. VII, núm. 1, pp. 57-70, 2006.

- [11] López Celis, R., J. T. Pérez Quiroz, A. A. Torres Acosta, M. Martínez Madrid, W. Martínez Molina, L. E. Ariza Aguilar, E. Zamudio Cíntora, J. Genescá Llongueras y B. Valdez Salas, “Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México”, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, 2006.
- [12] Uller, L., O. Trocónis de Rincón, I. Alanís, P. Helene, R. Mejías de Gutiérrez, V. O'Reilly, C. Andrade, J. J. Carpio, I. Díaz, M. Salta, G. Rodríguez, A. Romero de Carruyo, A. Sagües, C. Valentini, P. Castro, J. Genescá, T. Pérez López, M. Cruz Alonso, D. Contreras, R. Fernández, M. Sánchez y S. Delgado, *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*, México, 2da edición: CYTED. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, 1998.
- [13] Ramírez Reyes, J. L., D. Pereyra Díaz, N. García Navarro, L. Valencia Argüelles y V. Juárez Rivera, “La corrosión atmosférica y su impacto en la economía veracruzana”, *Revista de divulgación científica y tecnológica de la Universidad Veracruzana*, vol. XXIV, núm. 1, enero-abril de 2011.
- [14] Andrade, R. D. C., “La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad”, vol. 1, núm. 2, mayo-agosto de 2011.
- [15] Gudimettla, G. C. J., “Resistivity Test for Concrete - Recent Field Experience”, Estados Unidos: *ACI Materials Journal*, vol. 113, núm. 4, agosto de 2016.
- [16] 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 y Universidad Purdue, 2013.
- [17] Andrade, C., *Calculation of initiation and propagation periods of service life of reinforcements by using the electrical resistivity*, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid, España: CSIC, 2004.
- [18] Andrade, C., *Normalización y modelado de la vida útil en estructuras de hormigón*, Madrid, España: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC, 2009.
- [19] Hamed Layssi, “Electrical Resistivity of Concrete: Concepts, Applications, and Measurement Techniques”, Estados Unidos: ACI, mayo de 2015.
- [20] Spragg, R., “Electrical Resistivity Measurements in Cementitious Systems: Observations of Factors that Influence the Measurements”, Estados Unidos: Paper of TRB Annual Meeting, 2013.
- [21] Azarsa, P. y R. Gupta, “Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review”, Hindawi, vol. 2017, Article ID 8453095, p. 30, 2017.

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

[23] D'Andrea, R. "Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de la resistividad eléctrica", Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC, Madrid, España, 2010.

[24] ONNCCE, NMX-C-514-ONNCCE-2016 "Resistividad eléctrica del concreto hidráulico: especificaciones y métodos de ensayo", México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2016.

[25] Rodríguez Mendo, G. "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, 2017.



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
certificado bajo la norma ISO 9001:2015