



Caracterización por durabilidad de morteros convencionales y comerciales para la rehabilitación de estructuras de concreto reforzado en puentes y muelles de la SCT

Rebeca Visairo Méndez
Andrés Antonio Torres Acosta
Victoria Vázquez Galván
María Guadalupe Lomelí González
Alejandro Moreno Valdez
Miguel Martínez Madrid

**Publicación Técnica No. 549
Sanfandila, Qro, 2019**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Caracterización por durabilidad de morteros
convencionales y comerciales para la rehabilitación
de estructuras de concreto reforzado en puentes y
muelles de la SCT**

Publicación Técnica No. 549
Sanfandila, Qro, 2019

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por la M. en I. Rebeca Visairo Méndez (estudiante de doctorado de la Universidad Autónoma de Querétaro), el Dr. Andrés Antonio Torres Acosta, la C. Victoria Vázquez Galván (tesista de licenciatura de la Universidad Marista de Querétaro AC), la Ing. María Guadalupe Lomelí González, el Ing. Alejandro Moreno Valdez (auxiliar de investigador y consultor) y el Dr. Miguel Martínez Madrid.

Se agradece a la compañía SIKA Mexicana S.A. de C.V. el apoyo económico para la realización de esta investigación, mediante el suministro de los morteros comerciales evaluados y la asesoría técnica relacionada con las propiedades del mismo durante todo el proceso de experimentación.

Esta investigación es el producto final del proyecto interno de investigación *El 32/18: Caracterización por durabilidad de morteros convencionales para rehabilitación de estructuras de concreto reforzado en puentes y muelles de la SCT.*

Contenido

Índice de figuras		v
Índice de tablas		ix
Índice de ecuaciones		xi
Sinopsis		xiii
Abstract		xv
Resumen	ejecutivo	xvii
Introducción		1
Capítulo 1.	Antecedentes	3
Capítulo 2.	Metodología experimental	27
Capítulo 3.	Resultados	33
Capítulo 4.	Análisis de resultados	39
Capítulo 5.	Conclusiones	55
Bibliografía		57

Índice de figuras

Figura 1.1	Fotografías obtenidas en el levantamiento de daños de un muelle mexicano	8
Figura 1.2	Detalle del plano del levantamiento de daños de una zona de un muelle mexicano	9
Figura 1.3	Delimitación de superficie (REHABILITAR, 2003)	11
Figura 1.4	Cortadora eléctrica manual y ejemplo de delimitación de la superficie a demoler	11
Figura 1.5	Equipo recomendado a usarse en la demolición y tipo de puntas de demolición requeridas	12
Figura 1.6	Fisuración del concreto superficial (REHABILITAR, 2003)	12
Figura 1.7	Demolición del concreto con punta ancha para eliminar concreto fisurado (REHABILITAR, 2003)	12
Figura 1.8	Demolición finalizada hasta 2-3 cm por detrás de las barras de refuerzo (REHABILITAR, 2003)	13
Figura 1.9	Limpieza con chorro de agua (nótese que la demolición del concreto debe cumplir una profundidad constante)	13
Figura 1.10	Colocación del puente de adherencia en el refuerzo y la superficie de concreto	14
Figura 1.11	Procedimiento de reparación con mortero de reparación predosificado y tixotrópico en casos donde la demolición tiene un espesor de 3 cm o menor (REHABILITAR, 2003)	15

Figura 1.12	Encofrado para elementos verticales por colado <i>in situ</i> o bombeo (REHABILITAR, 2003)	15
Figura 1.13	Encofrado para elementos horizontales para diferentes sistemas de colocación del concreto de reparación (REHABILITAR, 2003)	16
Figura 1.14	Encofrado para pilas y columnas para el caso de zonas de reparación pegadas a elementos horizontales o en zonas lejanas a estos elementos (REHABILITAR, 2003)	17
Figura 2.1.	Mezcla de mortero convencional colocada en moldes	27
Figura 2.2	Resistómetro utilizado para prueba de resistividad en algunos especímenes	28
Figura 2.3	Equipo para realizar prueba de VPU	29
Figura 2.4	Ensaye de prueba PRC	29
Figura 2.5	Balanza utilizada para obtener peso sumergido de los especímenes	30
Figura 2.6	Morteros de rodajas y cubos durante prueba con técnica de Fagerlund	31
Figura 2.7	Ensayes de resistencia a la compresión	31
Figura 4.1	Relación de REH y VPU graficado (a) por edad de prueba y (b) por tipo de mortero evaluado	40
Figura 4.2	Relación de REH y RMC graficado (a) por edad de prueba y (b) por tipo de mortero evaluado	41
Figura 4.3	Relación de REH y %TV graficado (a) por edad de prueba y (b) por tipo de mortero evaluado	44

Figura 4.4	Relación de REH y ϵ_{EF} graficado (a) por edad de prueba y (b) por tipo de mortero evaluado	45
Figura 4.5	Relación de REH y PRC graficado (a) por edad de prueba y (b) por tipo de mortero evaluado	47
Figura 4.6	Relación de PRC y %TV	49
Figura 4.7	Relación de PRC y ϵ_{EF}	50
Figura 4.8	Relación entre RMC y (a) PRC, (b) %TV y (c) ϵ_{EF}	51
Figura 4.9	Relación de %TV y ϵ_{EF} graficado (a) por edad de prueba y (b) por tipo de mortero evaluado	53

Índice de tablas

Tabla 1.1	Criterios de evaluación de la durabilidad de concretos (NMX-C-514-ONNCE-2016, 2016)	18
Tabla 1.2	Criterios de evaluación por durabilidad de concretos usando valores de VPU (DURAR, 1998)	20
Tabla 1.3	Criterios de evaluación de concretos usando el método de la PRC (AASHTO T 259)	21
Tabla 1.4	Criterios de evaluación de morteros y concretos utilizando el %TV como parámetro (DURAR, 1998)	23
Tabla 3.1	Valores promedio de REH a diferentes edades	33
Tabla 3.2	Valores promedio de VPU a diferentes edades	34
Tabla 3.3	Valores promedio de RMC a diferentes edades	35
Tabla 3.4	Valores promedio de %TV a diferentes edades	36
Tabla 3.5	Valores promedio de ϵ_{EF} a diferentes edades	37
Tabla 3.6	Valores promedio de PRC a diferentes edades	38

Índice de ecuaciones

Ecuación 1.1 Resistividad eléctrica húmeda (REH)	18
Ecuación 1.2 Velocidad de propagación de onda	19
Ecuación 1.3 Porcentaje total de vacíos (%TV)	22
Ecuación 1.4 Resistencia a la penetración del agua	23
Ecuación 1.5 Coeficiente de absorción capilar	24
Ecuación 1.6 Porosidad efectiva	24
Ecuación 1.7 Absorción apilar	24

Sinopsis

A fin de seleccionar el mortero o concreto de reparación adecuado, es necesario caracterizarlo, así como determinar si su composición puede asegurar propiedades físicas y mecánicas para que éste se considere durable, con lo que se evita que el material se degrade en poco tiempo y se requiera reemplazarlo más pronto de lo esperado. En obras de rehabilitación se utilizan morteros de reparación fabricados con materiales de la región, como es la arena disponible, cemento en sacos y agua potable.

Comercialmente, existen morteros de reparación que poseen además aditivos tales como: productos epóxicos, látex, o adiciones minerales (microsilica, por ejemplo) que disminuyen la permeabilidad de los morteros anteriores, lo que posibilita incrementar la durabilidad de las reparaciones hechas con éstos.

En un trabajo previo se evaluaron, por durabilidad, morteros y *grouts* comerciales de reparación que mostraron un alto desempeño, pero no se pudieron comparar con morteros convencionales. Por lo que en esta investigación se presenta la metodología para la caracterización física y mecánica de morteros de reparación fabricados tradicionalmente, presentándose una comparativa entre estos dos tipos de mortero para sentar las bases del costo beneficio de ambos y puedan ser seleccionados para usarse en la reparación de estructuras de concreto en el sector transporte.

Abstract

For an adequate selection of repair mortar or concrete, it is necessary to characterize them and determine if their composition can ensure sufficient physical and mechanical properties to be considered as a durable material, avoiding the degradation over a short period of time. In conventional rehabilitation constructions, commonly repair mortars are manufactured with available materials: sand, commercialized cement (based on 50-kg sacks), and tap water.

There are commercial repair mortars that also integrate chemical, epoxy-based, latex-based, mineral additions (i.e., microsilica), which decrease their permeability thus, increasing the durability of repair systems commercialized.

In previous work, several commercial repair mortars and grouts showed good durability performance, but they were not comparable with conventional ones. Therefore, this investigation includes the methodology for physically and mechanically characterizing traditionally manufactured repair mortars, and results compared between these two types of mortars to lay down the bases for a life cost analysis of both mortar types so they can be selected to be used in repair of concrete-made infrastructure in the Transport Sector.

Resumen ejecutivo

En estructuras en servicio, cuyo diseño no tomó en cuenta la posible afectación de la agresividad del medio ambiente, se generan deterioros visibles que pudieran comprometer la capacidad de carga de muchas de ellas. Para el caso de estructuras en donde la corrosión del acero de refuerzo o presfuerzo aún no afecta la sección del acero de refuerzo, la rehabilitación de estructuras de concreto dañadas por corrosión se podría realizar con un procedimiento denominado parcheo. En este procedimiento se coloca un mortero o concreto de reparación en las zonas donde la corrosión del refuerzo ha generado grietas o delaminaciones del recubrimiento de concreto.

En algunas de estas obras se mejora la calidad de los morteros de reparación adquiriendo productos comerciales a los que sólo se añade agua hasta alcanzar la tixotropía necesaria para su colocación. Existen morteros de reparación comerciales que poseen, además, aditivos integrales o productos epóxicos, látex, o adiciones minerales (microsilica, por ejemplo), que disminuyen la permeabilidad de los morteros anteriores, lo que permite incrementar la durabilidad de las reparaciones hechas con éstos.

En una investigación previa se evaluaron varios morteros de reparación comerciales (Mejía *et al.*, 2018), los que mostraron tener un desempeño por durabilidad entre bueno y excelente, pero no se pudieron comparar estos resultados experimentales con los que un mortero convencional pudiera alcanzar. Por ello, en esta investigación se fabricaron dos tipos de mortero convencionales para así comparar su desempeño por durabilidad con los comerciales evaluados anteriormente, a fin de determinar las posibles mejoras de los morteros comerciales y así tener una idea más completa para poder seleccionar uno u otro tipo de mortero en función de la durabilidad de ambos morteros (convencionales vs. comerciales).

Una vez fabricados los dos tipos de morteros convencionales (bajo y mediano desempeño de 25 MPa y 40 MPa de resistencia mecánica en compresión, respectivamente), se realizaron las pruebas físicas de resistividad eléctrica húmeda (REH), velocidad de pulso ultrasónico (VPU), porcentaje total de vacíos (%TV), porosidad efectiva (ϵ_{EF}) y de resistencia mecánica a la compresión. Estas pruebas se realizaron a diferentes edades del mortero (30, 60, 90, 120 y 360 días), para así comparar los resultados obtenidos a esas edades con los morteros comerciales de la investigación previa (Mejía *et al.*, 2018). Una vez obtenidos los resultados experimentales de estos dos morteros convencionales, se realizaron gráficas de correlación entre los indicadores de durabilidad de los morteros convencionales y comerciales para determinar diferencias entre ellos.

Introducción

Uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción a nivel mundial es el concreto reforzado (CR). Sin embargo, el acero de refuerzo embebido en el mismo puede sufrir daños por corrosión a pesar de la protección física y química que el concreto pueda brindarle (Torres *et al.*, 2002; Tronconis de Rincón *et al.*, 2004, y Michel *et al.*, 2013). Dentro de las patologías por corrosión se encuentran daños como agrietamientos y manchas de óxido en la superficie de concreto. Este problema de degradación de estructuras de concreto por corrosión del acero de refuerzo se debe a la agresividad del medio ambiente al que están expuestas, así como a la inadecuada selección de los materiales, un diseño estructural ineficiente, un procedimiento constructivo inadecuado, mala supervisión durante la construcción, o la combinación de todos estos.

También se ha encontrado que la corrosión se produce porque en el diseño de las estructuras no se toman en cuenta criterios de durabilidad, sino sólo interesan las acciones mecánicas (Torres y Castro, 2018). Antes de seguir, es adecuado definir el término “durabilidad” a utilizarse a lo largo de este trabajo. La durabilidad es la capacidad del concreto para resistir acciones físicas, químicas, biológicas y climáticas, con apego a las distintas normativas nacionales e internacionales en vigor (Torres y Castro, 2018).

Es común relacionar la durabilidad de una estructura a que pueda resistir estas acciones generadas por medio de la exposición y que la vida de la estructura se divida en tres etapas o tiempos: iniciación de la corrosión (T_1), propagación de la corrosión (T_2) y vida remanente (T_3) (Torres *et al.*, 2002). La duración o suma de los tiempos de las etapas T_1 y T_2 se conoce como la vida útil de la estructura (Torres *et al.*, 2002). Cuando la vida útil de una estructura ha finalizado e inicia el periodo de vida remanente, es necesario realizar rehabilitaciones, reparaciones o refuerzos, según corresponda, en la misma (Torres *et al.*, 2002; Torres y Castro, 2018).

Estas rehabilitaciones, reparaciones o refuerzos son variados y la selección de ellos para actuar en la estructura depende de la patología y la ubicación del daño, la importancia del elemento estructural en donde apareció dicho daño, o la disponibilidad de los materiales o sistemas de rehabilitación, reparación o refuerzo que puedan utilizarse, entre otros factores. Uno de estos sistemas más utilizado para realizar rehabilitaciones, reparaciones o refuerzos es el conocido como reparación localizada o simplemente parcheo, el cual utiliza un mortero o concreto de reparación cuando la patología de daño es una de tipo localizada: una pequeña región dañada del elemento a reparar.

Existen trabajos de investigación en los cuales se ha utilizado mortero de reparación para elementos estructurales como las traveses de concreto reforzado. Dichos morteros varían en su composición y típicamente se usan dos tipos: mortero comercial y mortero local fabricado con materiales de la región. (Malumbela *et al.*, 2010; Hernández, 2009, y Muñoz, 2009).

Malumbela *et al.*, (2010) repararon cinco traveses utilizando mortero de reparación con cemento disponible localmente. Las reparaciones se realizaron utilizando un aditivo recomendado por el proveedor del cemento, cuyas recomendaciones se observaron.

Por otro lado, Hernández (2009) reparó ocho traveses con mortero de reparación relación a/c de 0.58 y resistencia a la compresión de 400 kg/cm², y adicionó microsilíce en diferentes proporciones. Se realizaron pruebas para la determinación de cloruros y la pérdida de sección del acero de refuerzo.

Muñoz (2009) reparó seis traveses con mortero de reparación Sika Monotop 610, para aplicar al acero, y Sika Monotop 612 para la mezcla de mortero de reparación.

De dichos estudios, se concluye que el elemento estructural reparado con mortero y adiciones de microsilíce presentó un mejor comportamiento físico-químico, mecánico y electroquímico. Sin embargo, se afirmó que el método de reparación no controló la corrosión de las barras contaminadas con cloruros. (Malumbela *et al.*, 2010; Hernández, 2009 y Muñoz, 2009).

Los morteros de reparación tienen como característica principal que, generalmente, presentan altas resistencias y fluidez, granulometría controlada, aditivos fluidificantes y reductores de agua de alto rango (Mejía *et al.*, 2018).

Debido a la gran variedad de morteros comerciales y convencionales que se podrían utilizar para las reparaciones en estructuras de CR, y los pocos trabajos de investigación con temas de reparación en los cuales se involucren conceptos de durabilidad, se considera necesario realizar pruebas de durabilidad y resistencia mecánica a dos tipos de morteros: comerciales y locales con materiales de la región. En ese sentido, la presente investigación tiene por objetivo tratar de preparar un estudio comparativo entre los dos tipos de morteros señalados y verificar si los morteros para reparación, rehabilitación o refuerzo fabricados con materiales convencionales, y más económicos que los comerciales, poseen propiedades durables similares a los morteros convencionales.

1 Antecedentes

1.1 Patologías en estructuras de concreto reforzado

La resistencia del concreto depende notablemente de muchos factores determinados por los ingredientes y las condiciones de temperatura y humedad bajo las cuales se curó (Neville, 1992). El deterioro del concreto reforzado se debe principalmente a causas mecánicas, naturaleza del concreto y agentes externos del medio.

1.1.1 Causas mecánicas

Las estructuras de concreto se diseñan para tener un mecanismo de falla dúctil: acero y concreto fallan al mismo tiempo y generan deformaciones visibles en el elemento de concreto antes de su falla (“avisan” antes de colapsarse, lo que permite alejarse del lugar para ponerse a salvo). Sin embargo, a lo largo de su vida útil, estas estructuras pueden estar sometidas a acciones para las cuales no fueron diseñadas, como es el caso de sobrecargas, impactos accidentales, sismos de gran magnitud, huracanes o simplemente las fuerzas de tensión ocasionadas por productos de corrosión internos o reacciones químicas de los productos de hidratación con sulfatos o agregado reactivo a los álcalis, lo que ocasiona fallas que se manifiestan con agrietamientos, deformaciones excesivas, vibraciones, colapsos, etc. (Neville, 1992).

1.1.2 Causas ambientales

Reacciones debidas a los materiales del concreto. Aunque por lo general se considera que el agregado es un material inerte, ciertos tipos de éstos no lo son y pueden reaccionar con el cemento Portland causando expansión y, con ello, agrietamiento y desprendimiento (Neville, 1992). Otra reacción de importancia es la reacción álcali-sílice de los agregados. Algunos agregados que contienen sílice son susceptibles de ser atacados por los álcalis que se encuentran en la pasta de cemento. La reacción produce una pasta que absorbe cantidades de agua considerables con un aumento de volumen y con los consecuentes agrietamientos (Neville, 1992). Otro aspecto a considerar son los efectos de la temperatura y humedad. El volumen de concreto en estado fresco se reduce en pocas horas debido al asentamiento de los sólidos. Una parte del agua es absorbida por los agregados, mientras que otra se absorbe por la superficie del terreno y una parte del agua del sangrado se pierde por evaporación (Neville, 1992). Al evaporarse el agua de la superficie se producen algunos tipos de grietas debido a que la

evaporación del agua es mayor que la rapidez con la que asciende el agua del sangrado (Neville, 1992).

1.1.3 Agentes externos del medio

Conocido también con el nombre de intemperismo, este fenómeno se debe a la exposición al medio ambiente y consiste en cambios de apariencia de la superficie del concreto debido a efectos de la lluvia, hielo, sol y contaminación atmosférica (Neville, 1992).

Por otro lado, el concreto también se ve afectado por sustancias químicas en solución que sobrepasan un determinado nivel de concentración. El ataque de sustancias químicas sobre el concreto es, por lo general, el resultado de su exposición a sulfatos o ácidos (Neville, 1992).

1.1.4 Corrosión

Proceso de deterioro y destrucción de un material (generalmente un metal) o de sus propiedades debido a su reacción con el medio ambiente. Con el tiempo, un metal corroído se desintegra como cualquier otro material en cuya obtención se haya ejercido una gran energía. La cantidad de energía requerida para la extracción del metal varía de elemento a elemento; sin embargo, al separarse, todos los metales almacenan energía, originando, de este modo, una tendencia a regresar a su estado original, es decir oxidándose. La corrosión ocasiona que el metal regrese a su estado más estable; en otras palabras, ocasiona que los metales regresen a su estado original (Castro, 1998).

1.1.4.1 Corrosión electroquímica

En presencia de un medio acuoso, la corrosión es de naturaleza electroquímica. Para que pueda ocurrir la corrosión electroquímica se necesita de cuatro elementos para formar la llamada pila de corrosión o pila galvánica: la existencia de una zona anódica (donde ocurre la reacción de oxidación y en la cual se liberan electrones como consecuencia del paso del metal en forma de iones, al electrolito); una zona catódica, donde ocurre la reducción (en éste la corriente eléctrica sale del electrolito para entrar en el metal); el medio conductor (llamado electrolito) que los ponga en contacto eléctrico, y para cerrar el circuito, un conductor eléctrico que una el cátodo y el ánodo (DURAR, 1998).

1.1.4.2 Corrosión uniforme

Todas las áreas del metal se corroen en la misma proporción o en una muy similar (DURAR, 1998).

1.1.4.3 Corrosión localizada

Ciertas áreas del metal parecen corroerse en proporciones superiores que otras debido a las heterogeneidades en el metal, el medio ambiente o la geometría de las

estructuras en conjunto. El ataque puede ir de ligeras localizaciones a picaduras (DURAR, 1998).

1.1.4.4 Corrosión por picaduras

El ataque es altamente localizado en áreas específicas que producen hoyos pequeños, mismos que penetran en el metal y pueden llevar a su (DURAR, 1998).

1.1.4.5 Corrosión bajo esfuerzo

Es otra forma de ataque localizado; sin embargo, se requieren dos factores fundamentales: la presencia de un medio corrosivo específico y la presencia de esfuerzos a tensión, ya sean aplicados o residuales en el material (DURAR, 1998).

Existen otros tipos de corrosión: corrosión bimetalica o galvánica, corrosión en grietas o hendiduras, corrosión intergranular, corrosión bacteriológica y corrosión en espacios confinados, pero en este caso de estudio sólo se aplican las descritas con anterioridad.

1.2 Durabilidad

La durabilidad del concreto base cemento Portland se define como su capacidad para resistir la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro; es decir, el concreto durable retendrá su forma original, su calidad y su servicio, cuando se exponga al medio ambiente (DURAR, 1998).

1.2.1 Factores que influyen en la durabilidad del concreto

Los factores principales que pueden influir sobre la durabilidad del concreto incluyen las propiedades físicas del concreto endurecido, los materiales componentes de los cuales se produjo el concreto, los métodos de fabricación y construcción aplicados y la naturaleza de las influencias de deterioro. En aras de una buena durabilidad, el concreto debe tener una baja relación agua/cemento, amén de producirse con materiales de buena calidad seleccionados adecuadamente; ser denso y estar bien hecho, y curarse en forma apropiada. En sitios donde se registre congelación y deshielo, el concreto debe contener entre el 4 y 6% de aire incluido (Neville, 1992). La evaluación de la durabilidad del concreto puede comprender también un estudio de las propiedades elásticas, plásticas y térmicas de los componentes y de las incompatibilidades posibles (Neville, 1992).

1.2.2 Transporte de fluidos en el concreto

Son tres los fluidos más importantes que pueden introducirse en el concreto, a saber: agua —pura o con iones agresivos—, dióxido de carbono y oxígeno. Estas sustancias se pueden mover a través del concreto de diferentes maneras, pero todo el transporte depende de la pasta de cemento hidratado. La durabilidad del concreto depende de manera importante de la facilidad con la cual los fluidos, tanto líquidos como gases, pueden introducirse en el concreto y moverse a través de él, fenómeno conocido como “permeabilidad del concreto”. El movimiento de los fluidos a través

del concreto sucede no solamente por el flujo a través del sistema de poros, sino también por la difusión y la absorción o la adsorción. La permeabilidad se refiere al flujo sujeto a un diferencial de presión. Difusión es el proceso en el cual el flujo se mueve sujeto a un diferencial en concentración; la propiedad importante del concreto es la difusividad. El término “permeabilidad” aceptado comúnmente se utilizará para el movimiento total de fluidos hacia adentro y a través del concreto, excepto cuando, por razones de claridad, necesite hacerse distinción entre los tipos de flujo.

1.2.3 Permeabilidad

La permeabilidad se define como la propiedad que rige la velocidad de flujo de un fluido en un sólido poroso (Neville, 1992).

Cuando la relación a/c es alta y el grado de hidratación es bajo, la pasta de cemento tendrá una alta porosidad capilar; contendrá un número relativamente grande de poros grandes y bien conectados; por lo tanto, su coeficiente de permeabilidad será alto. Los poros importantes para la permeabilidad son aquellos con un diámetro de al menos 120 o 160 μm . Estos poros han de ser continuos. Los poros que no son efectivos en términos de fluidez, esto es, respecto a permeabilidad, incluyen, además de los poros discontinuos, aquellos que contienen agua adsorbida y aquellos con una entrada angosta, aún si los poros mismos son grandes. (Neville, 1992).

El agregado también puede contener poros, pero éstos suelen ser discontinuos. Además, las partículas de agregado —al ser envueltas por la pasta de cemento— no contribuyen a la permeabilidad del concreto.

1.2.4 Conceptos básicos de durabilidad

1.2.4.1 Vida útil

Periodo en que la estructura cumple con los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento. Estos conceptos básicos se han extendido también a la consideración de durabilidad, de tal forma que se incluyen las acciones del medio ambiente entre las posibles solicitaciones a las que la estructura estará sometida. (DURAR, 1998).

Se considera que la estructura mantiene las características definidas en el proyecto, mientras el deterioro no alcance un cierto valor límite que dependerá de muchos factores: tipo de elemento estructural, consideraciones estéticas, riesgo de desprendimiento de trozos de concreto, etc. Este valor límite puede ser diferente para cada elemento estructural (Torres y Martínez, 2001).

1.2.4.2 Vida residual

Se entiende por vida residual el tiempo a partir del momento en que la estructura alcanza el anterior límite inaceptable. Durante este periodo residual se suele

acometer la reparación de la estructura o se interviene en ella para restituir condiciones de seguridad, funcionalidad o estética lo más similares o incluso superiores a las de proyecto (Torres y Martínez, 2001). La vida residual se puede estimar de forma simplificada considerando los siguientes pasos:

1. Inspección: clasificación de daños mediante análisis *in situ* y toma de muestras
2. Diagnóstico: cuantificación de daños
3. Prognosis: establecimiento de niveles de riesgo y urgencia de intervención
4. Selección del método de reparación
5. Seguimiento y mantenimiento

1.3 Reparación y protección de estructuras de concreto

El concreto es un material relativamente barato y de fácil disponibilidad, además de tener una amplia diversidad de propiedades y características atractivas que lo hacen conveniente para una gran variedad de aplicaciones de la construcción. Las estructuras de concreto son durables, pero no infalibles a la agresividad del medio ambiente al que son expuestas. Los compuestos hidratados altamente alcalinos de la pasta de cemento pasivan la superficie del acero, pero a veces los poros formados durante el endurecimiento del concreto permiten que los iones agresivos (por ejemplo, Cl⁻) se acumulen sobre la superficie del acero y rompan la película pasiva iniciando las reacciones de óxido-reducción.

A fin de evitar tal deterioro se han concebido diversos métodos para extender la vida de servicio de estas estructuras, con lo cual se minimizan los daños y costos generados por la corrosión del acero de refuerzo o preesfuerzo. Dichas técnicas se pueden aplicar en el concreto (disminución de porosidad, incremento del espesor de recubrimiento, inhibidores de corrosión, etc.) o sobre el acero de refuerzo (recubrimientos plásticos y metálicos, refuerzos resistentes a la corrosión como acero inoxidable o compuestos de fibras de carbono).

No obstante, en estructuras en servicio, cuyo diseño no tomó en cuenta la posible afección de la agresividad del medio ambiente, se generan deterioros visibles que pudieran comprometer la capacidad de carga de muchas de ellas.

Una vez comprometida la estructura al presentarse daños de consideración en el recubrimiento del concreto o la sección del acero de refuerzo, es necesario intervenirla con procedimientos de rehabilitación y, en muchos casos en los que la capacidad de carga se ha mermado considerablemente, ha de considerarse el recrecido de secciones de concreto, la restitución del acero de refuerzo y, en muchos otros casos, el uso de refuerzos externos a base de materiales de última generación, como el caso de compuestos a base de fibras de carbono.

Para el caso de estructuras donde la corrosión aún no afecta la sección del acero de refuerzo, la rehabilitación por corrosión se podría realizar con un procedimiento denominado parcheo. En este procedimiento se coloca un mortero o concreto de reparación en las zonas donde la corrosión del refuerzo ha generado grietas o delaminaciones del recubrimiento de concreto. Pero son pocos los especialistas dedicados a rehabilitar estructuras de concreto con conocimientos sobre el procedimiento adecuado de parcheo que asegure que este mortero/concreto de reparación se fabrique y coloque adecuadamente, para evitar que en un par de años vuelvan a aparecer grietas o delaminaciones en los mismos lugares donde se rehabilitó la estructura. A continuación, se explica el procedimiento para la reparación localizada de estructuras dañadas por corrosión (Torres *et al.*, 2012).

1.3.1 Levantamiento de daños e inspección en detalle

El levantamiento de daños es el primer paso a efectuar en el diagnóstico de una estructura en servicio (DURAR, 1998). Durante este levantamiento se observan los problemas de agrietamiento, desprendimientos del recubrimiento de concreto y manchas por corrosión de la estructura en estudio. Los resultados obtenidos en el levantamiento de daños de la estructura se pueden dividir en fisuras (grietas), desprendimientos del recubrimiento y manchas de óxido (Figura 1.1). De acuerdo con la patología encontrada, el evaluador (o inspector) define las razones por las que estas fisuras se generaron: estructurales, desecamiento acelerado (contracción plástica) o por corrosión. La Figura 1.1 muestra fotografías tomadas en un muelle mexicano donde se aprecian estos problemas de corrosión del refuerzo en las vigas de la subestructura del mismo.



Figura 1.1 Fotografías obtenidas en el levantamiento de daños de un muelle mexicano

Una vez revisada la estructura, se debe realizar un levantamiento de daños mediante la generación de los planos de ubicación de los daños encontrados. La Figura 1.2 muestra como ejemplo dos zonas de la subestructura del muelle evaluado, junto con la simbología utilizada para definir el tipo de daño y su localización.

Determinada la extensión del daño, el siguiente paso es realizar una inspección en detalle de la estructura evaluada con la cual se obtiene información sobre el tipo de material usado en su construcción, principalmente las propiedades físicas y mecánicas del concreto y caracterización electroquímica del acero de refuerzo de la misma.

Las pruebas realizadas para caracterizar física y mecánicamente el concreto de la estructura en estudio se efectúan mediante la extracción de testigos cilíndricos (corazones) de 5 a 8 cm de diámetro y 15 a 25 cm de longitud. Estas pruebas de caracterización incluyen: resistividad eléctrica húmeda, porcentaje total de vacíos, profundidad de carbonatación, perfil de concentraciones de cloruros, resistencia a la tensión diametral y resistencia a la compresión.

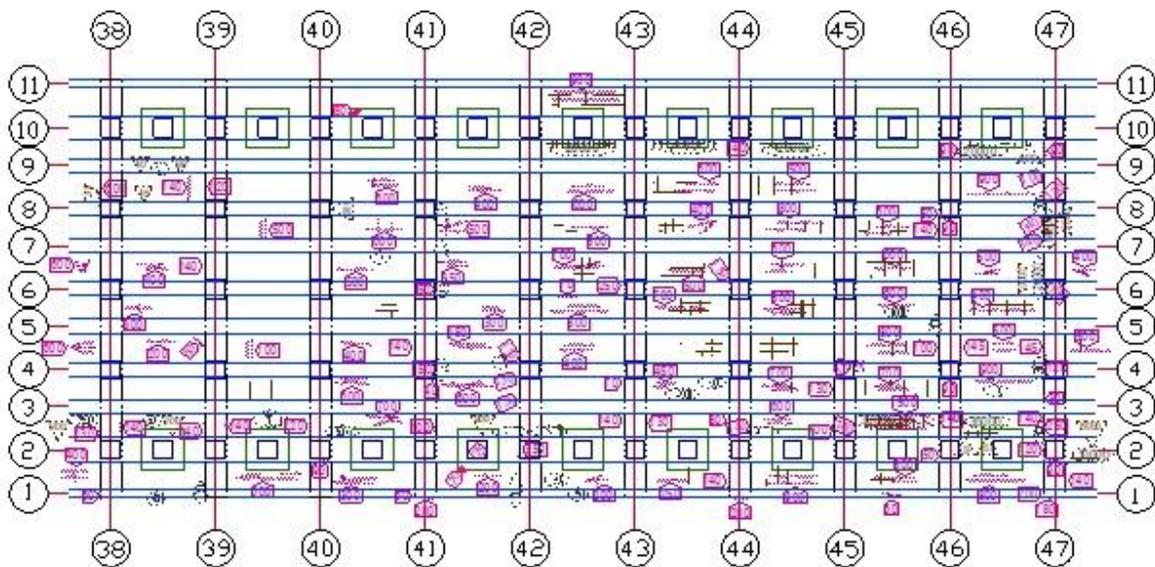


Figura 1.2 Detalle del plano del levantamiento de daños de una zona de un muelle mexicano

Las pruebas electroquímicas realizadas al acero de refuerzo para conocer su activación electroquímica incluyen: potencial de media celda y velocidad de corrosión en zonas localizadas. Estos valores se obtienen para definir las zonas activas por corrosión y la cinética de este proceso de degradación.

Los resultados de estas pruebas al concreto y el acero, conjuntamente con el levantamiento de daños, se utilizan para definir el sistema de rehabilitación a usarse en la rehabilitación, reparación o refuerzo de la estructura evaluada. Si la

información obtenida en la inspección en detalle permite definir el uso del sistema de rehabilitación con mortero o concreto de reparación (en caso de que la extensión del daño no sea tan severa o generalizada), y si el acero descubierto durante las pruebas electroquímicas mostró un deterioro marginal por corrosión, el método más común es el de parcheo.

1.3.2 Procedimiento de rehabilitación

Una vez determinado que el muelle en estudio se encontraba en etapa de propagación de la corrosión y que se han generado daños de consideración en algunos de los elementos de su subestructura, se definieron los conceptos para su rehabilitación. El procedimiento de rehabilitación se dividió en los siguientes pasos: delimitación de la superficie a demoler, demolición del recubrimiento de concreto hasta exponer el acero afectado, limpieza del refuerzo descubierto con chorro de agua, preparación de la superficie de concreto, refuerzo con puente de adherencia e inhibidor de corrosión, cimbrado de la zona a reparar, colocado del mortero o concreto de reparación, curado y limpieza del área.

Cada una de estas etapas se explicará con detenimiento para definir algunos puntos que se omiten en muchas de las obras de rehabilitación de estructuras de concreto dañadas por corrosión, haciendo que en éstas aparezcan de nuevo daños producto de la mala limpieza del refuerzo corroído, inadecuado procedimiento de cimbrado, mala colocación del mortero o concreto de reparación, etcétera.

1.3.3 Delimitación de la superficie

El contratista deberá delimitar la superficie que requerirá la demolición del concreto (figura 1.3). Esta delimitación de la superficie a reparar se realizará con un sondeo acústico con un martillo, golpeando la superficie de concreto alrededor de la zona que visiblemente se encuentre dañada. Si el concreto está delaminado, se percibe un sonido diferente entre concreto sólido y delaminado. A este sonido lo definiremos como sonido “fofo”. Hasta que el sonido que produzca el martillo suene sólido, se dibujará una línea para separar la zona de concreto con sonido sólido y sonido “fofo”.

Las líneas de delimitación deben definir áreas regulares, sin recovecos, y rectangulares o cuadradas. La Figura 1.3 muestra una delimitación adecuada. La zona marcada en la foto representa la zona a demoler (ver Figura 1.4).



Figura 1.3 Delimitación de superficie (REHABILITAR, 2003)



Figura 1.4 Cortadora eléctrica manual y ejemplo de delimitación de la superficie a demoler

1.3.4 Demolición del concreto

Una vez separada el área a demoler y la porción sana del elemento estructural, se deberá retirar el concreto dañado por medios mecánicos de peso ligero (Figura 1.5). El concreto delimitado se debe remover en dos etapas utilizando un martillo neumático manual de poco peso. En la primera etapa, el martillo deberá utilizar un cincel de punta aguda, para agrietar el concreto a una profundidad aproximada de 2 cm (Figura 1.6). En la segunda etapa (Figura 1.7), el cincel deberá ser de punta plana para escarificar el concreto preagrietado. Estas dos etapas deberán repetirse las veces que sea necesario hasta llegar a la profundidad del acero de refuerzo, en donde se deberá prestar mucho cuidado para evitar dañarlo con el cincel.



Figura 1.5 Equipo recomendado a usarse en la demolición y tipo de puntas de demolición requeridas

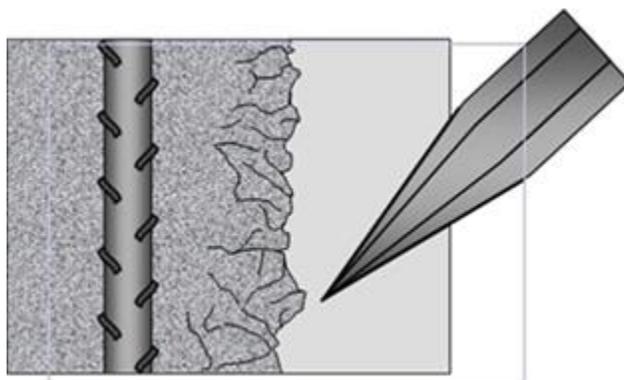


Figura 1.6 Fisuración del concreto superficial (REHABILITAR, 2003)

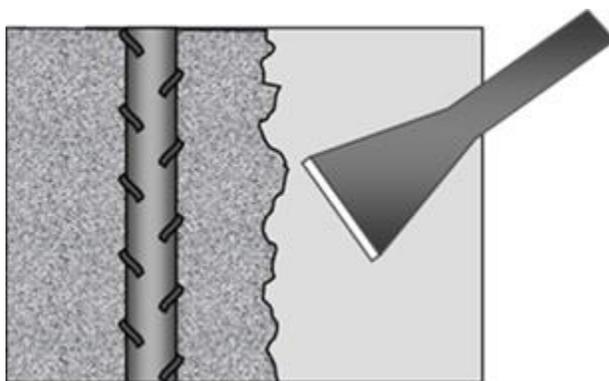


Figura 1.7 Demolición del concreto con punta ancha para eliminar concreto fisurado (REHABILITAR, 2003)

Las actividades descritas en las Figura 1.6 y Figura 1.7 se deberán repetir hasta llegar a la profundidad establecida en la Figura 1.8 (a una profundidad de entre 2 y 3 cm más que el acero de refuerzo longitudinal). Este procedimiento es el que ha

demostrado proporcionar un avance más rápido. La superficie final de la demolición deberá ser lo suficientemente rugosa para recibir el concreto o mortero de reparación, por lo que se recomienda el uso del demoledor mecánico en ángulos de 45 grados para que formen una superficie que funcione como anclaje del material de reparación al colocarse sobre ésta.

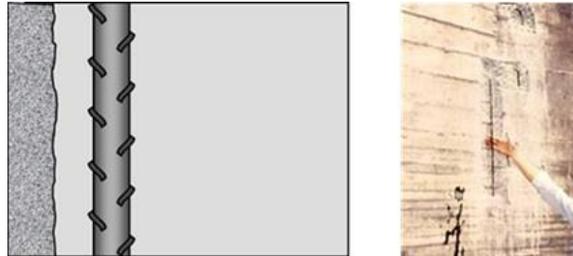


Figura 1.8 Demolición finalizada hasta 2-3 cm por detrás de las barras de refuerzo (REHABILITAR, 2003)

1.3.5 Limpieza de la superficie del refuerzo y superficie del concreto

Posteriormente, se realizará la limpieza de la superficie del concreto por medio de un chorro de agua, libre de cloruros, a una presión del orden de 6,000 psi, para eliminar cáscaras de concreto que pudieran haber quedado adheridas al elemento a reparar, así como polvo de concreto producto de la herramienta utilizada. En la Figura 1.9 se muestra un croquis de esta actividad. Es imperioso el uso de agua libre de cloruros, y el contratista deberá comprobar, mediante análisis químicos, que el agua cumple con este requisito.



Figura 1.9 Limpieza con chorro de agua, nótese que la demolición del concreto debe cumplir una profundidad constante

Esta actividad lógicamente limpiará también las barras de refuerzo que hubieren quedado expuestas en esta zona, pero este refuerzo deberá limpiarse con una presión mayor (12,000 a 15,000 psi) para eliminar los productos de corrosión que

podieran presentarse en el refuerzo expuesto al ambiente marino de manera directa o que haya sufrido corrosión dentro del mismo elemento de concreto.

1.3.6 Colocación de puente de adherencia

Deberá colocarse un puente de adherencia en toda la superficie del concreto en las zonas de demolición antes del encofrado (cimbrado) de las secciones a reparar (Figura 1.10). Por ello, este puente de adherencia puede seguir funcionando por tiempos mayores a horas, pero máximo tres días o según el instructivo del producto. Es deseable que el puente de adherencia contenga inhibidores de corrosión para pasar la zona anódica reparada pues es común que iones de cloruro queden incrustados en la superficie del acero.



Figura 1.10 Colocación del puente de adherencia en el refuerzo y la superficie de concreto

1.3.7 Colocación del mortero o concreto de reparación

Una vez limpia la zona a rehabilitar, se realizará la colocación y habilitado de la cimbra. En esta actividad es obligatorio que el contratista considere utilizar encofrados metálicos para evitar los aplanados posteriores en caso de uso de cimbra común. El tipo y forma de encofrado podrá variar en función del tamaño de la zona a reparar y si es sobre las vigas secundarias de sección rectangular o vigas principales de sección "T" invertida. También se está considerando la reparación de las losas, por lo que debe considerarse cimbra metálica en losa.

Como se espera que la mayoría de las áreas de demolición tengan un espesor de 3 cm, el material de reparación deberá ser con agregado fino, es decir, un mortero o microconcreto (concreto con tamaño máximo de agregado de 1 cm de diámetro nominal [3/8 pulgada]). Por ello, el encofrado metálico podría ser como se muestra en la Figura 1.11. Este encofrado es adecuado para una rehabilitación con mortero o microconcreto de reparación, trabajable con las manos (con guante de protección), de tal manera que se vayan rellenando los espacios y retacando con la misma mano. Será hasta el final cuando pueda utilizarse una llana metálica para dar un acabado final fino.



Figura 1.11 Procedimiento de reparación con mortero predosificado y tixotrópico en casos donde la demolición posee un espesor de 3 cm o menor (REHABILITAR, 2003)

Si la sección a reparar presenta un espesor mayor que 3 cm y menor que 10 cm, se tendrá que utilizar un encofrado especial, como se muestra en la Figura 1.12 para elementos verticales como columnas o pilas y muros para elementos horizontales con escaso espacio para el colado.

En los casos en que el contratista utilice un método de colocado del material de reparación por bombeo, la cimbra deberá estar sellada en su totalidad para evitar fugas del material. Si se selecciona un material de consistencia normal para la reparación, el encofrado deberá tener en la parte superior un embudo para la salida de aire (ver Figura 1.12 a Figura 1.14).

Para encofrados de zonas a reparar muy cercanas a elementos horizontales (losas principalmente), se deberá abrir un orificio en la losa con un extractor de corazones para hacer un conducto por donde el material de reparación pueda colocarse en la sección a reparar (ver Figura 1.13 y Figura 1.14).

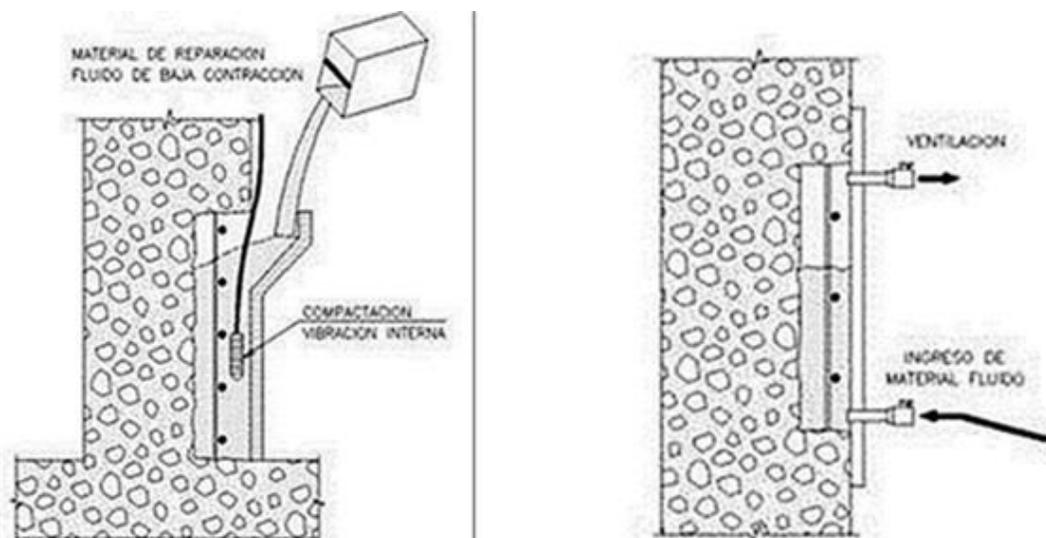


Figura 1.12 Encofrado para elementos verticales por colado *in situ* o bombeo (REHABILITAR, 2003)

1.3.8 Suministro y colocación de concreto de consistencia fluida

En esta actividad se define el uso de un concreto o mortero en función del espesor de la zona a reparar. Se debe usar un mortero de consistencia tixotrópica (no fluido) cuando el espesor de la reparación es menor o igual a 3 cm, un microconcreto (tamaño máximo de agregado de 1 cm) en zonas de reparación con espesor mayor que los 3 cm, pero menor que los 10 cm, y un concreto de reparación de agregado máximo de 13 mm (1/2 pulgada) con revenimiento no mayor que 10 cm.

El material de reparación, ya sea mortero o concreto, deberá cumplir un valor de resistividad eléctrica, a los 28 días y saturado de agua libre de cloruros, no menor que 50 k Ω -cm y un porcentaje total de vacíos no mayor que 15%. La relación agua/cemento no deberá sobrepasar un valor de 0.45, por lo que deberá utilizarse un reductor de agua dependiendo de las especificaciones del fabricante del material. El material de reparación seleccionado deberá tener bien definido su proceso de curado, para evitar un resquebrajamiento o figuración por contracción térmica o por secado acelerado.

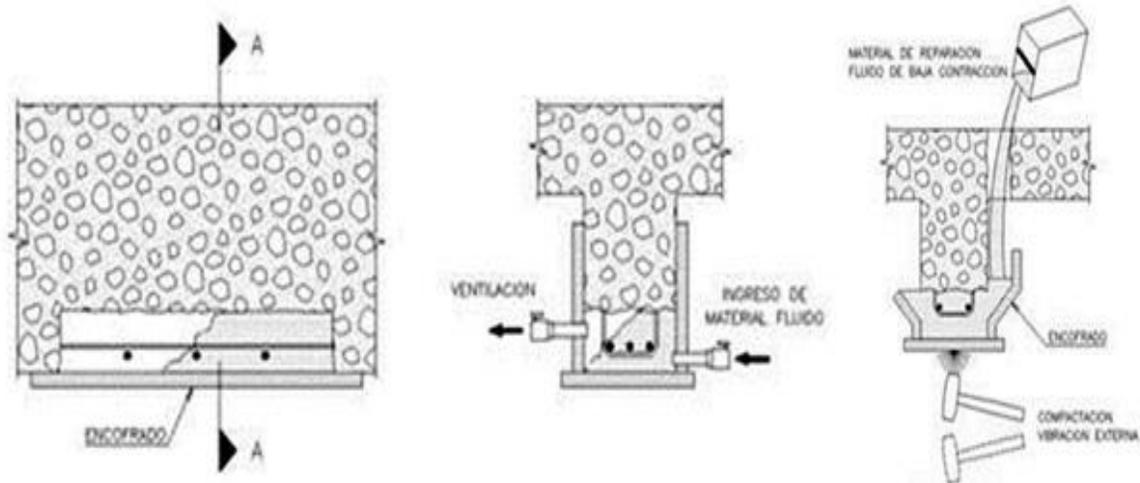


Figura 1.13 Encofrado para elementos horizontales para diferentes sistemas de colocación del concreto de reparación (REHABILITAR, 2003)

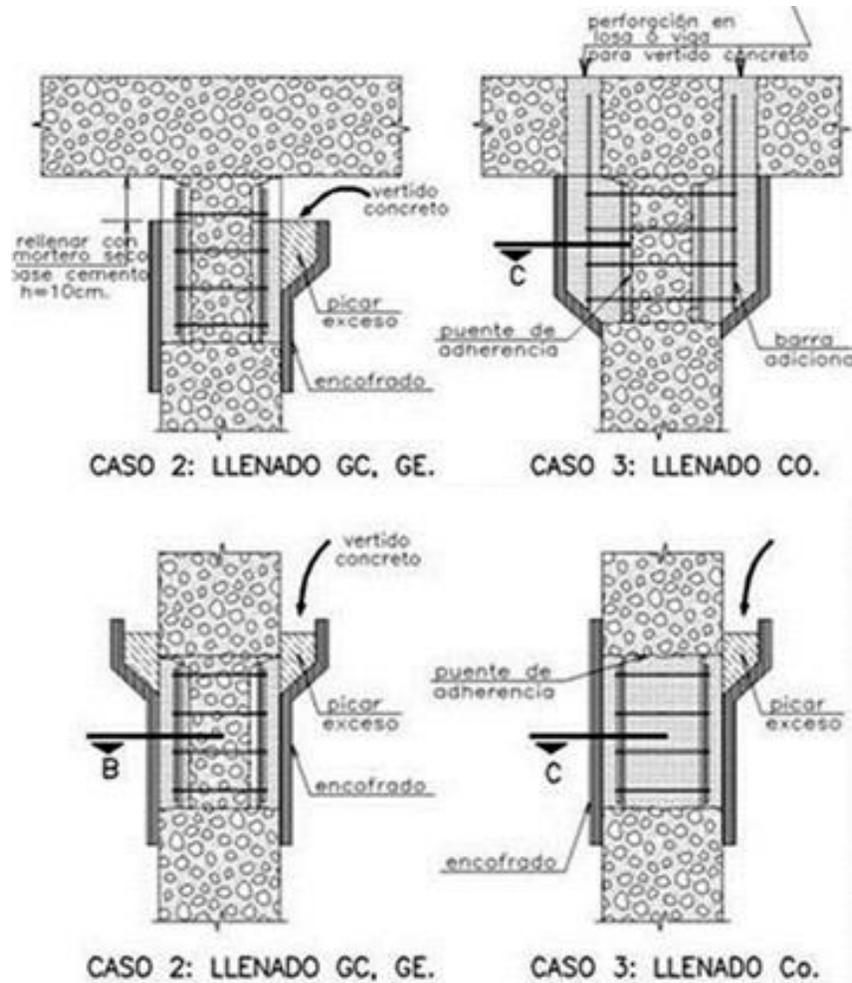


Figura 1.14 Encofrado para pilas y columnas en zonas de reparación pegadas a elementos horizontales o zonas lejanas a estos elementos (REHABILITAR, 2003)

Una vez colocado el mortero o concreto de reparación, se recomienda mantener el material cubierto por la misma cimbra o molde, o colocando películas plásticas o de polietileno, que evite que el agua de la mezcla se pierda por un secado acelerado por radiación directa del sol o viento seco. De esta manera, se evitará un secado excesivo del material que, a su vez, pueda generar fisuras en el mismo. El periodo de protección contra la pérdida de agua puede variar dependiendo de los parámetros meteorológicos del lugar en donde se efectúa la rehabilitación, pero éste, no debe ser menor que siete días a partir de su colocación.

1.4 Pruebas para la caracterización física y mecánica de los morteros de reparación

1.4.1 Resistividad eléctrica húmeda (REH)

Propiedad de cada material, recíproca a la conductividad, cuya unidad de medida es el $k\Omega\text{-cm}$ u $\Omega\text{-m}$ (DURAR, 1998), la resistividad eléctrica depende en gran medida del grado de saturación de los poros del concreto, la hidratación de la pasta y las sales disueltas en la fase acuosa, y se ve afectada por algunas variables como la relación agua/cemento, tipo de cemento y porosidad, entre otras.

Con base en el procedimiento del *Manual DURAR* (2000), para concluir con el valor final de la REH se usa la Ecuación 1.1, obteniéndolo en unidades $k\Omega\text{-cm}$.

$$\rho = R(A/L)$$

Ecuación 1.1 Resistividad eléctrica húmeda (REH)

Donde:

R = Lectura del equipo ($k\Omega\text{-cm}$)

A = Área transversal del espécimen (cm^2)

L = Longitud del espécimen (cm)

No existe un acuerdo de carácter general entre los diferentes investigadores acerca del nivel límite de resistividad eléctrica por encima del cual el riesgo de corrosión del refuerzo puede considerarse despreciable. Sin embargo, la práctica ha demostrado que pueden utilizarse como criterio general los valores de la tabla 1.1, basada en la nueva normativa mexicana de durabilidad (NMX-C-514-ONNCCE-2016, 2016).

1.4.2 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

Ensayo no destructivo que ayuda a verificar la homogeneidad, detectar fallas internas (fisuras, vacíos y otras imperfecciones) y monitorear las variaciones en las propiedades del mortero en el tiempo (Mejía *et al.*, 2018).

Tabla 1.1 Criterios de evaluación de la durabilidad de concretos (NMX-C-514-ONNCE-2016, 2016)

Resistividad	Características del concreto
> 100 kΩ-cm	El concreto es muy denso, por lo que su porosidad interconectada es extremadamente baja, al igual que el transporte de agentes agresivos 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 kΩ-cm a 100 kΩ-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 kΩ-cm a 50 kΩ-cm	El concreto tiene una porosidad interconectada de consideración, lo que permite que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo sea rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son moderadas o altas en concretos carbonatados o con cloruros.
< 10 kΩ-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-ONNCE-2015 (véase en referencias) refleja la cota superior de la velocidad de corrosión en ese concreto para un determinado contenido de cloruros o nivel de carbonatación.

La velocidad de pulso ultrasónico se define como la relación que existe entre la distancia del viaje, a través del mortero, de una onda ultrasónica y el tiempo que tarda en recorrerla. Un impulso eléctrico generado por una unidad central se transmite a un emisor que (a través del mortero) excita un bloque de cristales, hasta que el receptor lo detecta. Aquí el pulso ultrasónico se convierte en un impulso eléctrico, el cual se registra en un osciloscopio. El tiempo entre la carga inicial y la recepción del pulso se mide electrónicamente. La longitud de la trayectoria entre los transmisores, dividida entre el tiempo de viaje, equivale a la velocidad promedio de la propagación de onda, como se indica en la Ecuación 1.2. (ASTM C597-02, 2002).

$$V = \frac{d}{t}$$

Ecuación 1.2 Velocidad de propagación de onda

Donde:

V = Velocidad (m/s)

d = Distancia (m)

t = Tiempo (s)

Existen varios criterios de evaluación, y se muestran en la Tabla 1.2 (DURAR, 1998).

Tabla 1.2 Criterios de evaluación por durabilidad de concretos usando valores de VPU (DURAR, 1998)

Velocidad de pulso ultrasónico [km/s]	Calidad del concreto
<2,000	Deficiente
2,001 a 3,000	Normal
3,001 a 4,000	Alta
>4,000	Durable

1.4.3 Permeabilidad rápida de cloruros (PRC)

Además de cubrir la determinación de la conductividad eléctrica del concreto para proporcionar una rápida indicación de su resistencia a la penetración de los iones de cloruro, este método de prueba es aplicable para los tipos de concreto donde se han establecido la correlación entre este método de prueba y la acumulación a largo plazo de cloruros, tales como las descritas en AASHTO T 259 (2002). Este método de prueba cubre la evaluación en laboratorio de la conductancia eléctrica de las muestras de concreto para proporcionar una referencia rápida de su resistencia a la penetración de los iones de cloruro. En la mayor parte de los casos, los resultados de conductancia eléctrica obtenidos han mostrado correlación con el cloruro contenido en prueba.

Este método es adecuado para la evaluación de materiales y aquellos proporcionados con propósitos de diseño, investigación y desarrollo. La edad de las muestras tiene efectos significativos en los resultados de prueba, dependiendo del tipo de concreto y el procedimiento de curado. La mayor parte de los concretos, si se curan correctamente, son progresiva y significativamente menos permeables con el tiempo.

Originalmente, este método se concibió para evaluaciones generales de materiales, aunque con la práctica ha evolucionado con el uso y ahora se emplea en aplicaciones como control de la calidad y pruebas de aceptación. En tales casos es imperativo que los procedimientos de curado y la edad de los especímenes se

identifiquen claramente. La Tabla 1.3 proporciona una referencia cualitativa de los resultados obtenidos en la prueba y la penetración del ion cloruro en el concreto.

Tabla 1.3 Criterios de evaluación de concretos usando el método de la PRC (AASHTO T 259, 2002)

Corriente medida [Coulomb]	Penetración de ion cloruro
>4,000	Alta
2,000–4,000	Moderada
1,000–2,000	Baja
100–1,000	Muy baja
<100	No significativa

Se debe tener cuidado al interpretar resultados de esta prueba cuando se use en concretos con superficie tratada, por ejemplo, concretos tratados con selladores. Los resultados de esta prueba en ciertos tipos de concretos indican una baja resistencia a la penetración del ion cloruro en muestras de control, mientras que pruebas realizadas en especímenes sometidos a 90 días en solución de cloruros muestran una resistencia más alta.

1.4.4 Porcentaje total de vacíos (%TV)

La porosidad corresponde a los espacios vacíos que quedan en la pasta del concreto o mortero a consecuencia de la evaporación del agua excedente del amasado y del aire encapsulado a la hora de su manipulación.

En función de su tamaño y características, los poros se clasifican de la siguiente manera:

- Poros de gel: son aquellos que quedan atrapados durante el proceso de la formación del gel, y quedan aislados entre sí y del exterior. Estos poros están presentes en el gel independiente a la relación agua-cemento y de la hidratación del cemento, y abarcan un 28% de la misma. Tienen un tamaño considerablemente pequeño, menor que 15-25 Å, y corresponden a espacios intersticiales del gel de cemento. Estos poros sólo intercambian agua con el ambiente cuando se secan a humedades menores que 20% HR.
- Poros capilares: espacios ocupados originalmente por el agua, que no son fáciles de apreciar a simple vista en comparación con los poros de gel. Éstos están interconectados entre sí y distribuidos al azar por toda la pasta. Tienen un tamaño del orden de entre 2 nm y 1 µm. Estar interconectados y expuestos al aire exterior ocasiona que aumente el ingreso de agentes externos a la pasta, lo que disminuye las resistencias mecánicas y ocasiona un aumento en la permeabilidad de la pasta. Por ello, es de gran importancia evitar que se

presente capilaridad interconectada, para así poder lograr que la pasta tenga la durabilidad requerida y no se vea afectada.

- Poros de aire: se generan por las burbujas de aire atrapadas en la masa del concreto o mortero, durante la manipulación tecnológica. No suelen estar interconectados entre sí y su dimensión es variable, aunque generalmente son mayores que 0.05 mm. Aunque afectan la resistencia mecánica, en cuanto a la durabilidad, pueden según el caso, inducir efectos benéficos.

El porcentaje total de vacíos del mortero o concreto está constituido tanto por poros cerrados u ocluidos, como por una red de poros cuyos tamaños oscilan entre pocos nm hasta alrededor de 100 μm (poros de gel), desde $\sim 100 \mu\text{m}$ hasta 105 μm (poros capilares) y desde 105 μm hasta el orden de mm, que se denominan poros de aire o grandes poros. Todos los poros comunicados entre sí están relacionados con el concepto de permeabilidad o penetrabilidad, característica fundamental que controla la llegada de agentes agresivos hasta la varilla, acción en la que influyen muchos factores más (Mejía *et al.*, 2018).

Los poros importantes para la permeabilidad son aquellos con un diámetro de al menos 120 o 160 nm. Los poros que no son efectivos con respecto a flujo, esto es, respecto a permeabilidad, incluyen, además de los poros discontinuos, aquellos que contienen agua absorbida y aquellos que tienen una entrada angosta, sin que por ello dejen de ser grandes.

De acuerdo con la norma (ASTM C642, 1997), a fin de determinar el %TV, se obtienen los pesos saturado, sumergido y seco. Posteriormente, con estos tres pesos se calcula el porcentaje con la ayuda de la Ecuación 1.3.

$$\%TV = \frac{W_{saturado} - W_{105^{\circ}C}}{W_{saturado} - W_{sumergido}} * 100$$

Ecuación 1.3 Porcentaje total de vacíos (%TV)

Donde:

$W_{saturado}$ = Peso saturado (g)

$W_{sumergido}$ = Peso sumergido (g)

$W_{105^{\circ}C}$ = Peso seco constante (g)

La porosidad tiene efectos muy notables en dos características muy importantes del concreto: la resistencia a compresión y la durabilidad. En ambas características se nota una relación inversa fundamentalmente con la porosidad (DURAR, 1998). En la Tabla 1.4 se muestran los criterios de evaluación de la calidad de morteros y concretos usando el %TV.

Tabla 1.4 Criterios de evaluación de morteros y concretos utilizando el %TV como parámetro (DURAR, 1998)

%TV	Calidad del material
≤10%	Buena calidad y compacidad
10%-15%	Moderada calidad
>15%	Inadecuada durabilidad

1.4.5 Porosidad efectiva (ϵ_{EF})

Esta prueba tiene como objetivo determinar la absorción capilar y la porosidad de morteros y concretos como una medida de compacidad. Por porosidad del concreto se consideran los espacios vacíos que quedan dentro de la masa del concreto y mortero, a consecuencia de la evaporación del agua excedente del amasado y del aire atrapado en su manipulación (DURAR, 1998).

Como absorción capilar se considera la masa de agua por unidad de área que puede absorberse en los capilares cuando el mortero se encuentra en contacto con agua líquida.

A la fecha, no se tiene un criterio de evaluación en cuanto a definir la calidad del mortero o concreto en función de la porosidad efectiva obtenida en la prueba de caracterización descrita. Se han obtenido, en cambio, algunas correlaciones entre el %TV y la ϵ_{EF} , para así conocer uno u otro valor en función del que se obtenga primero. Estas correlaciones mostradas en investigaciones anteriores dan un valor muy similar entre sí: $\epsilon_{EF} = 0.4 - 0.6$ (%TV). (Celis, 2007; Herbert, 2010; Mejía *et al.*, 2018).

El ensayo de absorción capilar se basa en la metodología propuesta por Fagerlund, en la cual cada espécimen se cubre en sus paredes laterales con parafina para luego colocarse en un recipiente con tirante de agua de 5 mm, de tal manera que sólo se tenga contacto con la cara inferior. Durante la prueba, el recipiente debe mantenerse cerrado para así evitar evaporación; los pesos se registran en distintos tiempos: 1/12, 1/6, 1/4, 1/2, 1, 2, 3, 4, 6, 24, 48 horas, hasta llegar a un peso constante. Los cálculos necesarios se realizan con ayuda de la Ecuación 1.4 para la resistencia a la penetración del agua, la Ecuación 1.5 para obtener el coeficiente de absorción capilar, la Ecuación 1.6 para obtener la PE y con la Ecuación 1.7 para obtener la absorción capilar. (NMX-C-504-ONNCCE-2015, 2015).

$$m = \frac{t}{z^2}$$

Ecuación 1.4 Resistencia a la penetración del agua

Donde:

m = Resistencia a la penetración del agua (s/m²)

z = Profundidad de penetración del agua (m²)

t = Tiempo (s)

$$k = \frac{(W_t - W_o) / A}{\sqrt{t}}$$

Ecuación 1.5 Coeficiente de absorción capilar

Donde:

k = Coeficiente de absorción capilar

A = Área (m²)

W_o = Peso inicial (g)

t = Tiempo (s)

W_t = Peso en el tiempo (g)

$$\varepsilon e = \frac{k\sqrt{m}}{1000} (\%)$$

Ecuación 1.6 Porosidad efectiva

Donde:

εe = Porosidad efectiva (%)

k = Coeficiente de absorción capilar (kg/m² s^{1/2})

m = Resistencia a la penetración de agua (s/m²)

El coeficiente k puede evaluarse como la pendiente de la región lineal del gráfico $(W_t - W_o)/A$ en función de \sqrt{t} .

El coeficiente m puede determinarse calculando el tiempo requerido para que el agua ascienda a la cara superior de la probeta, es decir, cuando $z = H$.

Después de efectuar las ecuaciones anteriores y con los valores obtenidos, podemos calcular la absorción capilar por medio de la Ecuación 1.7.

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}}$$

Ecuación 1.7 Absorción capilar

Donde:

S = Absorción capilar (mm/h^{1/2}) o (m/s^{1/2})

m = Resistencia a la penetración de agua (s/m²)

1.4.6 Resistencia mecánica en compresión (RMC)

La resistencia a la compresión del concreto es la medida más común de desempeño empleada por los ingenieros para diseñar edificios y otras estructuras. La RMC se mide fracturando probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayos de compresión. La RMC se calcula a partir de la carga de ruptura dividida por el área de la sección que resiste a la carga y se reporta en unidades de libra-fuerza por pulgada cuadrada (psi) en unidades corrientes utilizadas en EUA o en mega Pascales (MPa) en unidades del SI, de acuerdo con la norma mexicana NMX-C-083-ONNCCE-2002 (2002).

2 Metodología experimental

2.1 Elaboración de especímenes

En esta investigación se utilizó cemento Portland compuesto, designación mexicana CPC para la elaboración de los morteros convencionales N1-40 y N2-25. Esta designación se debe a la resistencia a la compresión nominal de diseño a 28 días.

El agregado utilizado para la preparación de los morteros evaluados se obtuvo de un banco de materiales ubicado en la ciudad de Santiago de Querétaro, Querétaro. Se continuó con la prueba de contenido de humedad y absorción del agregado, para así definir la cantidad de agua necesaria en el diseño de la mezcla.

El agua de mezclado utilizada fue potable del Laboratorio de Materiales de la Universidad Marista de Querétaro.

Se colocó cada uno de los morteros convencionales fabricados en tres diferentes moldes metálicos: cubos de 5 x 5 x 5 cm y cilindros de 10 x 20 cm. Para cada mortero se elaboraron los siguientes especímenes: 9 cilindros de 10 x 20 cm (base por altura) y 15 cubos de 5 x 5 x 5 cm (base por altura por ancho) para las pruebas necesarias; algunos de ellos se presentan en la Figura 2.1.



Figura 2.1 Mezcla de mortero convencional colocada en moldes

Después de transcurrir 24 horas a partir del mezclado, se desmoldaron los especímenes y se colocaron en tinas de curado hasta la fecha de ensaye programado.

2.2 Pruebas físicas, químicas y mecánicas

Las pruebas físicas, químicas y mecánicas realizadas a los cubos y cilindros fueron de resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a la compresión, resistencia a la penetración de ion cloruro, porcentaje total de vacíos y absorción capilar a las edades de 28, 60, 90 y 120 días.

2.2.1 Resistividad eléctrica húmeda (REH)

La prueba se llevó a cabo por medio del método directo con la ayuda del equipo Nilsson, el cual se puede observar en la Figura 2.2, el cual arroja los datos de resistividad eléctrica húmeda de los especímenes, con base en el procedimiento que establece el “Manual DURAR” para una correcta aplicación.

El proceso se realizó en todos los especímenes, tanto en los cubos como en los cilindros, a las edades establecidas, a saber: 1, 3, 7, 28, 60, 90 y 120 días.



Figura 2.2 Resistómetro utilizado para la prueba de resistividad en algunos especímenes

2.2.2 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

Se colocaron los transductores en las caras opuestas del material (cubo y cilindro), poniendo gel entre los transductores y el espécimen y haciendo presión sobre los transductores, como se observa en la Figura 2.3. Ya colocados, se encendió el equipo, se registró cada medición en μs y se calculó la velocidad, como se indicó en el capítulo 1.



Figura 2.3 Equipo para realizar prueba de VPU

2.2.3 Permeabilidad rápida de cloruros (PRC)

Esta prueba proporciona rápidamente la resistencia a la penetración de iones de cloruro de cada espécimen, la cual se obtiene en unidades de Coulombs. Ya obtenidos estos valores se analizan con base en la Tabla 1.3 para determinar en qué rango entra cada espécimen y así concluir la durabilidad con la que cuenta, teniendo cuatro posibles resultados: alta, moderada, baja, muy baja y despreciable. La Figura 2.4 muestra el equipo funcionando con la prueba.



Figura 2.4 Ensayo de prueba PRC

2.2.4 Porcentaje total de vacíos (%TV)

Después de cortar los cilindros asignados de 10 x 20 cm a cada 5 cm, se obtuvieron cuatro rodajas. Se tomaron dos rodajas de cada cilindro y cubos, las cuales se secaron a 50 °C hasta obtener un peso constante para evitar cambios microestructurales; después se saturaron con agua natural, registrando estos pesos hasta obtener peso constante, y por último, se obtuvo el peso saturado sumergido, para lo cual los especímenes se sumergieron totalmente en agua y con la ayuda de la balanza hidrostática se obtuvo el peso (Figura 2.5).



Figura 2.5 Balanza utilizada para obtener peso sumergido de los especímenes

2.2.5 Porosidad efectiva (ϵ_{EF})

Los equipos y materiales necesarios para realizar este procedimiento fueron los siguientes: horno con termostato digital, cubeta con fondo plano y tapa, esponjas para secar la superficie de los cubos, balanza digital, y parafina o resina para cubrir los laterales de los especímenes.

El ensayo se realizó sobre especímenes de espesor $H < 50$ mm luego de un pre acondicionamiento de secado a 50 °C por un tiempo hasta asegurar un peso constante del espécimen y posterior enfriamiento en desecador. Después de registrar su peso inicial (W_0), cada espécimen se colocó sobre una esponja húmeda en el interior de una cubeta de fondo plano teniendo cuidado de que el agua llegara a 3 mm por encima de la parte inferior de la probeta de ensayo. Previamente, los cubos se cubrieron con resina o parafina en las áreas laterales del espécimen. El cambio de peso ($W_t - W_0$) de cada espécimen se registró a intervalos de tiempo de

1/12, 1/6, 1/4, 1/2, 1, 2, 3, 4, 6, 24, 40 h (DURAR, 1998). En la Figura 2.6 se presentan algunos especímenes durante la prueba.



Figura 2.6 Morteros de rodajas y cubos durante prueba con técnica de Fagerlund

2.2.6 Resistencia mecánica a la compresión (RMC)

Esta prueba se realizó para cada espécimen después de haber concluido las pruebas no destructivas VPU y REH, en las fechas ya establecidas. Para llevar a cabo esta prueba, se utilizó una máquina universal, como se aprecia en la Figura 2.7.



Figura 2.7 Ensayos de resistencia a la compresión

3 Resultados

En la Tabla 3.1 se presentan los valores promedio y coeficientes de variación de la REH a diferentes edades con su respectivo coeficiente de variación para cada tipo de mortero comercial (Mejía *et al.*, 2018) y los dos convencionales evaluados en esta investigación. Se considera que los coeficientes de variación con alto porcentaje se deben a la diferencia de resultados entre el tamaño de especímenes.

Tabla 3.1 Valores promedio de REH a diferentes edades

Tipo de mortero	REH [KΩ-cm] 28d	REH [KΩ-cm] 60d	REH [KΩ-cm] 90d	REH [KΩ-cm] 120d
SG AD	14.05	11.18	16.05	23.30
<i>Coeficiente de variación</i>	26.85%	7.42%	27.00%	53.90%
SG 202	17.07	13.89	18.19	25.36
<i>Coeficiente de variación</i>	25.82%	7.52%	23.10%	44.42%
SMT 723	11.48	9.65	15.30	13.87
<i>Coeficiente de variación</i>	24.90%	4.30%	29.41%	26.01%
SMT 412	14.88	12.70	21.41	19.74
<i>Coeficiente de variación</i>	39.20%	6.53%	37.70%	31.89%
ST 121	8.77	8.77	10.09	8.50
<i>Coeficiente de variación</i>	36.43%	21.68%	20.55%	36.37%
ST 122	12.02	9.31	12.91	11.00
<i>Coeficiente de variación</i>	48.29%	18.96%	27.49%	38.26%
SGrout	12.50	22.09	22.71	18.35
<i>Coeficiente de variación</i>	23.17%	33.79%	24.02%	34.04%
N1-40	4.95	7.98	11.33	14.31
<i>Coeficiente de variación</i>	5.12%	7.96%	8.18%	6.02%
N2-25	2.73	6.20	7.70	8.63
<i>Coeficiente de variación</i>	11.34%	7.47%	11.65%	10.63%

De manera similar, en la Tabla 3.2 se presentan los resultados promedio y los coeficientes de variación de VPU a diferentes edades de morteros comerciales (Mejía *et al.*, 2018) y los convencionales de la presente investigación.

Tabla 3.2 Valores promedio de VPU a diferentes edades

Tipo de mortero	VPU [km/s] 28d	VPU [km/s] 60d	VPU [km/s] 90d	VPU [km/s] 120d
SG AD	4.09	4.10	4.13	4.17
<i>Coeficiente de variación</i>	3.34%	3.05%	3.88%	3.46%
SG 202	4.33	4.35	4.37	4.39
<i>Coeficiente de variación</i>	2.45%	1.63%	2.05%	2.00%
SMT 723	3.93	3.89	4.07	3.94
<i>Coeficiente de variación</i>	4.05%	1.23%	6.08%	1.05%
SMT 412	4.27	4.33	4.22	4.36
<i>Coeficiente de variación</i>	0.85%	1.64%	5.13%	1.02%
ST 121	3.85	3.87	3.90	3.93
<i>Coeficiente de variación</i>	1.46%	1.62%	0.86%	1.10%
ST 122	4.10	4.09	4.13	4.17
<i>Coeficiente de variación</i>	1.66%	1.46%	0.65%	1.28%
SGrout	3.37	3.45	3.55	3.49
<i>Coeficiente de variación</i>	6.53%	3.95%	8.77%	6.25%
N1-40	3.32	3.37	-	3.46
<i>Coeficiente de variación</i>	0.15%	0.83%	-	0.21%
N2-25	2.95	3.10	-	3.16
<i>Coeficiente de variación</i>	0.58%	0.37%	-	0.12%

Los valores promedio y el coeficiente de variación de la RMC de los morteros comerciales (Mejía *et al.*, 2018) y los convencionales de esta investigación a diferentes edades, se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Valores promedio de RMC a diferentes edades

Tipo de mortero	RMC [MPa] 28d	RMC [MPa] 60d	RMC [MPa] 90d	RMC [MPa] 120d
SG AD	61.67	-	-	68.23
<i>Coeficiente de variación</i>	2.14%	-	-	3.87%
SG 202	63.83	-	-	65.83
<i>Coeficiente de variación</i>	1.70%	-	-	5.56%
SMT 723	39.70	-	-	46.28
<i>Coeficiente de variación</i>	1.15%	-	-	1.56%
SMT 412	58.23	-	-	63.00
<i>Coeficiente de variación</i>	0.45%	-	-	6.66%
ST 121	56.07	-	-	54.73
<i>Coeficiente de variación</i>	1.76%	-	-	4.02%
ST 122	56.07	-	-	66.63
<i>Coeficiente de variación</i>	1.76%	-	-	3.77%
SGrout	43.40	-	-	45.28
<i>Coeficiente de variación</i>	2.33%	-	-	5.07%
N1-40	35.07	38.45	-	37.51
<i>Coeficiente de variación</i>	7.15%	16.10%	-	10.63%
N2-25	18.55	22.57	21.37	24.56
<i>Coeficiente de variación</i>	3.42%	7.51%	7.46%	7.52%

En la Tabla 3.4 se presentan los valores promedio y los coeficientes de variación del %TV a diferentes edades de los morteros comerciales (Mejía *et al.*, 2018) y los convencionales evaluados en la presente investigación.

Tabla 3.4 Valores promedio de %TV a diferentes edades

Tipo de mortero	%TV 28d	%TV 60d	%TV 90d	%TV 120d
SG AD	16.93	-	-	13.66
<i>Coeficiente de variación</i>	4.25%	-	-	1.35%
SG 202	12.83	-	-	9.04
<i>Coeficiente de variación</i>	0.51%	-	-	0.22%
SMT 723	12.87	-	-	6.45
<i>Coeficiente de variación</i>	0.74%	-	-	0.16%
SMT 412	9.03	-	-	9.30
<i>Coeficiente de variación</i>	1.50%	-	-	0.43%
ST 121	-	-	-	-
<i>Coeficiente de variación</i>	-	-	-	-
ST 122	5.23	-	-	9.32
<i>Coeficiente de variación</i>	2.68%	-	-	0.27%
SGrout	14.19	-	-	-
<i>Coeficiente de variación</i>	10.96%	-	-	-
N1-40	20.14	24.27	-	24.27
<i>Coeficiente de variación</i>	10.61%	6.41%	-	7.56%
N2-25	30.08	26.24	-	-
<i>Coeficiente de variación</i>	3.06%	5.72%	-	-

En la Tabla 3.5 se presentan los valores promedio de ϵ_{EF} a diferentes edades de los morteros comerciales (Mejía *et al.*, 2018) y los convencionales evaluados en la presente investigación. La edad en la que se tuvieron la mayor cantidad de valores fue a 120 días debido a que inicialmente no se tenía considerada esta prueba para los morteros comerciales.

Tabla 3.5 Valores promedio de ϵ_{EF} a diferentes edades

Tipo de mortero	ϵ_{EF} (%) 28d	ϵ_{EF} (%) 60d	ϵ_{EF} (%) 90d	ϵ_{EF} (%) 120d
SG AD	-	-	-	2.58
<i>Coefficiente de variación</i>	-	-	-	40.42%
SG 202	-	-	-	1.76
<i>Coefficiente de variación</i>	-	-	-	34.12%
SMT 723	-	-	-	1.14
<i>Coefficiente de variación</i>	-	-	-	31.64%
SMT 412	-	-	-	1.21
<i>Coefficiente de variación</i>	-	-	-	37.03%
ST 121	-	-	-	0.27
<i>Coefficiente de variación</i>	-	-	-	43.28%
ST 122	-	-	-	0.24
<i>Coefficiente de variación</i>	-	-	-	18.30%
SGrout	-	-	-	2.72
<i>Coefficiente de variación</i>	-	-	-	41.79%
N1-40	14.75	10.25	5.81	9.16
<i>Coefficiente de variación</i>	15.93%	49.18%	11.05%	43.13%
N2-25	20.24	12.25	-	17.87
<i>Coefficiente de variación</i>	2.91%	37.24%	-	9.13%

Los resultados promedio y el coeficiente de variación para la prueba de PRC se obtuvieron para algunos especímenes de mortero comercial y convencional. En la Tabla 3.6 se presentan los valores promedio de PRC: los coeficientes de variación que indican el valor de cero es porque se tiene sólo una prueba realizada con éxito del mortero correspondiente.

Tabla 3.6 Valores promedio de PRC a diferentes edades

Tipo de mortero	PRC [C] 28d	PRC [C] 60d	PRC [C] 90d	PRC [C] 120d
SG AD	2187.50	-	-	3799.00
<i>Coeficiente de variación</i>	2.63%	-	-	0.00%
SG 202	1305.00	-	-	1818.50
<i>Coeficiente de variación</i>	0.00%	-	-	7.34%
SMT 723	3932.00	-	-	1550.00
<i>Coeficiente de variación</i>	0.00%	-	-	12.97%
SMT 412	1093.50	-	-	905.00
<i>Coeficiente de variación</i>	0.32%	-	-	0.55%
ST 121	6419.60	-	-	3087.00
<i>Coeficiente de variación</i>	0.00%	-	-	0.00%
ST 122	2477.00	-	-	1546.50
<i>Coeficiente de variación</i>	0.48%	-	-	2.42%
SGrout	-	-	-	3495.50
<i>Coeficiente de variación</i>	-	-	-	1.70%
N1-40	5140.00	2526.00	-	1659.50
<i>Coeficiente de variación</i>	0.45%	0.12%	-	0.27%
N2-25	3273.50	6928.50	-	2778.50
<i>Coeficiente de variación</i>	14.83%	5.33%	-	5.81%

4 Análisis de resultados

Al finalizar las pruebas experimentales y registrar sus resultados para cada espécimen de los dos morteros convencionales evaluados en la presente investigación, se realizó una comparativa de dichos resultados con los obtenidos a partir de la referencia de Mejía *et al.*, (2018) con morteros comerciales. De esta manera, se revisaron ambos tipos de mortero (convencionales y comerciales), para determinar la eficiencia de todos ellos y encontrar sus diferencias o similitudes.

4.1 Indicador de durabilidad REH

El primer índice de durabilidad evaluado fue el REH, ya que se ha comprobado en investigaciones anteriores que es el más sencillo de efectuar en laboratorio, así como en campo. Este índice se compara con los demás utilizados en esta investigación, para así encontrar posibles correlaciones empíricas entre éstos. Para ello, se muestran dos gráficas de cada correlación: la primera muestra los resultados obtenidos en función de la edad de prueba; en la segunda gráfica, ésta se detalla en función del tipo de mortero evaluado. De esta manera, se determinan posibles variaciones por la edad del espécimen de prueba, así como por el tipo de mortero evaluado.

La Figura 4.1 muestra los resultados correlacionados entre REH y VPU a varias edades (Figura 4.1a) y según el tipo de mortero (Figura 4.1b). De la Figura 4.1a se puede observar que no existe una correlación entre la edad de la prueba y los valores obtenidos, ya que se esperaría que a edades cortas los valores fueran menores, al compararse con los resultados obtenidos a edades mayores. Este comportamiento se observa al tenerse símbolos de cada edad dispersos entre sí, sin ver un patrón bien definido, como se esperaría. Es claro observar que no existe una correlación entre estos dos indicadores de durabilidad, al tener el exponente de la REH un valor muy pequeño (0.0963), indicativo de que la tendencia es a una línea horizontal o constante para los valores de REH obtenidos de todos los morteros (Figura 4.1b). De igual manera, el coeficiente de correlación (R^2) fue de tan sólo 0.1914, lo que define que existe poca correlación entre estos dos indicadores.

La siguiente correlación se estableció entre el indicador de durabilidad REH y el de RMC, y los resultados de estas correlaciones empíricas se pueden observar en la Figura 4.2. Observando los resultados de la Figura 4.2a, que diferencia la edad de prueba, se resalta que los morteros convencionales sí mostraron una mejoría conforme la edad de prueba fue incrementándose de 28 a 120 días.

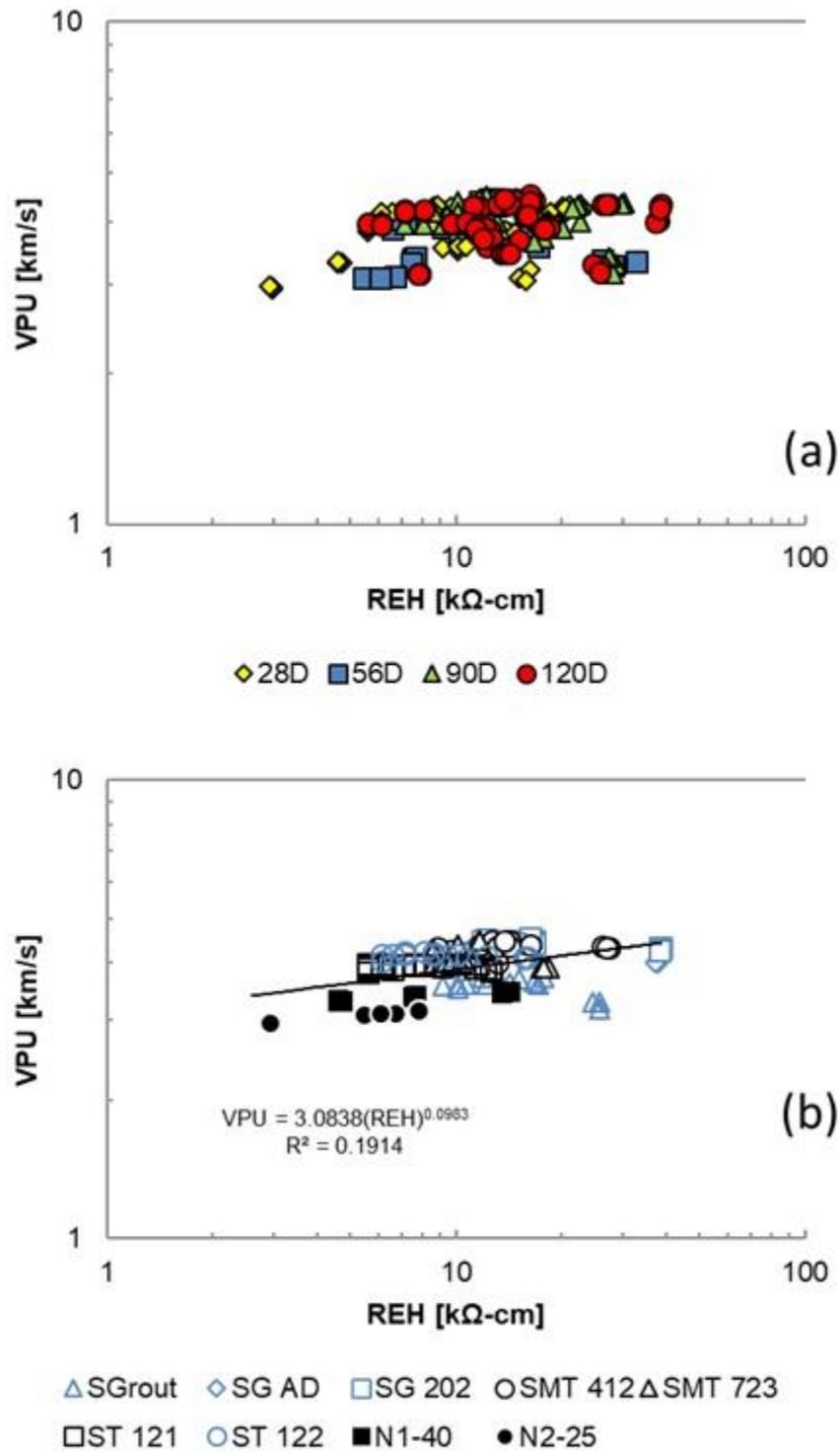


Figura 4.1 Relación de REH y VPU graficado (a) por edad de prueba y (b) por tipo de mortero evaluado

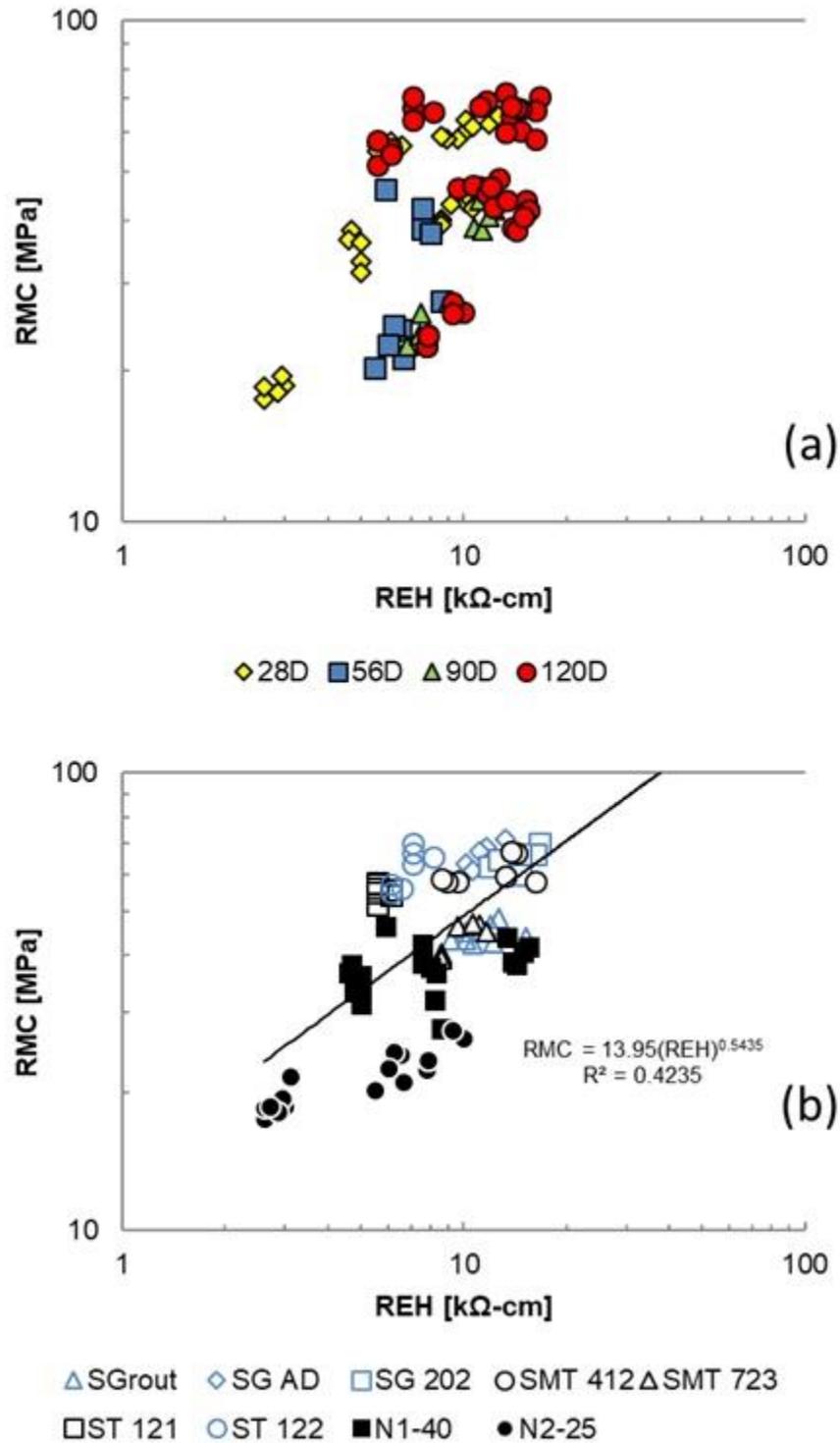


Figura 4.2 Relación de REH y RMC graficado (a) por edad de prueba y (b) por tipo de mortero evaluado

En contraste, los morteros comerciales mostraron un comportamiento desordenado en la misma Figura 4.2a, lo que implica que la mayoría de estos morteros alcanzan su valor de REH y RMC a edades tempranas, aunque pocos de ellos sí mejoraron su desempeño con la edad de prueba.

En la Figura 4.2b se presenta la línea de tendencia de estos dos indicadores y la ecuación como su regresión. De los resultados obtenidos, se observa una buena correlación entre ambos indicadores con un coeficiente en REH alto (0.5435) y un R^2 de 0.4235 que corresponde a uno adecuado para la gran variabilidad de los materiales evaluados.

Observando la Figura 4.2b, se puede apreciar que los morteros N2-25 de bajas prestaciones muestran bajos valores en la REH (de ~ 3 k Ω -cm a 10 k Ω -cm), al igual que en la RMC (<20 MPa), por lo tanto, indican que sus propiedades físicas y mecánicas son bajas. Por otro lado, los morteros N1-40 de medianas prestaciones, por razones de resistencia mecánica con la que se hizo la mezcla de éste, se obtuvieron mayores valores de RMC respecto al mortero convencional N2-25 y algunos morteros comerciales, mientras que en los valores de REH un porcentaje de estos morteros N1-40 se mantuvieron en el mismo rango que los morteros comerciales, y otros pocos estuvieron ligeramente por arriba de los valores de REH obtenidos con los comerciales.

Mientras que los morteros comerciales se encuentran en un rango donde se establece un criterio de durabilidad alta respecto a los valores de la RMC (>45 MPa), este valor está basado en el DURAR (1998). De igual manera, en la REH se muestran resultados de un concreto que posee una interconectividad de consideración entre sus poros (ver tabla 1.1). En la figura 4.2b, se observa que los datos se dividen en tres grupos bien definidos por niveles de la RMC: $RMC < 5$ MPa, 30 MPa < $RMC < 50$ MPa y 51 MPa < $RMC < 75$ MPa.

Para el primer rango de RMC, se encuentran todos los pares de resultados RMC y REH para el mortero N2-25, lo que muestra un desempeño muy pobre en comparación con los demás evaluados. Le sigue el desempeño del mortero N1-40, cuya RMC fue ligeramente mayor que 40 MPa, por arriba del valor de diseño nominal. En este mismo grupo de datos (30 MPa < $RMC < 50$ MPa), se encuentran otros morteros comerciales (SMT 723 y SG AD), los cuales no presentan un desempeño diferente a edades de 28D y 120D, lo que los hace poco eficaces, en comparación con un mortero convencional de 40 MPa de RMC.

Retomando la Figura 4.2b, se puede ver cómo los valores más altos respecto a la RMC abarcan las edades de 120 días. Con esto, se puede decir que el tiempo de curado es efectivamente de gran ayuda para obtener una mejor calidad en el mortero. Aunque también se puede ver que un cierto porcentaje de especímenes con la edad de 28 días abarca los mismos rangos de valor de RMC en los que se ubican los de 120 días, pero éstos corresponden a los morteros N2-25 de bajo desempeño. En conjunto, con los dos valores (REH-RMC), los que muestran mejores resultados son los comerciales, al mostrar altos valores en la RMC, indicio

de que cuentan con una gran capacidad de carga en compresión; por tanto, este tipo de morteros cumple con el control de calidad para utilizarse en cualquier reparación estructural.

La siguiente correlación empírica entre el indicador de durabilidad REH y el indicador %TV se presenta en la Figura 4.3. De nueva cuenta, la figura se divide en dos partes: (a) en función de la edad de prueba y (b) en función del tipo de mortero evaluado.

Revisando la correlación de ambos indicadores de durabilidad REH y %TV en la Figura 4.3a, se observa que los morteros convencionales N1-40 y N2-25 mostraron una leve mejoría con la edad de prueba; los morteros comerciales, en cambio, mostraron de nueva cuenta una dispersión desordenada en función de la edad de prueba, indicativo de que alcanzan su mejor desempeño a edades tempranas (28 días).

En la correlación mostrada en la Figura 4.3b, se puede apreciar que los morteros de bajas prestaciones (N2-25) y medianas prestaciones (N1-40) registran un alto porcentaje de vacíos (entre 20 y 45%), lo cual es indicio de la gran cantidad de vacíos que tienen en su estructura interna, debido a que la relación a/c utilizada fue elevada. Los morteros comerciales, por otro lado, se encuentran en un rango menor que 20% (entre 6 y 16%), siendo más de la mitad del valor mínimo de los otros morteros. Éstos, por lo tanto, cuentan con una mejor mezcla en relación con las propiedades de resistencia, ya que su baja porosidad interconectada disminuye la permeabilidad y aumenta la resistencia mecánica en los mismos.

Es interesante observar en la Figura 4.3b que existe una relación muy bien definida entre los parámetros %TV y REH: a mayor valor de REH en el mortero, menor el valor de %TV. Al revisar el desempeño de los morteros a edades más avanzadas (Figura 4.3a), se puede observar que los morteros de bajas y medianas prestaciones (convencionales) van mejorando conforme el tiempo del curado aumenta, ya que el comportamiento a 28D fue el más desfavorable en ambos índices (REH y %TV); mejoran en REH a la edad de 56D, y mejoran aún más a edades de 120D, pero únicamente los morteros de medianas prestaciones (N1-40). Los valores de %TV para el mortero de medianas prestaciones no mejoran en el parámetro de %TV para el mortero (N1-40). En el caso del mortero de bajas prestaciones (N2-25), ambos parámetros mejoran su desempeño con la edad (o tiempo de curado).

La siguiente correlación empírica entre indicadores de durabilidad es la de REH y ϵ_{EF} , cuyos resultados se muestran en la Figura 4.4. La Figura 4.4a muestra el efecto de la edad en los resultados obtenidos. Para los morteros convencionales N1-40 y N2-25, no se observó una mejoría en el indicador de ϵ_{EF} en función de la edad de prueba, lo que indica que su porosidad interconectada no se vio afectada por un aumento en el tiempo de curado de ambos morteros, aunque sí se ve una leve mejoría en el indicador de REH, como se ha explicado en las correlaciones anteriores.

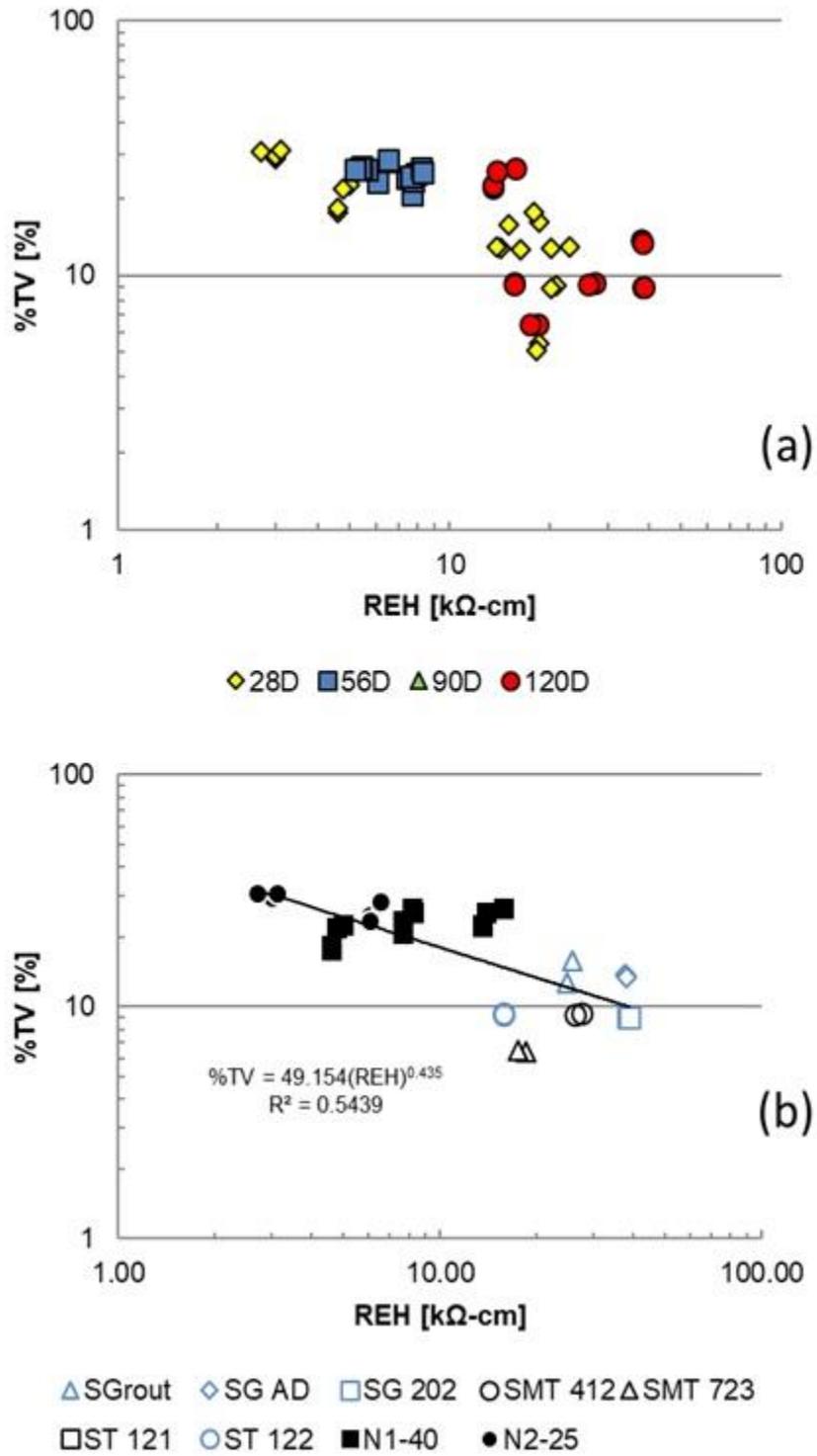


Figura 4.3 Relación de REH y %TV graficado (a) por edad de prueba y (b) por tipo de mortero evaluado

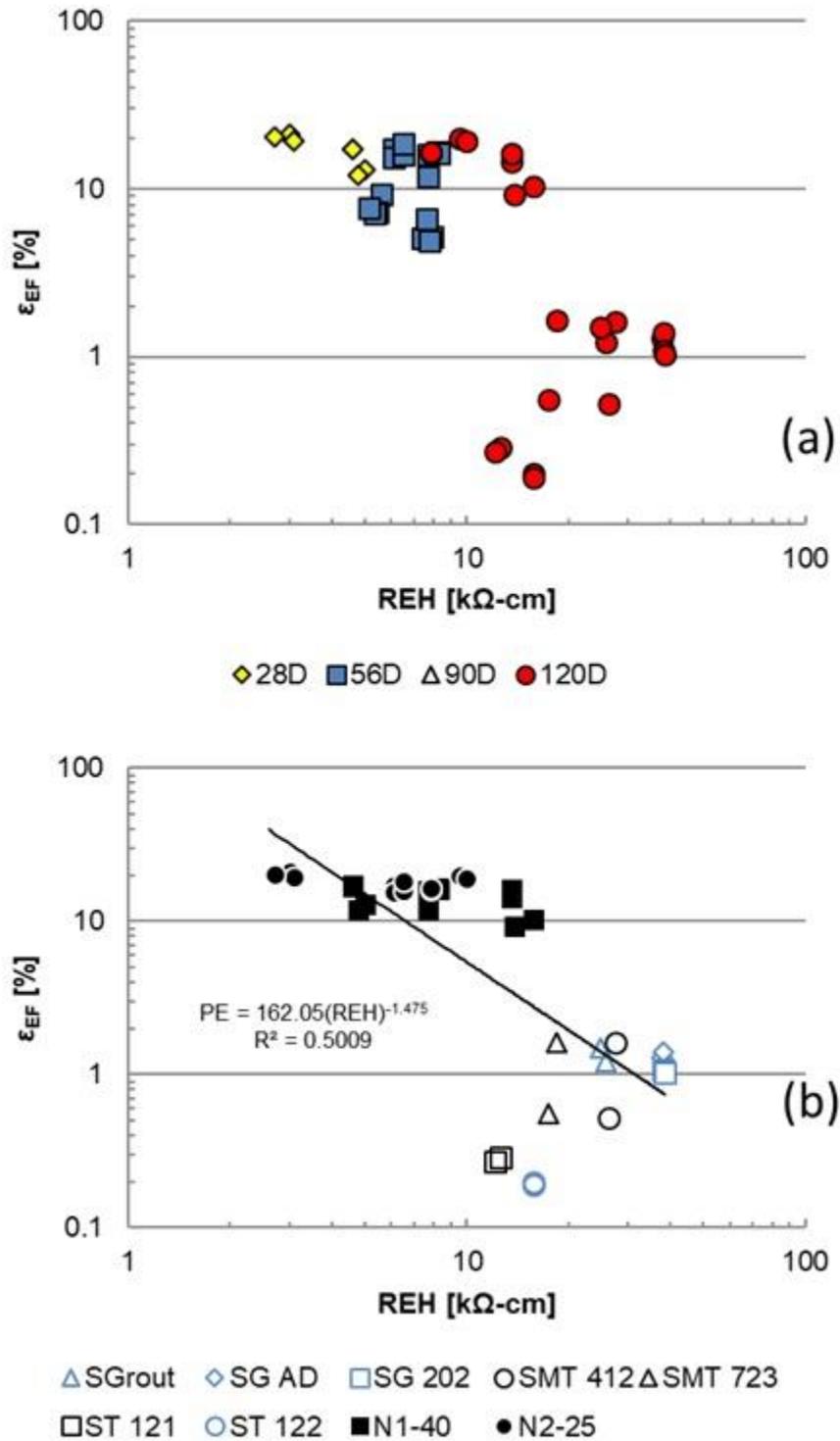


Figura 4.4 Relación de REH y ϵ_{EF} graficado (a) por edad de prueba y (b) por tipo de mortero evaluado

La Figura 4.4b muestra la línea de correlación entre ambos indicadores, REH y ϵ_{EF} , y para cuya ecuación el exponente de REH fue alto (-1.475), lo que indica que existe una fuerte correlación entre ambos. De igual manera, el valor del coeficiente de regresión fue el más alto hasta ahora observado (0.5009).

En la Figura 4.4b también se puede apreciar, a simple vista, la división entre los dos diferentes tipos de morteros analizados, donde los morteros convencionales (bajas N2-25 y medianas N1-40 prestaciones) se encuentran por encima del porcentaje que determina una durabilidad inadecuada de los morteros (ver Tabla 1.4), mientras que los morteros comerciales se encuentran en un rango mucho menor que este valor (<5%) de ϵ_{EF} , lo que los hace morteros de alto desempeño.

Respecto a los dos parámetros REH y ϵ_{EF} , se puede observar que, al contar con un bajo ϵ_{EF} , la REH aumenta, ya que en el mortero se observa una disminución en el contenido de poros interconectados. Ello también indica que éstos son mucho menos permeables, lo que evita, en primer lugar, que el agua tenga acceso al interior de la estructura, posteriormente que ésta no se quede almacenada por un tiempo y, por último, que no pueda migrar a través de poros. Ello evita que a futuro haya presencia de corrosión, lo que alarga su vida útil en comparación con los que cuentan con un alto porcentaje de porosidad efectiva.

La siguiente correlación empírica generada a partir de los resultados del indicador de durabilidad REH fue con el indicador de PRC, la cual se muestra en la Figura 4.5. En la Figura 4.5a se observa que los morteros tradicionales mostraron una mejoría en el desempeño de REH y PRC con la edad de prueba; los morteros comerciales, en cambio, no mostraron esta característica. En la correlación de la gráfica en la Figura 4.5b, se puede apreciar que tanto los morteros N1-40 y N2-25 como los comerciales se encuentran en un rango mayor que 1,000 C respecto a los valores obtenidos de la prueba de PRC (1,000 <PRC <8,000), mientras que en la REH se puede apreciar una variación de resultados (3 k Ω -cm <REH <45 k Ω -cm). De nuevo, se observa un mejor desempeño en los morteros comerciales que en los morteros convencionales fabricados en esta investigación, ya que los valores de PRC fueron menores en los primeros que en los segundos. Al revisar los valores de la ecuación de la tendencia y el factor R² en la Figura 4.5b, se observa una correlación moderada al ser el exponente de REH relativamente bajo (-0.383) y R² de 0.2773.

Al revisar la nube de datos de los morteros comerciales, es fácil detectar que los morteros SG AD y SG 202, correspondientes a los que se conocen comercialmente como *grouts*, fueron los que permitieron mayor paso de corriente en la prueba de PRC, lo que los hace más vulnerables al paso de iones cloruros dentro de su matriz de poros (Figura 4.5b). Esto podría ayudar a seleccionar otros morteros comerciales diferentes a los *grouts* para que sean materiales resistentes al paso de cloruros, como es el caso de los morteros comerciales ST 122 y SMT 723, los cuales fueron aquellos cuyos valores de PRC se ubicaron en un nivel igual y ligeramente por debajo de los 1,000 Coulombs.

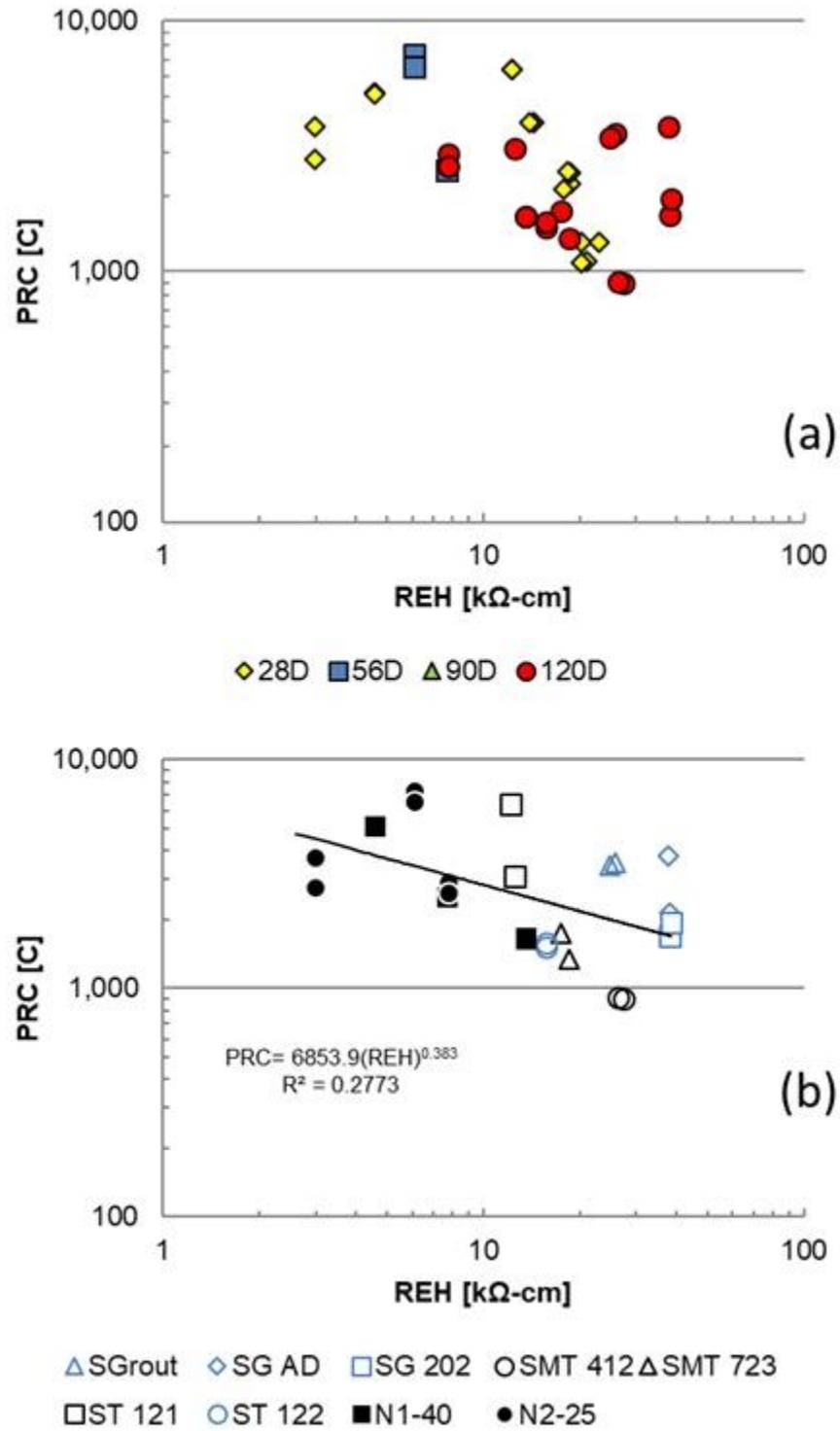


Figura 4.5 Relación de REH y PRC graficado (a) por edad de prueba y (b) por tipo de mortero evaluado

Esta pobre correlación entre REH y PRC puede deberse a varios factores, los cuales habrán contribuido a disminuir una tendencia tan fuerte como ésta entre REH y PRC, como se ha demostrado en trabajos previos (Torres *et al.*, 2018a y 2018b). Un posible efecto que disminuyó esta correlación pudo haber sido el uso de diferentes especímenes para obtener ambos valores de REH y PRC.

4.2 Indicador de durabilidad PRC

Cabe aclarar que, para cada mezcla de mortero evaluada por el indicador de PRC, se tuvo que utilizar únicamente los cilindros de 10 x 20 cm de dimensión, a los cuales se medía la REH para luego cortarse en cuatro rodajas de 5 ± 0.25 cm de espesor. Dos de estas rodajas se emplearon para la prueba de PRC y las otras dos para las pruebas de %TV y ϵ_{EF} . Es decir, para cada cilindro de 10 x 20 cm se obtuvo un solo valor de REH, dos valores de PRC y dos valores de %TV y ϵ_{EF} . En la Figura 4.6, se muestran las correlaciones entre los valores obtenidos de las rodajas de PRC y %TV; en la Figura 4.7, las correlaciones entre los valores de PRC y ϵ_{EF} .

En la Figura 4.6, se puede observar una pobre correlación entre los indicadores de durabilidad de PRC y %TV, al obtenerse un exponente algo alto de %TV (0.7622), pero un coeficiente R^2 de 0.3931, lo que hace pensar que sí existe una correlación entre ambos indicadores, pero los resultados de la presente investigación no se correlacionan del todo.

En la Figura 4.7, se observa una correlación empírica entre el indicador PRC y el ϵ_{EF} , el cual muestra un muy bajo exponente de ϵ_{EF} (0.1258) y el coeficiente R^2 también muy bajo (0.1393), siendo este indicador de porosidad interna e interconectada del concreto el que posee una correlación más pobre que el de todas las obtenidas con el indicador de PRC.

4.3 Indicador de durabilidad RMC

Ahora se revisarán las correlaciones obtenidas con los resultados experimentales de todos los morteros, convencionales y comerciales, entre la RMC y los otros dos indicadores de durabilidad diferentes a REH determinados en la Figura 4.2: RMC vs PRC, RMC vs %TV y RMC vs ϵ_{EF} . Estas tres correlaciones empíricas se muestran en la Figura 4.8.

De las gráficas mostradas en la Figura 4.8, se puede observar que la correlación entre RMC y PRC ($R^2=0.241$) fue la más pobre en comparación con los otros indicadores: %TV y ϵ_{EF} (0.5123 y 0.5151 respectivamente), y que ambas están más relacionadas con la porosidad del concreto.

De nuevo, los exponentes de las líneas de tendencia para los indicadores de PRC y %TV fueron relativamente buenos, ya que tuvieron valores de -0.328 y -0.564, respectivamente; en cambio el exponente de la correlación RMC vs ϵ_{EF} fue algo bajo (-0.185), lo que hace pensar que, con los resultados arrojados, no se obtuvieron factores de correlación que apoyaran estas tendencias empíricas.

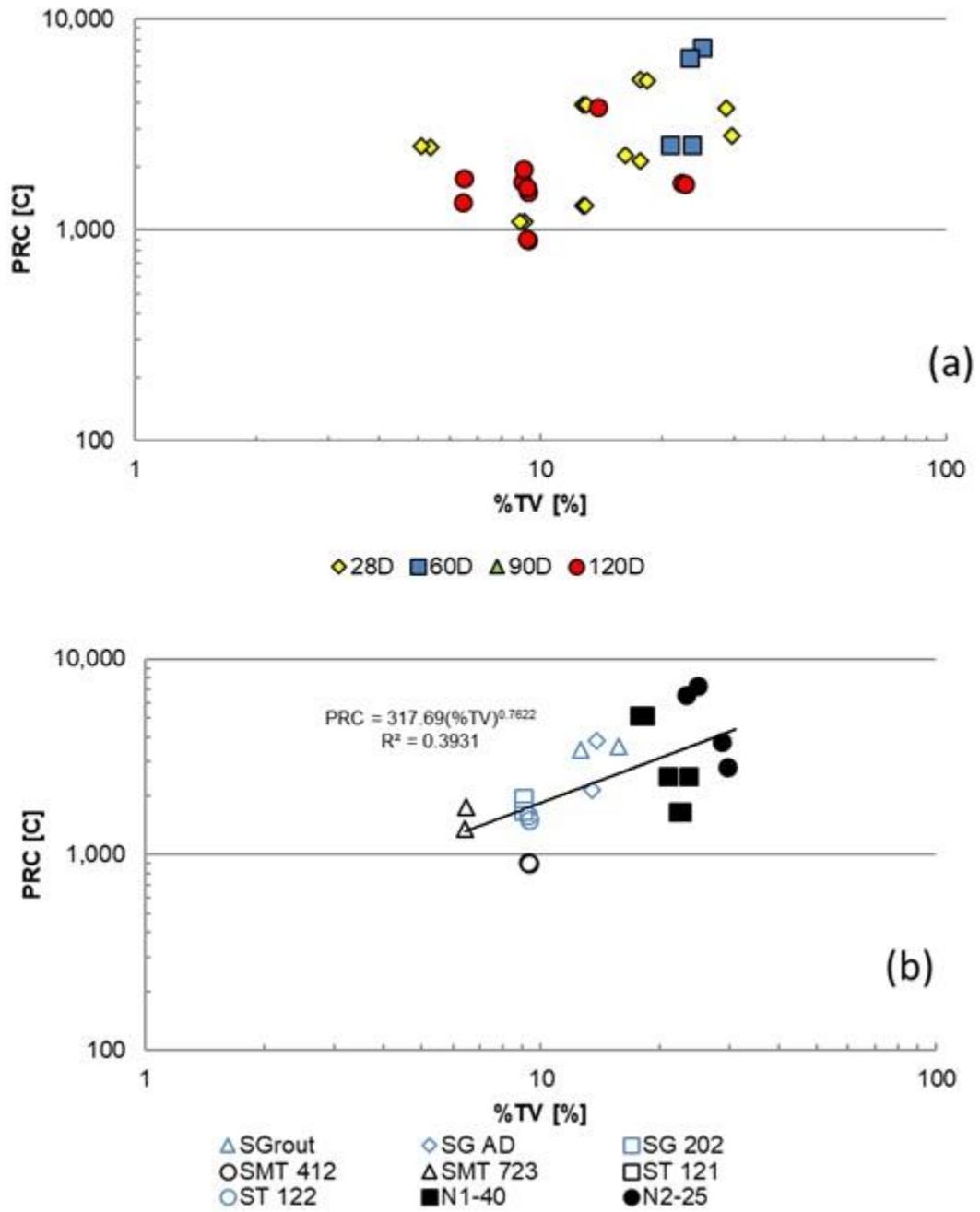


Figura 4.6 Relación de PRC y %TV

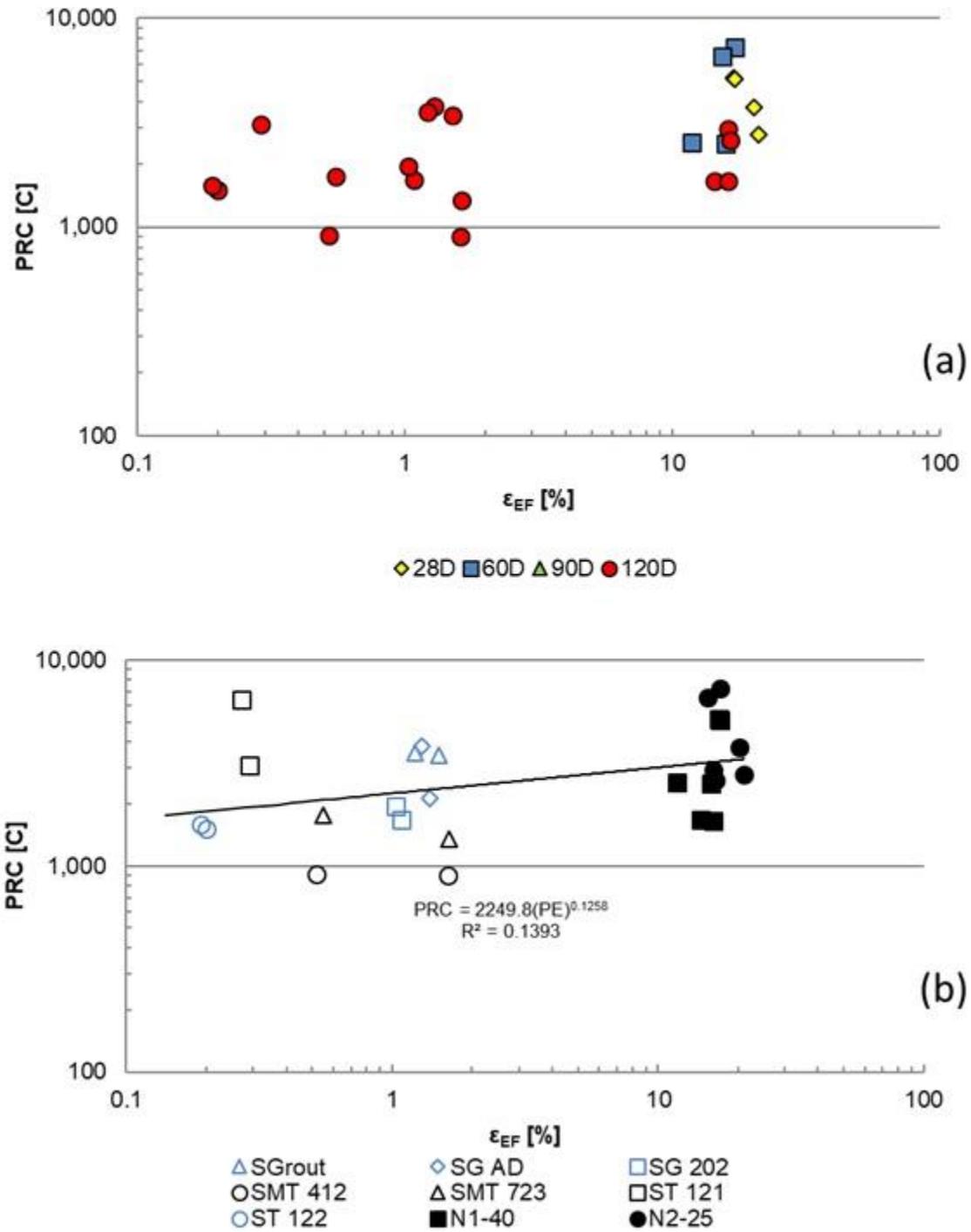


Figura 4.7 Relación de PRC y ϵ_{EF}

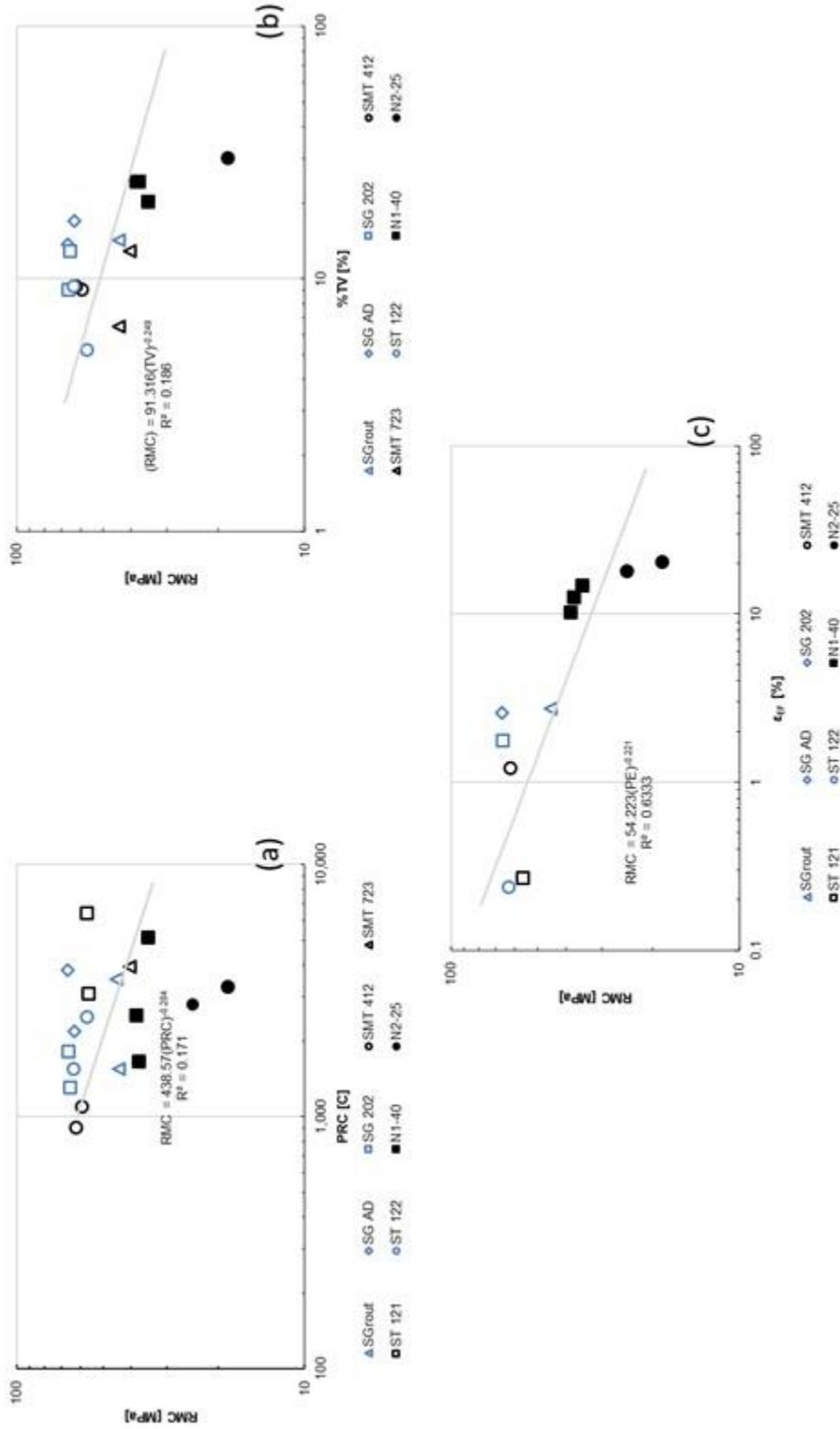


Figura 4.8 Relación entre RMC y (a) PRC, (b) %TV y (c) ϵ_{EF}

4.4 Indicador de durabilidad %TV y ϵ_{EF}

La correlación de la gráfica de %TV y ϵ_{EF} de la Figura 4.9 muestra una tendencia observada en otras investigaciones, en donde ambos parámetros se estimaron con especímenes de concreto o mortero: a mayor el indicador de ϵ_{EF} , mayor el indicador %TV.

Al revisar sólo la Figura 4.9a, en donde se graficaron los datos en función de la edad de prueba, se puede observar que hubo valores que no cumplieron lo que se esperaba: a mayor la edad del espécimen (y, por ende, mayor tiempo de curado porque los especímenes se mantuvieron en agua durante todo el tiempo hasta la fecha de prueba), menores los valores de %TV y ϵ_{EF} . Se observa todo lo contrario, inclusive, como si los valores obtenidos de la porosidad de los morteros evaluados aumentaran con la edad de prueba, y eso puede deberse a que los especímenes usados en cada edad de prueba pudieron haber mostrado diferencias en su compactación y, por ende, en la porosidad interna.

En la Figura 4.9b también se puede observar que los morteros de bajas (N2-25) y medianas (N1-40) prestaciones se encuentran en valores muchos más altos de ϵ_{EF} , sobrepasando 9% hasta valores máximos de 21%, mientras que los morteros comerciales se encuentran en un rango mucho menor (entre 0.20% y 1.63%). En los valores del %TV también se puede apreciar esta gran diferencia entre ambos tipos de morteros, convencionales y comerciales.

A pesar de estas diferencias, se puede observar que los resultados se separaron en tres rangos muy bien definidos: los morteros comerciales con %TV <15% y ϵ_{EF} <2% y morteros convencionales de medianas prestaciones con 19% <%TV <27% y 5% < ϵ_{EF} <10%; morteros de bajas prestaciones con 20% <%TV <32% y 10% < ϵ_{EF} <20%.

En la Figura 4.9b se observa la línea de tendencia que, para la correlación de estos dos indicadores, %TV y ϵ_{EF} , se está considerando una correlación lineal que pasa por el origen, y se observa una pendiente igual a 0.4955 y un coeficiente R^2 de 0.5353. Esto corrobora una vez más lo antes obtenido en investigaciones anteriores en donde ambos indicadores tienen una relación similar: $\epsilon_{EF} \sim \frac{1}{2} \cdot \%TV$.

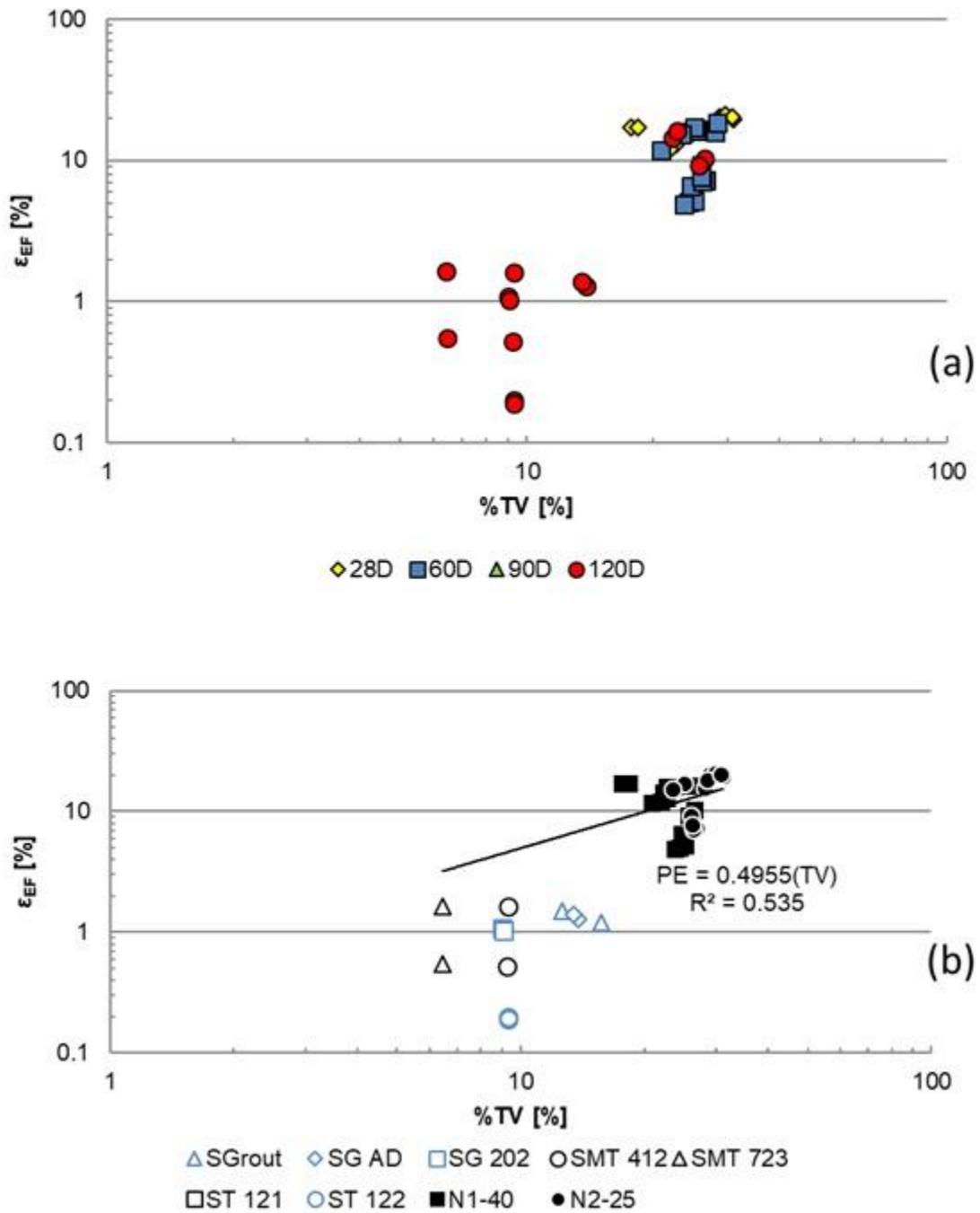


Figura 4.9 Relación de %TV y ϵ_{EF} graficado (a) por edad de prueba y (b) por tipo de mortero evaluado.

5 Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos en la presente investigación, se concluye que:

Los indicadores de durabilidad usados para caracterizar física y mecánicamente los morteros de reparación evaluados mostraron valores muy variados en función de la calidad de los morteros utilizados en la presente investigación. Esto demuestra que los rangos de caracterización propuestos por investigaciones anteriores y normativas nacionales e internacionales son aplicables no sólo a concretos sino también a morteros de reparación.

Los morteros convencionales evaluados en la presente investigación mostraron rangos de desempeño por durabilidad entre bajos (N2-25) y moderados (N1-40), los que podrían no considerarse como materiales de reparación adecuados si se utilizan en estructuras dañadas ubicadas en ambientes muy agresivos.

Los morteros comerciales tomados como referencia y evaluados en una investigación previa (Mejía *et al.*, 2018) mostraron un mejor desempeño que los morteros convencionales, aunque su desempeño estuvo entre intermedio y excelente, por lo que, en un futuro cercano, se continuarán evaluando otros morteros comerciales que demuestren un desempeño alto en términos de durabilidad.

Bibliografía

- AASHTO T 259 (2002). "Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration", *Reapproval Notice*, 2017, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, Estados Unidos.
- ASTM C597-02. (2002). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. Baltimore, MD, U.S.A.: American Society Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C642-97. (1997). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. Baltimore, MD, U.S.A.: American Society Testing and Materials (ASTM).
- Castro Borges, P. (1998). *Corrosión en estructuras de concreto armado*. México: IMCYC.
- Celis Mendoza, C. (2007). *Mejora en la Durabilidad de Materiales base Cemento, utilizando Adiciones Deshidratadas de dos Cactáceas*. Santiago de Querétaro, Querétaro, México: Universidad Marista de Querétaro.
- DURAR, R. T. (1998). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado* (3era ed.). (O. Trocónis de Rincón, A. Romero de Carruyo, C. Andrade, P. Helene, & I. Díaz, Eds.) Río de Janeiro: Programa Iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo, subprograma XV "corrosión: impacto ambiental sobre materiales".
- Herbert Urquiza, E. (2010). *Evaluación del Comportamiento Físico de Morteros Fabricados con Cementos Mexicanos Mediante Pruebas No Destructivas y Destructivas*. Santiago de Querétaro, Querétaro, México: Universidad Marista de Querétaro.
- Hernández López, Y. E. (2009). *Evaluación de microsílíce en la reparación de vigas de hormigón armado contaminado con cloruros*. Universidad de Granada, Departamento de Ingeniería Civil, Área de Ingeniería de la Construcción, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Granada: Universidad de Granada.
- Malumbela, G., Alexander, M., & Moyo, P. (2010). Variation of steel loss and its effect on the ultimate flexural capacity of RC beams corroded and repaired under load. *Construction and Building Materials*(24), 1051-1059.
- Mejía Durán, M., Torres Acosta, A. A., del Valle Moreno, A., Vázquez Galván, V. E., Trueba Mendoza, C., Martínez Madrid, M., & Lomelí González, M. G. (2018).

Publicación Técnica 513 - Caracterización física y mecánica por desempeño de morteros de reparación, para su uso en la infraestructura del transporte de la SCT. Publicación Técnica No. 513, Instituto Mexicano del Transporte, Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integración Estructural, Sanfandila.

Michel, A., Solgaard, A., Pease, B., Geiker, M., Stang, H., & Olesen, J. (2013). Experimental investigation of the relation between damage at the concrete-steel interface and initiation of reinforcement corrosion in plain and fibre reinforced concrete. *Corrosion Science*, 308-321.

Muñoz Noval, A. (2009, Noviembre). Comportamiento de vigas hiperestáticas de hormigón armado corroídas y reparadas con mortero. Pérdida de propiedades mecánicas del acero de refuerzo y fisuración del recubrimiento de hormigón por corrosión. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.

Neville, A. M. (2013). *Tecnología del Concreto*. México, D.F.: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C.

NMX-C-083-ONNCCE-2002. (2002). *Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto - Método de Prueba*. México, D.F.: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

NMX-C-501-ONNCCE-2015. (2015). *Industria de la Construcción - Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado - Medición de Velocidad de Corrosión en Campo - Especificaciones y Método de Ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

NMX-C-504-ONNCCE-2015. (2015). *Industria de la Construcción - Determinación de la Absorción Capilar en Concreto Hidráulico - Método de Ensayo*. México, D.F.: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

NMX-C-514-ONNCCE-2016. (2016). *Industria de la Construcción - Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico - Especificaciones y métodos de ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

REHABILITAR, R. (2003). *Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón. Reparación, Refuerzo y Protección*. (P. Helene, & F. Pereira, Eds.) Sao Paulo: Red Rehabilitar CYTED XV. F; Construction Chemicals, Degussa.

Torres Acosta, A. A., & Castro Borges, P. (2018, mayo). La filosofía para obtener obras de concreto durables. *IC Ingeniería Civil - Estructuras*, 1(586), 12-15.

Torres Acosta, A. A., & Martínez Madrid, M. (2001). *Diseño de Estructuras de Concreto con Criterios de Durabilidad*. Secretaría de Comunicaciones y

- Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural. Sanfandila, Qro.: Instituto Mexicano del Transporte.
- Torres Acosta, A. A., Gudiño Espino, M., López, W., Orozco, H., Ramírez Montes, R., & Martínez Madrid, M. (2012, August 9-14). XXI International Materials Research Congress, Symposium 7C: NACE: Corrosion and Metallurgy. *Methodology for the Rehabilitation of Corroded Concrete Structures*. Cancún, Quintana Roo, México: XXI International Material Research Congress.
- Torres Acosta, A., Fabela Gallegos, M., Vázquez Vega, D., Hernández Jiménez, J., Martínez Madrid, M., & Muñoz Noval, A. (2002). *Cambios en la rigidez y resistencia a la flexión de vigas de concreto dañadas por corrosión del refuerzo*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural. Sanfandila, Qro.: Instituto Mexicano del Transporte.
- Tronconis de Rincón, O., Castro, P., Moreno, E. I., Torres-Acosta, A. A., Morón de Bravo, O., Arrieta, I., Martínez-Madrid, M. (2004). Chloride profiles in two marine structures - meaning and some predictions. *Building and Environment*, 39, 1065-1070.



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