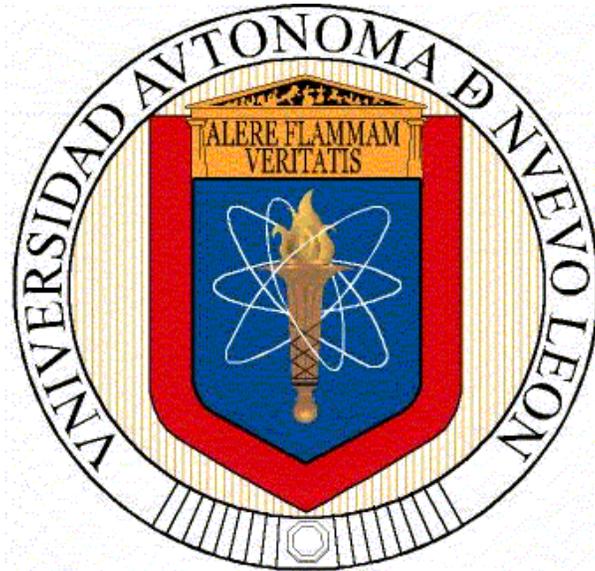


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**EFFECTO DE LA CENIZA VOLANTE EN LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DE MORTEROS DE
REPARACIÓN EXPUESTOS A AMBIENTE INDUSTRIAL Y A
CONDICIONES CONTROLADAS DE LABORATORIO**

**POR
JOSÉ MIGUEL FLORES JARQUÍN**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN**

NOVIEMBRE

2014

Índice de contenidos.

Agradecimientos	IV
Dedicatoria	V
Resumen	VI
1. Introducción	1
1.1. Conceptos de durabilidad y vida util	3
1.1.1. Durabilidad	3
1.1.2. Vida Útil.....	4
1.1.3. Condiciones de agresividad del ambiente	5
1.2. Cemento portland	6
1.3. El concreto y su interacción con el acero de refuerzo	8
1.4. Degradación del concreto	9
1.5. Corrosión del acero de refuerzo	11
1.5.1. Fases de la corrosión	11
1.5.2. Tipos de corrosión	13
1.5.3. Mecanismos que desencadenan la corrosión	14
1.5.4. Corrosión por carbonatación	15
1.5.4.1. Profundidad de carbonatación.....	16
1.5.4.2. Factores que influyen en velocidad de carbonatación ...	17
1.5.5. Daños por corrosión en estructuras de concreto	20
1.5.5.1. Influencia de las grietas	21

1.6.	Sistemas de reparación para estructuras de concreto reforzado dañadas por corrosión	23
1.6.1.	Reparación por parcheo	23
1.6.1.1.	Eliminación del concreto.....	24
1.6.1.2.	Preparación del acero de refuerzo	25
1.6.1.3.	Materiales de reparación	25
2.	Antecedentes	34
2.1.	Aspectos generales	35
2.2.	Objetivos	42
2.2.1.	Objetivo general	42
2.2.2.	Objetivos específicos.....	42
2.3.	Hipótesis	43
3.	Programa experimental	44
3.1.	Materiales.....	45
3.1.1.	Cemento.....	45
3.1.2.	Ceniza Volante	46
3.1.3.	Agregados	47
3.1.3.1.	Agregado grueso.....	47
3.1.3.2.	Agregado fino	48
3.1.3.3.	Características físicas de los agregados	49
3.1.4.	Concreto.....	50
3.1.4.1.	Preparación y mezclado	50
3.1.5.	Acero.....	51
3.2.	Materiales de reparación	52

3.2.1. Mortero de Referencia (MR)	52
3.2.2. Mortero de reparación con 20% de CV (M1)	52
3.2.3. Mortero de reparación con 50% de CV (M2)	52
3.2.4. Mortero de reparación comercial (C1)	53
3.2.5. Mortero de reparación comercial (C2)	54
3.2.6. Mortero de reparación comercial (C3)	54
3.3. Métodos	55
3.3.1. Ensayos de caracterización de los materiales	55
3.3.1.1. Microscopia electrónica de barrido (SEM)	55
3.3.1.2. Difracción de rayos X (DRX)	56
3.3.1.3. Fluorescencia de rayos X (FRX).....	56
3.3.1.4. Distribución del tamaño de partícula (DTP)	56
3.3.1.5. Densidad	57
3.3.2. Ensayos Físico - Mecánicos	58
3.3.2.1. Ensayos al concreto	58
3.3.2.1.1. Propiedades en estado fresco	58
3.3.2.1.2. Resistencia a la compresión.....	60
3.3.2.1.3. Módulo de elasticidad.....	61
3.3.2.2. Ensayos a los morteros de reparación	62
3.3.2.2.1. Consistencia.....	63
3.3.2.2.2. Resistencia a la compresión.....	64
3.3.2.2.3. Resistencia a la flexión.....	65
3.3.2.2.4. Retracciones	66
3.3.2.2.5. Porosidad al agua	68

3.3.2.2.6. Permeabilidad al aire.....	70
3.3.2.2.7. Adherencia entre el concreto y mortero.....	72
3.3.3. Ensayos de durabilidad.....	73
3.3.3.1. Ambientes de exposición.....	73
3.3.3.2. Profundidad de carbonatación.....	76
3.3.3.3. Pruebas electroquímicas.....	77
3.3.3.3.1. Potencial de corrosión (Ecorr).....	82
3.3.3.3.2. Velocidad de corrosión (Icorr).....	82
4. Resultados y discusión.....	84
4.1. Caracterización de los materiales.....	85
4.1.1. Microscopia electrónica de barrido (SEM).....	85
4.1.2. Espectroscopia de dispersión de energía (EDS).....	86
4.1.3. Difracción de rayos X (DRX).....	87
4.1.4. Fluorescencia de rayos X (FRX).....	89
4.1.5. Distribución del tamaño de partícula (DTP).....	90
4.1.6. Ensayos de caracterización de los materiales.....	55
4.2. Ensayos Físico - Mecánicos.....	91
4.2.1. Ensayos al concreto.....	91
4.2.1.1. Propiedades en estado fresco.....	91
4.2.1.2. Resistencia a la compresión.....	92
4.2.1.3. Módulo de elasticidad.....	92
4.2.2. Ensayos a los morteros de reparación.....	93
4.2.2.1. Consistencia.....	93
4.2.2.2. Resistencia a la compresión.....	94

4.2.2.3.	Resistencia a la flexión	95
4.2.2.4.	Retracciones.....	97
4.2.2.5.	Porosidad al agua.....	100
4.2.2.6.	Permeabilidad al aire	102
4.2.2.7.	Adherencia entre el concreto y mortero	104
4.3.	Ensayos de durabilidad	106
4.3.1.	Profundidad de carbonatación.....	107
4.3.2.	Potencial de corrosión (Ecorr)	110
4.3.3.	Velocidad de corrosión (Icorr).....	117
5.	Conclusiones	128
6.	Referencias bibliográficas	132

RESUMEN

En ambientes industriales y urbanos, las grandes concentraciones de CO₂ son un problema para las edificaciones de concreto reforzado, tanto en su estética como en su comportamiento mecánico, debido a la carbonatación del concreto, reduciendo su alcalinidad y generando la despasivación y corrosión del acero.

Es importante tomar en cuenta que al alcanzar la vida útil proyectada de una estructura, esta no debe ser demolida hasta no realizar estudios patológicos que determinen su estado, pudiendo solo incrementar la periodicidad y el costo del mantenimiento.

El ambiente donde está construida una obra, condiciona fuertemente su vida útil, pudiendo originar diferentes problemas que afecten su seguridad, su funcionalidad y/o estética. Esta situación puede afectar a edificaciones longevas, mal diseñadas y/o con un mal proceso constructivo. Por tal motivo, es necesario llevar a cabo investigaciones sobre los materiales de reparación adecuados para el entorno y las condiciones de servicio de cada estructura. A su vez el empleo de materiales minerales alternos como la ceniza volante, permitirán tener materiales de reparación de bajo costo ambiental y que cumplan con las características necesarias de una reparación duradera.

Las reparaciones pueden ser efectivas y duraderas solo cuando se ha realizado un diagnóstico detallado de las causas de deterioro y considerando la selección de materiales adecuados para el entorno particular, las condiciones de servicio y la compatibilidad con los sustratos destinados.

En el presente trabajo de investigación, se evalúa la durabilidad de tres morteros de reparación comerciales y dos con diferentes adiciones de ceniza volante bajo el ataque de carbonatación en ambiente industrial y condiciones de laboratorio.

Capítulo I

Introducción

CAPITULO I - INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado es uno de los materiales de construcción más utilizado, ya que es versátil, económico y duradero. Esta combinación de concreto y acero, dan un material compuesto ideal que ofrece un amplio abanico de aplicaciones en la ingeniería.

Durante muchos años se pensó que las construcciones tendrían una vida ilimitada, los diseñadores y constructores estaban interesados principalmente en las características asociadas con la resistencia mecánica del material. Actualmente se puede considerar que el problema de las construcciones de concreto reforzado que más preocupa, es la falta de durabilidad de las estructuras.

La interacción entre el concreto y el medio ambiente es el principal factor que condiciona la durabilidad de las estructuras. La falta de conocimiento sobre el comportamiento de la estructura frente a la agresividad del ambiente en que está ubicada, es la causa principal de degradación en la estructuras de concreto reforzado.

1.1. Conceptos de Durabilidad y Vida Útil.

1.1.1. Durabilidad.

Según define la PCA, la durabilidad es la habilidad del concreto en resistir a la acción del ambiente, al ataque químico y a la abrasión, manteniendo sus propiedades de ingeniería [1]. Los componentes del concreto, la proporción, interacción entre los mismos, además de los métodos de colocación y curado, determinan la durabilidad y vida útil del concreto.

Diferentes factores actúan durante la vida útil de cualquier obra de concreto, afectando sus características de durabilidad. Estas condiciones pueden ser tanto de la acción del entorno como de sus propiedades intrínsecas.

La durabilidad depende del ambiente al que se exponga el concreto o de causas internas del concreto mismo. Las causas externas pueden ser físicas, químicas o mecánicas: se pueden deber al intemperismo, temperaturas extremas, abrasión, a la acción electrolítica y al ataque de líquidos o gases naturales o industriales [2]. La extensión del daño producido por dichos agentes dependerá en gran parte de la calidad del concreto, aunque en condiciones extremas cualquier concreto se deteriora [3]. Las causas internas son las reacciones álcali-agregado, los cambios de volumen por diferencias en las propiedades térmicas del agregado y a la pasta de cemento y, más que nada, a la permeabilidad del concreto. Esta última determina en gran medida la

vulnerabilidad del concreto a los factores externos, de tal manera que, para ser durable, el concreto tiene que ser relativamente impermeable [2].

1.1.2. Vida Útil.

Según describe el reporte de DURAR [4], por vida útil se entiende al periodo de tiempo durante el cual una estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento. En otras palabras, si no se cumple con estas tres propiedades, ésta ya sobrepasó el periodo de su vida útil.

Como se sabe, las estructuras de concreto reforzado son proyectadas y construidas para satisfacer durante su vida útil, un conjunto de requisitos funcionales, sin que se produzcan costos inesperados por mantenimiento y/o reparaciones. Se debe tomar en cuenta que al alcanzar la vida proyectada, la estructura no debe ser demolida, simplemente la periodicidad y el costo de mantenimiento se incrementa. Muchas veces es conveniente realizar tareas de reparación o reacondicionamiento más detalladamente, con el fin de prolongar la vida útil de la construcción. El ambiente donde está construida una obra, condiciona fuertemente su vida útil, pudiendo originar a lo largo de la misma, patologías que afecten su seguridad, su funcionalidad y/o estética.

1.1.3. Condiciones de agresividad del ambiente.

La agresividad del ambiente está en función de numerosos factores que no siempre son independientes uno de otro. Dichos factores pueden ser la humedad del medio ambiente y su variabilidad en el tiempo y el lugar, la presencia de agentes agresivos y oxígeno, y la temperatura.

La clasificación de la agresividad del ambiente, con base en las condiciones de exposición de la estructura o de sus partes, debe tener en cuenta el micro y el macro clima actuantes sobre la estructura [5].

A partir de una síntesis de las publicaciones técnicas existentes sobre el tema de la durabilidad [6,7], la agresividad ambiental puede ser evaluada desde el punto de vista de la durabilidad del acero y del propio concreto, para lo cual se han establecido las clasificaciones que se muestran en la Tabla 1.1 y 1.2.

Tabla 1.1. Clasificación de la agresividad del ambiente [5].

Clase de agresividad	Agresividad	Riesgo de deterioro
I	Débil	Insignificante
II	Media	Pequeño
III	Fuerte	Grande
IV	Muy fuerte	Elevado

Tabla 1.2. Clasificación de la agresividad del ambiente relacionada con la durabilidad de las estructuras [5].

Clase de agresividad	Macroclima	Microclima	Gas CO₂	Cloruros Cl-
I	Atmosfera Rural	RH ≤ 60% Interiores Secos	≤ 0.3%	≤ 200 mg/l
II	Atmosfera Urbana	RH de 60 a 95% ó RH = 100%	≤ 0.3%	≤ 200 mg/l
III	Atmosfera Marina o Industrial	RH de 65 a 98%	≥ 0.3%	>500 mg/l
IV	Polos Industriales	Zonas húmedas Industriales	> 0.3%	>500 mg/l

1.2. Cemento portland.

El cemento portland (CP) se produce moliendo Clinker, el cual se obtiene mediante la calcinación de las materias primas, una mezcla de caliza y arcilla. Sus componentes principales son los silicatos tricálcicos y bicálcicos (C₃S y C₂S), el aluminato y ferroaluminato de calcio (C₃A y C₄AF) (En la química del cemento se usan las siguientes abreviaciones: CaO = C; SiO = S; Al₂O₃ = A; Fe₂O₃ = F; H₂O = H; SO₃ = \hat{S}). También se le agrega yeso (C \hat{S}) al clínter antes de molerlo, para controlar la velocidad de hidratación de los aluminatos [8,9]. La Tabla 1.3 muestra los intervalos típicos de variación de los componentes del Cemento Portland.

Tabla 1.3. Principales componentes del CP y sus porcentajes típicos en masa [10].

Componente	Nomenclatura	Abreviación	Porcentajes
Silicato tricálcicos	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	45-60%
Silicato bicálcicos	$a\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S	5-30%
Aluminato tricálcicos	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6-15%
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	6-8%
Yeso	$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}\hat{\text{S}}$	3-5%

Además de estos componentes principales, existen también otros productos secundarios como MgO , Mn_2O_3 , Na_2O y K_2O que están presentes en cantidades pequeñas pero variables.

En presencia de agua, los componentes del cemento portland forman productos hidratados. Los aluminatos reaccionan primero, y son los principales responsables del fraguado, es decir, la solidificación de la pasta de cemento. La hidratación del C_3A y del C_4AF , en presencia de yeso, da lugar principalmente a sulfoaluminatos hidratados de calcio. El endurecimiento de la pasta de cemento, es decir, el desarrollo de resistencia que sigue a la solidificación, está gobernada por la hidratación de los silicatos. La hidratación del C_3S y del C_2S da lugar a silicatos hidratados de calcio, formando un gel rígido que se indica como C-S-H [10].

1.3. El concreto y su interacción con el acero de refuerzo.

El concreto es un material compuesto por los agregados y la pasta que es producto de la reacción del cemento y el agua. La estructura y composición de la pasta de cemento, determina la durabilidad y el funcionamiento del concreto a largo plazo [10]. El concreto comúnmente es reforzado con barras de acero. La protección que el concreto le proporciona al acero y su capacidad para soportar diferentes tipos de degradación, también depende de su estructura.

Este material posee características que lo hacen ser el más usado en la industria de la construcción: resistencia mecánica, poca variación volumétrica, baja conductividad térmica y resistente a la penetración del agua, a los ataques químicos y al desgaste, requiere poco mantenimiento cuando se fabrica apropiadamente, etc. [11].

El concreto reforzado, además de poseer características mecánicas muy amplias, ha demostrado poseer una durabilidad adecuada para la mayoría de los usos a los que se le destina. Esta durabilidad de las estructuras de concreto reforzado es el resultado natural de la acción protectora, de doble naturaleza, que el concreto ejerce sobre el acero. Debido a las reacciones de hidratación del cemento con el agua, el concreto resulta un sólido compacto y denso, pero poroso. Entonces, aunque el recubrimiento del acero supone una barrera física, ésta es permeable en cierta medida y permite el acceso de elementos agresivos hasta el acero [12].

En cuanto a la alcalinidad del concreto, es debida, principalmente, al hidróxido cálcico que se forma durante la hidratación de los silicatos del cemento y a los álcalis que pueden estar incorporados como sulfatos en el clínker. Estas sustancias sitúan el pH de la fase acuosa contenida en los poros en valores entre 12.6 y 14, es decir, en el extremo más alcalino de la escala de pH. A estos valores de pH y en presencia de una cierta cantidad de oxígeno, el acero de las armaduras se encuentran pasivadas, es decir, recubierto de una capa de óxidos transparente, compacta y continua que lo mantiene protegido por periodos indefinidos, aún en presencia de humedades elevadas en el concreto [12].

1.4. Degradación del concreto.

Los procesos de degradación en el concreto se pueden clasificar como (Figura 1.1): físicos (debido a variaciones térmicas naturales, tales como los ciclos de hielo-deshielo, o artificiales, tales como los producidos por los incendios), mecánicos (abrasión, erosión, impacto, explosión), químicos (ataque por ácidos, sulfatos, iones de amonio y magnesio, solo agua, o reacciones álcali-agregado), biológicos (ataque por hongos) y estructural (sobrecargas, asentamientos, cargas cíclicas). En la práctica se pueden presentar simultáneamente estos procesos, con frecuencia dando lugar a la acción sinérgica [13,14].

Las alteraciones que ocurren en el concreto antes de que la estructura ha sido terminada, es decir, dentro de las primeras horas hasta meses después de la colocación del concreto (agrietamiento por asentamiento plástico, retracción plástica o por secado, retracción térmica), comúnmente no se consideran como fenómenos de deterioro, a pesar de que son importantes para la durabilidad de la estructura [10].

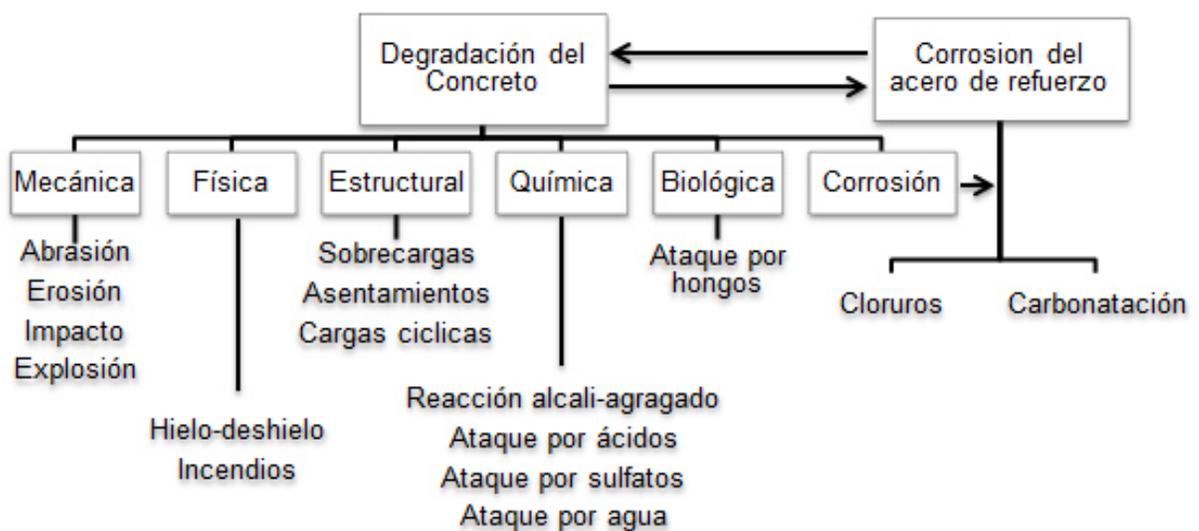


Figura 1.1. Causas de deterioro de estructuras de concreto reforzado [10].

Los mecanismos de deterioro del concreto y la corrosión del acero de refuerzo, están directamente relacionados. Dichos mecanismos generan la destrucción del recubrimiento de concreto o la aparición de microfisuras que comprometen sus características protectoras. Además el fenómeno de la corrosión, debido a la acción expansiva de los productos de corrosión, genera agrietamiento o delaminación del concreto y reduce su adherencia con el acero de refuerzo [14].

1.5. Corrosión del acero de refuerzo.

La corrosión es un fenómeno inevitable al ser la respuesta de los metales a una ley natural, y es un fenómeno que se lleva a cabo a través de un comportamiento electroquímico en el que hay un intercambio de electrones por medio de una reacción química llevándose a cabo la pérdida de estos para que ocurra la oxidación [15].

El proceso de corrosión del acero dentro del concreto, puede desarrollarse en dos procesos individuales: el proceso anódico, que es la disolución del acero y se produce cuando la capa protectora (pasivante) del acero se elimina por un ambiente ácido, o se hace permeable por la acción de los iones cloruro; y el proceso catódico, el cual se produce hasta que en la superficie del acero se dispone de una cantidad suficiente de oxígeno y agua, los cuales al combinarse con los electrones suministrados por el ánodo dan lugar a la formación de iones de hidroxilo [16].

1.5.1. Fases de la corrosión.

Desde el punto de vista de la corrosión de estructuras de concreto reforzado, Tuutti definió un modelo de vida útil que representa el tiempo que tarda una estructura de concreto reforzado cumpliendo los servicios para los cuales ha sido diseñada [17]. Dicho modelo se puede dividir en dos distintas fases (Figura 1.2).

La primera fase es la Iniciación, en la cual el acero de refuerzo esta pasivado pero la penetración de sustancias agresivas (CO_2 , cloruros) a través de la superficie de concreto, puede generar la perdida de esta pasividad. La duración de la fase de iniciación depende del espesor del recubrimiento y de la velocidad de penetración de los agentes agresivos así como de su concentración necesaria para despasivar el acero [17].

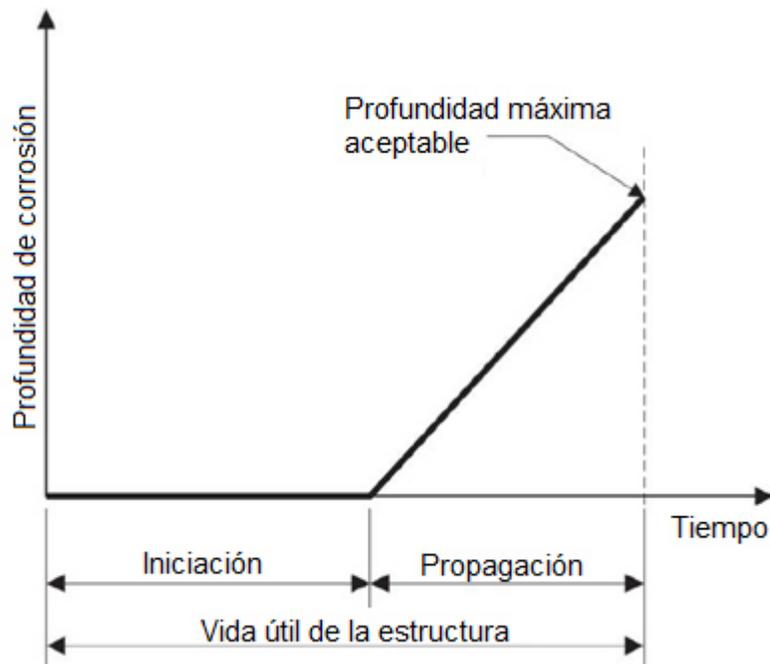


Figura 1.2. Modelo de Tuutti del tiempo de vida útil de una estructura [17].

La fase de Iniciación se termina con la despasivación del acero y da paso a la segunda fase: Propagación de la Corrosión, la cual inicia una vez que se ha destruido la capa protectora y propaga la herrumbre por el desarrollo de las reacciones de oxidación en la superficie de las armaduras [17]. Esta fase termina cuando se alcanza un estado a partir del cual las consecuencias de la

corrosión no se pueden tolerar más [18]. La corrosión solo tendrá lugar si están presentes el agua y el oxígeno en la superficie del acero de refuerzo [19].

1.5.2. Tipos de corrosión.

La corrosión del acero de refuerzo en las estructuras de concreto ocurre por la destrucción de la capa pasivante, debido a los siguientes factores [20,21]:

- La presencia de una cantidad suficiente de cloruros (añadidos durante la fabricación del concreto o por la penetración del exterior) u otros iones despasivantes en contacto con el acero.
- La disminución de la alcalinidad del concreto cuando éste reacciona con sustancias acidas del medio ambiente.

Las formas que puede adoptar la corrosión son diversas. Generalmente se clasifican por la extensión del área atacada, los más frecuentes son: generalizada, localizada, por picadura y fisurante (Figura 1.3).

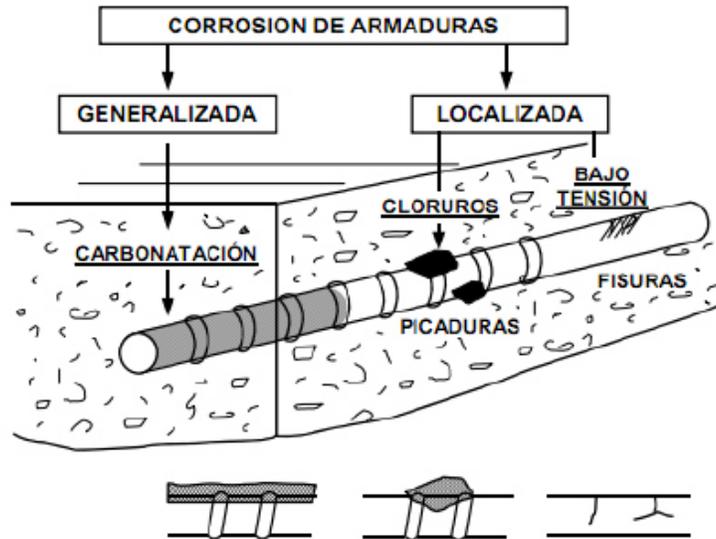


Figura 1.3. Tipos de corrosión en las armaduras y los factores que la generan [21].

De acuerdo a la cantidad de área corroída, se pueden considerar dos tipos de corrosión: generalizada y localizada, los iones despasivantes dan lugar a la corrosión localizada, mientras que la reducción de pH genera la disolución completa de la capa pasivante, esta da lugar a una corrosión generalizada [21]. Otro tipo es la corrosión fisurante bajo tensión, que solo aparece en concreto pretensado o postensado.

1.5.3. Mecanismos que desencadenan la corrosión.

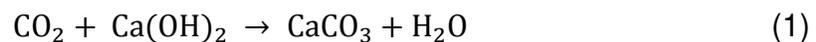
En el punto anterior se estudiaron los factores externos más comunes que influyen en la corrosión del acero en el concreto, estos son el ingreso de iones cloruros y la carbonatación.

Para fines de este proyecto, el proceso de deterioro que se va a estudiar es la corrosión inducida por la carbonatación, a continuación se detallan las características principales que controlan el ingreso del CO₂ en el concreto.

1.5.4. Corrosión por carbonatación.

En ambientes húmedos, el dióxido de carbono presente en el aire forma una solución acuosa ácida (ácido carbónico) que puede reaccionar con la pasta de cemento hidratado y tiende a neutralizar la alcalinidad del concreto (este proceso se conoce como carbonatación), el hidróxido de calcio es el hidrato que reacciona más fácilmente con el CO₂ [22]. Esto ocasiona que el ambiente propicio para la estabilidad termodinámica del acero de refuerzo sea modificado y la protección química que el concreto le confiere al acero desaparezca.

Este fenómeno es más típico de ambientes industriales y urbanos que en medios rurales. La reacción que tiene lugar en la solución acuosa se muestra a continuación [10]:



La carbonatación no causa ningún daño al propio concreto, aunque si puede generar retracción. De hecho, puede incluso reducir la porosidad del concreto y conducir a un aumento en la resistencia. Sin embargo, la carbonatación tiene efectos importantes sobre la corrosión del acero en el concreto. La primera consecuencia es que el pH de la solución de poro cae de sus valores normales de pH 13 a 14, a valores que se aproximan a la

neutralidad. La solución de poros se compone principalmente de agua pura, por lo tanto, el acero en concreto carbonatado se corroe como si estuviera en contacto con el agua [23,24].

1.5.4.1. Profundidad de carbonatación.

La medición de la profundidad de carbonatación normalmente se lleva a cabo rociando fenolftaleína en una superficie de concreto recién quebrada. Las áreas donde el pH es mayor a 9 toma un color rosa-purpura típico de la fenolftaleína en un ambiente básico, mientras que las áreas carbonatadas se mantienen sin cambios de color [10].

La velocidad de carbonatación disminuye con el tiempo, ya que el CO₂ tiene que difundir a través de los poros de la capa exterior ya carbonatada.

La penetración de la carbonatación en el tiempo se puede describir como:

$$d = K \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

Donde d es la profundidad de carbonatación (mm) y t es el tiempo (años). El coeficiente de carbonatación K (mm/año^{0.5}) se puede asumir como una medida de la velocidad de carbonatación. Este coeficiente depende de varios factores como el tipo de cemento, proporciones, relación a/mc, etc. [21].

1.5.4.2. Factores que influyen en la velocidad de carbonatación.

El proceso de carbonatación es completamente natural y es afectado también por variables naturales, consecuencia de las condiciones de exposición del concreto. La velocidad de carbonatación depende principalmente del contenido de humedad relativa (RH), de la permeabilidad del concreto, de la temperatura y de la concentración de CO₂ disponible en el ambiente.

- **Humedad.**

La velocidad de carbonatación varía con la humedad del concreto. La difusión del CO₂ en el concreto se facilita a través de los poros secos y es muy lento a través de los poros saturados de agua (la difusión del CO₂ en el agua es cuatro veces menor que en el aire). Esto significa que cuando los poros del concreto están saturados, el CO₂ no penetra, por otro lado se sabe que la reacción de carbonatación se produce solo en presencia de agua, por lo que en concretos secos, dicha reacción es despreciable [25,26].

La velocidad de carbonatación puede ser correlacionada con la humedad del medio ambiente como se muestra en la Figura 1.4.

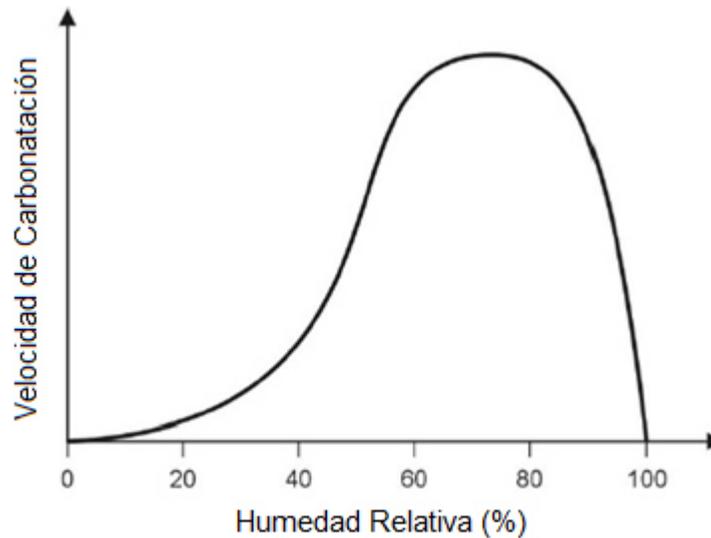


Figura 1.4. Representación esquemática de la velocidad de carbonatación del concreto en función de la humedad relativa (RH) del ambiente [17].

El intervalo más crítico de RH para promover la carbonatación es de 60 a 70%. Otras investigaciones [27] manejan un rango más amplio de RH entre 50 y 75%. Sin embargo la velocidad de carbonatación en las estructuras puede variar dependiendo de los ciclos de humedecimiento y secado a los que este expuesto, incluso la velocidad de carbonatación puede ser muy variable en diferentes partes de la misma estructura [25].

- **Concentración de CO₂.**

La concentración del CO₂ en la atmósfera puede variar de 0.03% en un medio rural a más de 0.1% en ambientes urbanos. Pueden alcanzarse altas concentraciones bajo condiciones específicas de exposición, tales como túneles de vehículos, estacionamientos techados, entre otros. A medida que el contenido de CO₂ en el aire aumenta, la velocidad de carbonatación aumenta.

Ensayos acelerados llevados a cabo en el laboratorio para comparar la resistencia a la carbonatación de diferentes tipos de concreto, mostraron que una semana de exposición a una atmosfera que contiene 4% de CO₂ causará la misma carbonatación que un año de exposición a una atmosfera normal [28].

- **Temperatura.**

La temperatura del ambiente aunque no es un parámetro tan importante como la humedad, es de relativa importancia, un aumento en la temperatura elevará la velocidad de carbonatación [10].

- **Factores propios del concreto.**

- ✓ Relación Agua/Cemento; una disminución en la relación a/c, disminuye la porosidad capilar de la pasta de cemento hidratado, por lo tanto, la velocidad de carbonatación disminuye.

- ✓ Curado; es un factor que condiciona fuertemente la porosidad del concreto. Un curado pobre afecta principalmente al recubrimiento de concreto, el cual tiene por objeto proteger al acero [29].

- ✓ Tipo de cemento; la alcalinidad del concreto está en función de la composición química del cemento y de las adiciones. La menor alcalinidad de los concretos con adiciones, se compensa con la baja permeabilidad de sus pastas, si se cura apropiadamente [28].

1.5.5. Daños por corrosión en estructuras de concreto reforzado

La corrosión es una preocupación en la industria de la construcción debido al deterioro del acero, que se traduce en daños estructurales. Sin embargo la mayoría de los problemas de corrosión en estructuras de concreto reforzado no se debe a la pérdida del acero, si no al crecimiento del óxido, esto causa la formación de grietas y el desprendimiento del recubrimiento de concreto [30].

La reducción de la capacidad portante de un elemento de concreto reforzado afectado por la corrosión del acero se debe, fundamentalmente, a los siguientes efectos consecuencia de la corrosión [31]:

- Pérdida de sección efectiva del concreto debido a la fisuración y al desprendimiento del recubrimiento.
- Disminución de la sección y de la ductilidad del acero.
- Pérdida de adherencia concreto-acero. El mayor o menor progreso de estos factores, es función de la velocidad a la que se desarrolle el proceso, que a su vez, depende del tipo de agente agresivo y de las condiciones ambientales.

El problema más común generado por la corrosión es el desprendimiento del recubrimiento de concreto, el cual se genera por la formación de óxidos (no densos) que ocupan un volumen muy grande en la superficie del acero, de hasta diez veces el volumen del acero. Lo anterior aunado a la baja resistencia a la tensión del concreto causa la ruptura del mismo [30].

Es muy común observar que las esquinas de los elementos de concreto reforzado tienden a agrietarse primero. Esto es porque el oxígeno, agua, cloruros y CO_2 tienen dos caras para penetrar hacia el acero. El desconchamiento ocurre como producto de la corrosión en las barras de refuerzo cercanas y la formación de grietas horizontales como se muestra en la Figura 1.5 [30].

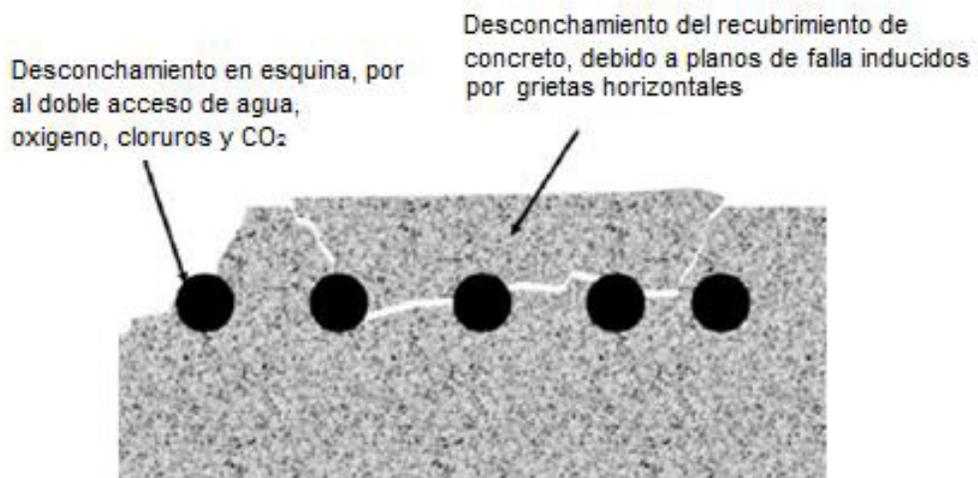


Figura 1.5. Esquema del desconchamiento inducido por la corrosión en el acero de refuerzo [30].

1.5.5.1. Influencia de las grietas.

Las grietas que aparecen en el concreto son un rápido camino para la penetración de los agentes agresivos hasta el acero de refuerzo. La corrosión del acero puede relacionarse con el ancho de las grietas. Las normativas establecen un ancho máximo admisible de las grietas en el concreto de 0.3 mm para ambiente no agresivos y de 0.1 mm para ambientes agresivos [10].

Debe tomarse en cuenta que las grietas en estructuras de concreto pueden tener muchos orígenes y características diferentes. Existen grietas por flexión de los elementos de concreto, las cuales son perpendiculares al acero de refuerzo, también existen grietas debidas a las contracciones plásticas o restringidas, las cuales pueden presentarse en gran parte de la superficie de concreto y pueden ser paralelas al acero.

Las grietas pueden ser perpendiculares y paralelas al acero, siendo estas últimas mucho más perjudiciales porque abarcan mayor superficie de acción [32].

Los daños generados por la corrosión del acero, normalmente se manifiestan a través de grietas en el concreto paralelas a la dirección del acero de refuerzo, delaminación y/o desprendimientos del recubrimiento, esto propicia la exposición del acero a agentes agresivos (Figura 1.6), acelerando el proceso de corrosión.



Figura 1.6. a) Agrietamiento del recubrimiento de concreto paralelo al refuerzo, b) Desprendimiento del recubrimiento por la corrosión del acero.

1.6. Sistemas de reparación para estructuras de concreto reforzado dañadas por corrosión.

Después de haber detectado el daño por corrosión en una estructura, es necesario emprender acciones para repararla y alargar su vida útil. Entre las soluciones más comunes para reparar estructuras dañadas, están la técnica de reparación por parcheo, técnicas electroquímicas de realcalinización, remoción de cloruros y protección catódica y los inhibidores de corrosión [33].

El sistema de reparación depende de la gravedad del problema, de las condiciones internas o externas a las que esté expuesta la estructura, condición, cuestiones económicas, humanas y tecnológicas que se disponga ya que cada estructura es diferente [30].

1.6.1. Reparación por parcheo.

De las técnicas de reparación existentes, la reparación por parcheo es la más utilizada para estructuras dañadas por la corrosión del acero. Tiene por objeto la restauración de la protección del acero por medio de la sustitución del concreto dañado con un material adecuado.

El trabajo de reparación se puede dividir básicamente en los siguientes pasos: eliminación del concreto en partes bien definidas de la estructura y a profundidades específicas, limpieza del acero expuesto y la aplicación de un material de reparación apropiado para proporcionar un recubrimiento adecuado

al acero [34-39]. Cada uno de estos pasos debe realizarse correctamente con el fin de garantizar la eficacia del trabajo de reparación.

1.6.1.1. Eliminación del concreto.

Existen muchas técnicas para eliminar el concreto en los trabajos de reparación, que pueden ser desde la eliminación leve de la superficie hasta métodos destructivos como las técnicas de chorro (*blasting*) [35,37,39]. Para una reparación por parcheo, no todos los métodos son adecuados para alcanzar los siguientes requisitos:

- La eliminación del concreto debe ser selectiva, limitando la zona y la profundidad específica.
- El daño al sustrato de concreto debe reducirse al mínimo para mantener su integridad estructural y garantizar una adherencia adecuada para el material de reparación.
- El acero de refuerzo no debe sufrir daños.
- La superficie del sustrato de concreto debe terminar rugosa, limpia y libre de grietas, de lo contrario se requiere tratamiento adicional.

La eliminación del concreto es relativamente fácil donde está agrietado o débil, mientras que es más complicado cuando está en buen estado, sobre todo cuando es necesario remover concreto por detrás del acero de refuerzo.

La elección de la técnica más adecuada depende de la profundidad del concreto que debe ser eliminado. Si solo se requiere la eliminación de la

superficie, es suficiente con un método manual como un escarificador o algún método de abrasión como el chorro de arena (*sandblasting*). Cuando la eliminación del concreto se tiene que extender por detrás del acero de refuerzo (normalmente de 20 a 25 mm detrás del acero), es necesario hacer trabajos alrededor del acero sin dañarlo, sin agrietar el sustrato de concreto y sin comprometer la adherencia entre el concreto y el acero en las áreas donde no se eliminará el concreto. Para estos trabajos de reparación, generalmente se usan martillos neumáticos o chorros de agua a alta presión (*hidrojetting*) [39]. En todos los casos, los bordes de las áreas retiradas deben ser cuadrados a la superficie, sin espacios difíciles de llenar [30].

1.6.1.2. Preparación del acero de refuerzo.

La superficie del acero que queda expuesto por la eliminación del concreto dañado debe ser limpiada, puede ser por chorro de arena o por métodos mecánicos (cepillo de alambre). Debe de limpiarse de fragmentos de óxido o restos de mortero que pueden comprometer la unión con el material de reparación, sin dañar el acero [30].

1.6.1.3. Materiales de reparación.

Después de la eliminación del concreto y la limpieza del acero de refuerzo, se debe aplicar un material de reparación que sea adecuado para proteger al acero durante la vida de diseño de la reparación. Para lograr este objetivo, se deben de considerar muchos requisitos.

Los materiales utilizados en la reparación de estructuras de concreto reforzado, deben contar con propiedades tales que les permitan ser capaces de resistir a agentes agresivos, acciones físicas o mecánicas que afecten la durabilidad de la estructura.

- **Clasificación de los materiales de reparación.**

Hoy en día están disponibles en el mercado numerosos tipos de materiales de reparación y se pueden clasificar principalmente en tres grupos: morteros base cemento, base cemento modificados con polímeros y morteros resinosos [40].

Los morteros base cemento son más baratos que los morteros epóxicos y tienen expansiones térmicas compatibles con las del sustrato de concreto. Algunos podrían argumentar que es por lo tanto el material más adecuado para lograr la compatibilidad entre el sustrato de concreto y la reparación. Sin embargo, estos materiales tienen una contracción por secado relativamente alta, lo cual puede generar que los morteros de reparación se separen del sustrato [41].

Los morteros modificados con polímeros tienen excelentes características de durabilidad, resistencia al ingreso de agentes agresivos (CO_2 y cloruros), tiene alta adherencia al sustrato, buena trabajabilidad, resistencia a la abrasión y son fáciles de aplicar [41]. Sin embargo son costosos, tienen alta

contracción plástica y son muy sensibles a las temperaturas altas y bajas en el momento de la aplicación [42].

Los morteros resinosos son bien aceptados para la reparación. Sin embargo existen muchos problemas asociados con el uso de epóxicos, ya que no permiten que la humedad se evapore, lo cual puede causar la pérdida de adherencia entre el material y el sustrato, además la vida útil de estos materiales es crítica en clima caliente. Estos materiales tienden a ser mejores para aplicaciones limitadas como para secciones delgadas, que necesiten de baja permeabilidad y falta de requisitos especiales de curado [42].

Tabla 1.4. Clasificación de los materiales de reparación y los valores típicos de sus propiedades mecánicas [43].

Propiedades Mecánicas	Base Cemento	Modificados con Polímeros	Resinosos
Resistencia a la compresión (MPa)	20-50	30-60	50-100
Resistencia a la tensión (MPa)	2-5	5-10	10-15
Módulo de elasticidad (GPa)	20-30	15-25	10-20
Coeficiente de expansión térmica (°C X 10 ⁻⁶)	10	10-20	25-30
Absorción de agua (%)	5-15	0.1-0.5	1-2
Temperatura máxima de servicio (°C)	>300	100-300	40-80

- **Compatibilidad.**

Las reparaciones de concreto deben integrar con éxito los materiales nuevos con los materiales antiguos, formando un compuesto capaz de soportar los riesgos de uso, el medio ambiente y el tiempo. La compatibilidad e interacción de una reparación, pueden afectar a la durabilidad de la reparación e incluso la durabilidad de la estructura [42].

La compatibilidad se puede definir como el equilibrio de propiedades físicas, químicas, electroquímicas y dimensionales entre un material de reparación y el sustrato existente, asegurando que la reparación puede resistir todas las tensiones inducidas por cambios de volumen y por efectos químicos y electroquímicos sin deteriorarse por un periodo de tiempo determinado [44].

Los factores que afectan la compatibilidad de los materiales de reparación se resumen en la Figura 1.7 [44]. De estas consideraciones, probablemente la más importante es la capacidad de soportar los cambios de volumen, sin pérdida de adherencia ni agrietamientos, esto se conoce como “Compatibilidad dimensional”. Además de los cambios de volumen, una reparación también debe de tener un efecto protector y para asegurar eso, se deben de considerar la compatibilidad química, electroquímica y la permeabilidad del material de reparación.

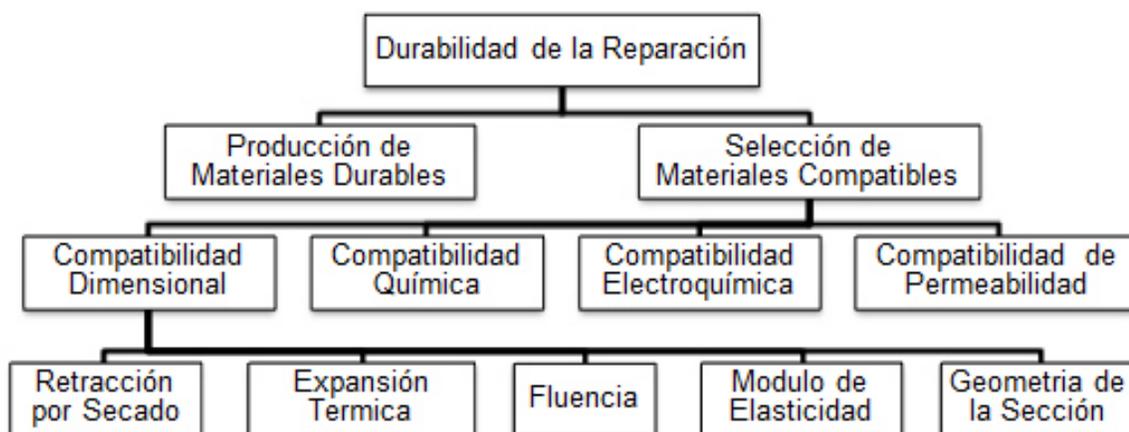


Figura 1.7. Principales factores que afectan la compatibilidad entre un material de reparación y el sustrato [44].

Compatibilidad Dimensional.

La contracción por secado y la expansión térmica son las dos características más importantes en cuanto a la compatibilidad dimensional de los materiales de reparación se refiere. Cuando la contracción por secado del mortero es alta, esto significa mucho movimiento entre el sustrato y el material de reparación (en la junta entre los dos materiales, donde se requiere una contracción cero). Esto, por supuesto, pondrá en peligro la durabilidad de la reparación. Los valores reportados por los proveedores de materiales siempre son cuestionables con respecto a sus condiciones reales [45].

Otros parámetros que también se deben tomar en cuenta y que influyen en la compatibilidad dimensional son: el tamaño, la forma y el grosor de la zona

a reparar, la cantidad de refuerzo, el módulo de elasticidad, la capacidad de deformación y la fluencia del material de reparación [46,47].

Compatibilidad Química.

Al seleccionar un material de reparación, la compatibilidad química es un aspecto importante que debe ser considerado y evaluado. En condiciones normales, el acero de refuerzo en estructuras de concreto de CP presenta buena resistencia a la corrosión, debido a la protección química que le confiere el concreto (Sección 1.4). Sin embargo, algunos materiales de reparación tienen un valor de pH bajo, por este motivo, podrá no existir la protección del acero contra la corrosión. En estos casos, se debe asegurar la protección del refuerzo contra la entrada de agentes agresivos que puedan promover la corrosión [42].

Compatibilidad Electroquímica.

Este es un aspecto importante en el rendimiento de una reparación, se refiere a la capacidad del material para inhibir la corrosión después de la reparación, tanto en el área reparada como en el acero circundante a la reparación. La resistividad eléctrica es un parámetro muy importante que debe tomarse en cuenta debido a que cuando un material de reparación tiene diferente resistividad, incluso si es más alta que la del concreto, el acero de refuerzo será más susceptible a la corrosión. Por este motivo, puede existir una fuerte corrosión galvánica, que se desarrolla en las áreas no reparadas adyacentes a los parches de reparación [48].

Compatibilidad de Permeabilidad.

Existe una relación entre la permeabilidad del concreto y su velocidad de deterioro. Por lo tanto se busca producir un concreto lo menos permeable posible, esto aplica para la selección de los materiales de reparación. Sin embargo, si se utilizan materiales de reparación impermeables, la humedad que penetre a través del sustrato puede quedarse atrapada entre el concreto y el material de reparación, esto puede causar la falla en la reparación, en el concreto o en ambos [49].

▪ Selección de los materiales de reparación.

La selección de los materiales de reparación y la ejecución de la reparación, deben tomar en cuenta las condiciones de servicio de la estructura y los factores mencionados anteriormente.

Se han visto los factores que normalmente influyen en la durabilidad de las reparaciones. Sin embargo, en la práctica, algunos otros factores pueden dominar en la selección de los materiales de reparación, aunque otros materiales tengan mejor compatibilidad con el sustrato. Por ejemplo, la accesibilidad, tamaño y geometría del área a reparar, presencia del refuerzo, rigidez de la sección. También algunas características de ingeniería, tales como resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, adherencia y cambios volumétricos [42].

En resumen, la Tabla 1.5 enlista las características más importantes que deben considerarse para seleccionar algún material de reparación.

Tabla 1.5. Requisitos generales de compatibilidad estructural para los materiales de reparación por parcheo [40].

Propiedades	Relación del material de reparación (R) y el sustrato de concreto (C)
Contracción	$R < C$
Coeficiente de Fluencia en compresión	$R < C$
Coeficiente de Fluencia en tensión	$R > C$
Coeficiente de expansión térmica	$R = C$
Módulo de elasticidad	$R = C$
Relación de Poisson	$R = C$
Resistencia a la tensión	$R > C$
Fatiga	$R > C$
Adhesión	$R > C$
Porosidad y resistividad	$R = C$
Reactividad química	$R < C$

En resumen, no existe el material de reparación ideal. Se requerirán diferentes materiales de reparación para diferentes tipos de aplicaciones.

La falta de información sobre el rendimiento de los materiales de reparación y sobre la compatibilidad con el sustrato de concreto, es causa de la gran cantidad de fallas prematuras de reparaciones en estructuras de concreto en América del Norte [50].

Una reparación puede ser efectiva y duradera solo cuando se ha realizado un diagnóstico detallado de las causas de deterioro y considerando la selección de materiales adecuados para el entorno particular, las condiciones de servicio y la compatibilidad con los sustratos destinados.

Es responsabilidad del ingeniero encargado de la reparación, asegurar que el material seleccionado tenga dichas cualidades, de manera que la reparación cumpla con la vida útil prevista.

Capítulo II

Antecedentes

2.1. Aspectos generales.

El gran desarrollo de la construcción en los últimos años se ha basado principalmente en la utilización del concreto, tanto reforzado como presforzado, el cual debido a sus propiedades mecánicas y de rentabilidad se ha convertido en el principal protagonista del sector, cualquiera que sea su función, su tipología y el medio ambiente en el que se encuentre. Esto se debe a sus indiscutibles ventajas [51]:

- Permite fabricar piezas de cualquier forma.
- Es fácil de fabricar y de colocar en la obra.
- En combinación con el acero ofrece excelentes resistencias mecánicas.
- Es de carácter alcalino.
- Está formado por materiales abundantes y baratos.

Hasta hace algunos años se consideraba que el concreto reforzado bien ejecutado tenía una duración prácticamente ilimitada. Ahora bien, tanto la experiencia como las investigaciones llevadas a cabo indican que diferentes

agresiones de tipo físico, químico o mecánico causan el deterioro del mismo y dan lugar a que aparezca todo tipo de patologías asociadas.

Actualmente, la reparación, renovación y el mantenimiento de estructuras de concreto se ha convertido en una parte importante en el costo total de la construcción en todo el mundo [52].

Como ya se ha explicado anteriormente, el principal problema del concreto reforzado es la corrosión del acero, influyendo negativamente en la durabilidad de las construcciones y siendo causa de costosas reparaciones para mantener la funcionalidad y seguridad de las estructuras.

La corrosión se podría evitar dejando un gran recubrimiento del acero o utilizando concretos con una relación agua/ cemento baja, así la profundidad de penetración de agentes agresivos sería también baja. Sin embargo, la corrosión ocurre con frecuencia puesto que este recubrimiento suele ser insuficiente y la mayoría de veces se utilizan concretos muy porosos.

En la actualidad, muchas estructuras de concreto reforzado con apenas 10 o 20 años de servicio, tienen que ser reparadas debido a su deterioro, dando lugar a grandes pérdidas económicas. Por ello, se trata de un tema de máxima actualidad como lo demuestra el que cada día sea mayor el número de tratamientos de reparación y prevención que se están realizando.

Para reparar los daños producidos es necesario determinar las causas que han provocado el deterioro y eliminarlas, o reducirlas, para que no se

vuelva a deteriorar el acero.

Existen un gran número de técnicas de reparación para estructuras de concreto, entre las más comunes están la reparación por parcheo, técnicas electroquímicas de realcalinización, remoción de cloruros y protección catódica, entre otros [33].

Las reparaciones tradicionales o por parcheo, son las más utilizadas. Consisten en eliminar el concreto carbonatado o contaminado por cloruros, limpieza del acero en la zona contaminada y posterior reposición del concreto eliminado con un material de reparación.

La selección del material de reparación es el criterio más importante a considerar en el trabajo de reparación, normalmente la resistencia a la compresión es tomada para seleccionar un mortero de reparación, esto es totalmente insuficiente si no se tienen en cuenta otras cuestiones más importantes como es la compatibilidad del mortero con el sustrato de concreto.

Esta compatibilidad se define como el equilibrio de las propiedades físicas, químicas, electroquímicas y dimensionales entre un mortero de reparación y el sustrato de concreto. Las principales consideraciones que afectan dicha compatibilidad son [44]:

- Compatibilidad dimensional
- Compatibilidad química
- Compatibilidad electroquímica

El tema de la compatibilidad nos lleva a estudiar la diferencia entre las propiedades del sustrato de concreto y el mortero de reparación, ya que dicha diferencia puede inducir efectos negativos sobre la reparación, generando agrietamiento y por lo tanto disminuyendo su durabilidad [53].

Después de analizar detenidamente cada aspecto que determina la compatibilidad entre un mortero de reparación y el sustrato, el paso final en esta etapa es la selección del mortero, el cual cumplirá como una reparación duradera para la estructura en estudio.

Es bien conocido que hay una amplia gama de morteros de reparación base cemento y con componentes similares al concreto. La composición de los morteros de reparación pueden consistir en más de un tipo de cemento (cemento especial como el cemento de alúmina), con adiciones (humo de sílice, escoria o ceniza volante), agregados (normales, ligeros, fillers.), aditivos (plastificantes, inclusores de aire y acelerantes), adiciones de polímeros y fibras de polímero [54-57].

A menudo se han utilizado polímeros para mejorar las propiedades de los morteros de cemento. Actualmente, se usan los polímeros como el acetato de polivinilo, copolímero estireno-acetato de vinil, copolímero de estireno-butadieno, estireno-acrílico, acrílico y emulsiones de caucho butadieno. Estos polímeros mejoran la trabajabilidad de los morteros a bajas relaciones a/c, lo

cual, ayuda a la resistencia a la compresión y baja permeabilidad [58]. Una de las limitaciones de los sistemas mencionados anteriormente, es que pueden volver a emulsionar en condiciones alcalinas húmedas.

Aggarwal et. al. [59] estudiaron las propiedades de los morteros modificados con polímeros con resina epoxi y emulsiones acrílicas y encontraron que los morteros adicionados con polímeros tienen propiedades superiores de resistencia, disminuye la absorción de agua y tienen mayor resistencia a la penetración de iones cloruro y dióxido de carbono. Además la adición de acrílicos genera buenas propiedades en los morteros, bajo condiciones de carbonatación acelerada [60]. Otros investigadores [61,62] estudiaron particularmente la resistencia a la corrosión del acero de refuerzo en morteros con látex en sustitución de agua, concluyeron que proveen mejor protección al acero de refuerzo, forman un material más denso, incrementa la resistencia mecánica y son resistentes al ingreso de agentes externos como cloruros, agua y CO₂.

Burak et. al. [63] también estudiaron morteros con adición de polímeros en la reparación de estructuras de hormigón dañadas. Este tipo de productos, además de restaurar el medio alcalino, tienen también otras propiedades complementarias de acuerdo con los fabricantes: retracción compensada, alta adherencia a la masa de concreto, baja permeabilidad y alta resistencia.

Los productos a base de resina también se utilizan como materiales de reparación, pero estos son muy caros en comparación con los base cemento.

Teniendo en cuenta el costo y el comportamiento de los materiales a base de resina, el uso de materiales base cemento modificados ha ido en aumento. Además del bajo costo, proporciona un ambiente altamente alcalino requerido para volver a pasivar el acero de refuerzo. Estos materiales de reparación son preparados con arena de río, CPO, cenizas volantes, humo de sílice, micro sílice y superplastificantes. Mantegazza y Nepomuceno [64,65] utilizaron morteros adicionados con SF y un acrílico, mostraron muy baja permeabilidad y buena protección al acero contra agentes agresivos como Cloruros y CO₂.

Algunos autores [66,67] trabajaron con la adición de SF y demostraron que mejora las propiedades de durabilidad, resistencias mecánicas, además de obtener mayor trabajabilidad, cohesión y buena adhesión con el concreto existente. Otras investigaciones sobre morteros con aditivos minerales [68], reportaron que incluso usando bajos contenidos de CV y SF, muestran buena resistencia a la corrosión

Cabrera et. al. [69] estudiaron morteros con adición de CV y reportaron mejores propiedades mecánicas y de durabilidad, baja permeabilidad y buena protección contra agentes agresivos, en comparación con morteros comerciales modificados con polímero.

Este tipo de materiales pueden llegar a ser excelentes para reparación, ya que proporcionan una mayor resistencia a la compresión y flexión, tienen una matriz densa y por tanto una permeabilidad muy baja, son resistentes a la

entrada de humedad y a productos químicos agresivos.

En el presente trabajo de investigación, se evalúa la durabilidad de dos morteros con diferentes adiciones de ceniza volante y tres morteros de reparación comerciales, evaluando su comportamiento como reparación y su resistencia a la corrosión, bajo el ataque de carbonatación en un ambiente industrial y en condiciones de laboratorio.

2.2. Objetivos.

2.2.1. Objetivo general.

Determinar y comparar el comportamiento a corto y mediano plazo de morteros de reparación comerciales, morteros de cemento-arena y de cemento-arena con sustituciones de ceniza volante, evaluar su durabilidad bajo el ataque de carbonatación en ambiente industrial y en condiciones de laboratorio.

2.1.1. Objetivos específicos.

- Evaluar las características físicas y mecánicas de los morteros de reparación comerciales y compararlos con un mortero tradicional de Cemento Portland y morteros de Cemento Portland con sustituciones de ceniza volante (20 y 50%).
- Evaluar el puente de unión entre el concreto existente y los morteros de reparación.
- Analizar la protección de los materiales de reparación contra la corrosión del acero de refuerzo por la carbonatación.
- Determinar los potenciales y velocidades de corrosión en el acero de refuerzo con materiales de reparación.

2.1. Hipótesis.

Considerando las buenas propiedades de durabilidad de la ceniza volante, será posible obtener un mortero de reparación base cemento sustentable y apropiado para resistir agentes agresivos como el CO₂.

Capítulo II

Programa experimental

CAPITULO III – PROGRAMA EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta el programa experimental diseñado para cumplir con los objetivos planteados en esta investigación. El programa está constituido por una serie de ensayos que nos permitirán evaluar el comportamiento físico, mecánico y de durabilidad de los morteros de reparación.

3.1. Materiales.

A continuación se describen los materiales utilizados en la fabricación de los especímenes para los diferentes ensayos.

3.1.1. Cemento.

El cemento utilizado fue un Cemento Portland Ordinario 40 (CPO 40), de marca disponible en la región. El cual cumple con la norma NMX C 414 [70], con una composición del 90 al 95% de Clinker y yeso y el resto de componentes minoritarios.

De acuerdo a su clase resistente CPO 40, indica que tiene una resistencia a la compresión mínima de 40 N/mm² a los 28 días.

En la Tabla 3.1 se muestra la composición química del CPO, obtenida mediante la prueba de Fluorescencia de Rayos X (FRX).

Tabla 3.1. Composición química del CPO 40

Compuesto	Contenido (%)
CaO	63.27
SiO ₂	17.43
Al ₂ O ₃	4.67
Fe ₂ O ₃	2.25
MgO	1.23
SO ₃	4.98
Na ₂ O	0.56
K ₂ O	0.75

La densidad del cemento se obtuvo por medio del procedimiento descrito en la norma ASTM C 188 [71], para densidad del Cemento Hidráulico. Dando como resultado una densidad de 3.04 g/cm³.

3.1.2. Ceniza Volante.

La ceniza volante (CV) utilizada en esta investigación fue del tipo F de acuerdo a la norma ASTM C 618 (Tabla 3.2). Donde se describe como: “Ceniza normalmente producida de la quema de antracita o carbón bituminoso”.

Tabla 3.2. Clasificación de la CV de acuerdo a ASTM C 618 [72].

Característica o Compuesto	Clase	
	F	C
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%min)	70.0	50.0
SO ₃ (%max)	5.0	5.0
Contenido de humedad (%max)	3.0	3.0
PPI (%max)	6.0	6.0

La composición química de la CV se muestra en la Tabla 3.3, en la cual se observa que la suma de óxidos de silicio, aluminio y hierro es de 90%.

Tabla 3.3. Composición química de la CV.

Compuesto	Contenido (%)
SiO ₂	56.51
Al ₂ O ₃	33.11
Fe ₂ O ₃	1.49
CaO	0.7
MgO	1.67
SO ₃	0.34
Na ₂ O	3.32
K ₂ O	0.52

La densidad de la CV se determinó de acuerdo a la norma ASTM C 188, siguiendo las especificaciones descritas en la norma ASTM C 311 [73]. La densidad obtenida fue de 2.0 g/cm³.

3.1.3. Agregados.

En este trabajo se utilizaron dos tipos de agregado, un agregado grueso para la fabricación de vigas de concreto, donde se simulará la reparación y el agregado fino para la elaboración de los morteros de reparación.

3.1.3.1. Agregado grueso.

El agregado grueso utilizado fue de tipo calizo triturado, con un tamaño máximo de 12.7 mm (1/2”), extraído de un banco de la región.

En la Tabla 3.4 se muestra la granulometría del agregado, obtenida mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM C 136 [74].

Tabla 3.4. Granulometría del agregado grueso.

Malla	Retenido (%)	Pasa (%)
3/4 in	0.00	100.00
1/2 in	5.50	94.50
3/8 in	30.30	64.20
No 4	59.70	4.50
No 8	3.90	0.60
Pasa	0.60	0.00

3.1.3.2. Agregado fino.

El agregado fino fue de tipo calizo triturado, su granulometría se muestra en la Tabla 3.5.

Tabla 3.4. Granulometría del agregado fino.

Malla	Retenido (%)	Pasa (%)
3/8 in	0.00	100.00
No 4	0.05	99.95
No 8	11.69	88.26
No 16	28.93	59.33
No 30	26.50	32.83
No 50	13.89	18.94
No 100	5.38	13.56
Pasa	13.56	0.00

En la Figura 3.1 se observan los límites de comparación de las propiedades recomendadas en la norma ASTM C 33 [75], Figura 3.1.

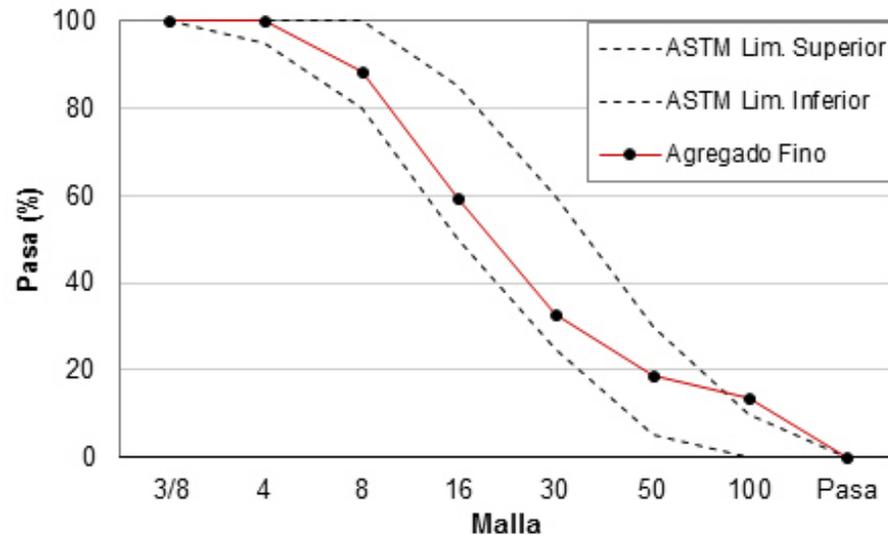


Figura 3.1. Granulometría del Agregado Fino.

3.1.3.3. Características físicas de los agregados.

Las características de los agregados se resumen en la Tabla 3.4, estas son un parámetro necesario para el diseño de las mezclas.

Tabla 3.4. Características físicas de los agregados.

Material	Peso Volumétrico (kg/m ³)	Densidad (gr/cm ³)	Absorción (%)
Agregado Grueso	1504.6	2.72	0.55
Agregado Fino	1718.6	2.61	1.94

El peso volumétrico se determinó de acuerdo a la norma ASTM C 29 [76] para obtener la masa del material por metro cubico. La densidad y la absorción de los agregados de acuerdo a las normas ASTM C 127 y 128 [77,78], las

cuales consisten en determinar el peso del material por metro cubico, excluyendo lo vacíos entre los agregados y conocer la capacidad de absorción de agua de los agregados.

3.1.4. Concreto.

Para la elaboración de las vigas que simulan una reparación y que fueron expuestos al ambiente industrial y de laboratorio, se fabricó un concreto con CPO, agregados grueso y fino descritos previamente, y agua en una relación de $a/c = 0.7$, el contenido de cemento fue de 350 kg/m^3 . El diseño de la mezcla se realizó para obtener un concreto permeable.

3.1.4.1. Preparación y mezclado

Previo al mezclado del concreto se llevaron a cabo las siguientes tareas:

- Obtención de la humedad de obra de los agregados el día del mezclado para hacer las correcciones por humedad necesarias.
- Pesado de los materiales necesarios para la mezcla: cemento, agua, agregados grueso y fino.

Para el mezclado se utilizó una revolvedora de 90L y el proceso de adición de materiales al interior de la revolvedora y los tiempos de mezclado fueron los siguientes:

- Primero la pre-humectación del interior de la revolvedora, para evitar que esta absorba el agua de mezclado.

- Después se adiciono el agregado grueso y fino con un poco de agua para pre-homogenizar los agregados durante 30 segundos.
- Enseguida se agregó el cemento y el resto del agua de mezcla para mezclarse durante 3 minutos, después de esto, se deja reposar la mezcla durante 3 minutos.
- Por último se mezcla por 2 minutos adicionales.

Después de terminado el procedimiento de mezclado, se llevó a cabo la fabricación de especímenes y determinación de las propiedades del concreto en estado fresco.

3.1.5. Acero.

La elaboración de las probetas para pruebas electroquímicas requirió la utilización de dos tipos de acero, según el tipo de probeta. Se utilizó una varilla delgada de 1/4" de diámetro y una varilla de 3/8" cuyas características cumplen con las especificaciones de la norma NMX-C-407-ONNCCE. Las características de acuerdo al fabricante son las siguientes:

Tabla 3.5. Características del acero.

Característica	Varilla	
	1/4"	3/8"
Diámetro (mm)	6.35	9.50
Peso (kg/m)	0.248	0.560
Área sección transversal (mm ²)	31.7	71.0
Perímetro (mm)	20.0	29.8
Resistencia a la tensión mínima (kg/mm ²)	63	60
Esfuerzo de fluencia mínimo (kg/mm ²)	42	52

3.2. Materiales de reparación.

Para la realización de los ensayos se utilizaron seis productos diferentes, se elaboraron tres morteros tradicionales de Cemento Portland, uno como referencia y dos más con diferentes adiciones de Ceniza Volante en sustitución de cemento, además se utilizaron tres morteros comerciales base de Cemento Portland, seleccionados de entre los muchos que existen en el mercado, de diferentes fabricantes.

Los morteros de reparación fabricados en laboratorio, se elaboraron según las características de los materiales descritas en la Sección 3.1. Las proporciones utilizadas se describen en la Tabla 3.6. El mezclado se llevó a cabo según lo especificado en la norma ASTM C 305 [79].

3.2.1. Mortero de Referencia (MR)

Mortero tradicional de CPO, con una relación cemento-arena de 1 a 3 y relación agua/cemento de 0.5.

3.2.2. Mortero de Reparación con 20% de CV (M1)

Mortero tradicional de CPO, de mismas proporciones que la referencia pero con adición de 20% de CV en sustitución de cemento.

3.2.3. Mortero de Reparación con 50% de CV (M2)

Mortero tradicional de CPO, de mismas proporciones que la referencia pero con adición de 50% de CV en sustitución de cemento.

Tabla 3.6. Proporciones de los morteros de reparación fabricados en el laboratorio.

Mortero	Material	Proporción
MR	CPO	1
	Arena	3
	Agua	0.5
M1	CPO	0.8
	CV	0.2
	Arena	3
	Agua	0.5
M2	CPO	0.5
	CV	0.5
	Arena	3
	Agua	0.5

Los morteros de reparación comerciales se seleccionaron en base a la información encontrada en su ficha técnica. Dentro de la gran diversidad de materiales que existen, la selección fue en base a su composición, aplicación y características físicas y mecánicas.

A continuación se presentan las características de cada mortero aportadas por el fabricante. El contenido de agua, tiempos y velocidades de mezclado para la fabricación de cada mortero, se llevó a cabo mediante las recomendaciones descritas en su ficha técnica.

3.2.4. Mortero de Reparación Comercial (C1)

Mortero a base de cemento portland, adicionado con microsílíce, de retracción compensada y reforzado con fibras.

3.2.5. Mortero de Reparación Comercial (C2)

Mortero a base de cemento portland, de fraguado rápido, con agregados y aditivos incluidos.

3.2.6. Mortero de Reparación Comercial (C3)

Mortero a base de cemento portland, de alta resistencia, modificado a base de un polímero y adicionado con microsílíce.

3.3. Métodos.

Los siguientes ensayos están planteados para determinar las propiedades de cada material de reparación, caracterizarlos y comparar su comportamiento protector frente a agentes agresivos como el CO₂.

- I. Ensayos de Caracterización.
- II. Ensayos Físico – Mecánicos.
- III. Ensayos de Durabilidad.

3.3.1. Ensayos de caracterización de los materiales.

Estos ensayos se realizaron para determinar las características físicas y composición química de cada material y conocer los elementos que componen a los morteros comerciales. Con estos ensayos, será posible relacionar el comportamiento físico, mecánico y de durabilidad de los morteros de reparación.

3.3.1.1. Microscopia electrónica de barrido (SEM).

Esta técnica se utilizó para obtener información de la morfología de los materiales utilizados, su tamaño y su forma. En conjunto con la técnica de espectroscopia de dispersión de energía (EDS), también será posible conocer composición química elemental de los materiales adicionados a los morteros comerciales. El equipo utilizado fue un JSM-6490LV de la marca JEOL.

3.3.1.2. Difracción de rayos X (DRX).

La prueba de DRX nos permite identificar las fases cristalinas que componen los materiales. Conocer la composición de fases de los morteros de reparación comerciales nos dará información para conocer qué tipo de materiales los componen y el porqué de su comportamiento. Para esta prueba se utilizó un equipo Bruker D8 Advance con detector Vantec.

3.3.1.3. Fluorescencia de rayos X (FRX).

La fluorescencia de rayos X nos permite conocer los compuestos que se presentan en un material en forma de óxidos. Por medio de esta prueba, podemos determinar si existe algún compuesto que pueda modificar el comportamiento de cada material y del conjunto de ellos. Se utilizó un equipo Epsilon 3 de la Marca PANalytical.

3.3.1.4. Distribución del tamaño de partícula (DTP).

Esta técnica se utilizó para obtener el tamaño máximo de las partículas y su contenido. Determinar la granulometría de los morteros de reparación comerciales, de los agregados y el material cementante que los componen. El análisis fue en modo seco, en un equipo Microtrac S3500.

3.3.1.5. Densidad.

Esta prueba consiste en determinar la masa por unidad de volumen del CPO y CV para efectos de diseño de mezclas. El ensayo se llevó a cabo según lo descrito en la norma ASTM C 188 [71]. También se determinó la densidad de los agregados con respecto a lo especificado en las normas ASTM C 127 y 128 [77,78], ver Figuras 3.2 y 3.3.

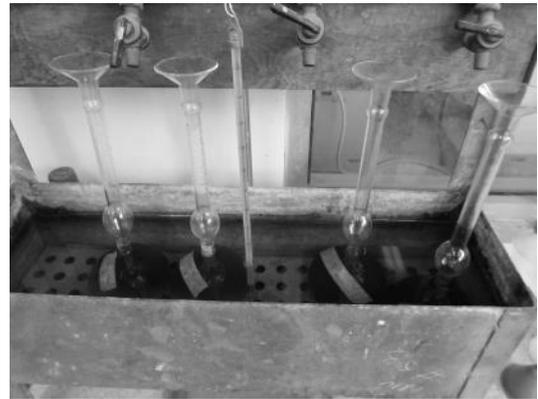
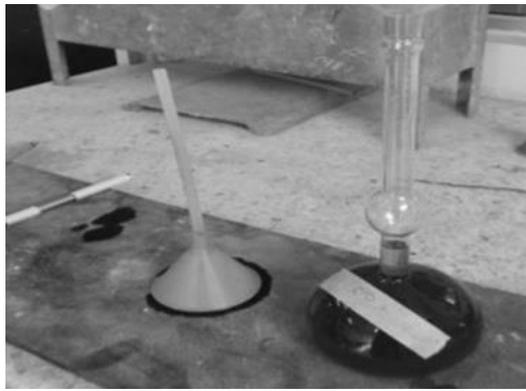


Figura 3.2. Prueba de densidad al CPO y CV.



Figura 3.3. Prueba de densidad al agregado fino.

3.3.2. Ensayos Físico - Mecánicos.

Las siguientes pruebas están planteadas para determinar las propiedades físicas y el comportamiento mecánico de los materiales de reparación.

3.3.2.1. Ensayos al Concreto.

3.3.2.1.1. Propiedades en estado fresco.

Las propiedades del concreto en estado fresco, se llevaron a cabo inmediatamente después de terminado el mezclado. Se realizaron con el fin de conocer la calidad del concreto.

- Revenimiento.

El revenimiento del concreto se llevó a cabo mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM C 143 [80]. Este método nos permite conocer la consistencia del concreto mediante su capacidad para fluir (Figura 3.4).



Figura 3.4. Medición del Revenimiento de acuerdo a ASTM C 143.

- Peso volumétrico.

Esta prueba se realizó por medio de una tina de acuerdo a la norma ASTM C 138 [81], con el fin de conocer el efecto y la relación de los materiales utilizados con el peso por metro cubico del concreto (Figura 3.5).



Figura 3.5. Prueba del peso volumetrico de acuerdo a ASTM C 138.

- Contenido de aire.

El procedimiento para determinar el contenido de aire del concreto fresco por el método de presión, se realizó mediante el procedimiento descrito en ASTM C 231 [82]. Por medio de este método se puede determinar el contenido de vacíos de aire en el concreto fresco, tanto inducido como atrapado (Figura 3.6).



Figura 3.6. Prueba de contenido de aire ASTM C 231.

3.3.2.1.2. Resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión es un indicador de la calidad del concreto, ligada a la durabilidad. El procedimiento de ensayo se describe en la norma ASTM C 39 [83]. La prueba se llevó a cabo en especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura (Figura 3.7).



Figura 3.7. Prueba de resistencia a la compresion ASTM C 39.

Para esta investigación, se propuso la elaboración de un concreto de alta relación agua/cemento, de baja calidad y esto se comprueba con resistencias mecánicas bajas.

3.3.2.1.3. Módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad o también conocido como módulo de Young. Es la relación entre el esfuerzo y la deformación de un material sometido a carga. Está estrechamente relacionado con la resistencia a compresión del concreto.

El ACI 318S-08 lo define como: “Relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente, para esfuerzos de tracción o compresión menores que el límite de proporcionalidad del material” [84].

La prueba se llevó a cabo por medio del procedimiento descrito en la norma ASTM C 469 [85], ver Figura 3.8.



Figura 3.8. Prueba de modulo de elasticidad ASTM C 469.

3.3.2.2. Ensayos a los morteros de reparación.

- Fabricación y conservación de probetas.

En el caso de los morteros de cemento y ceniza, el mezclado se llevó a cabo como indica la norma ASTM C 305. Se vertió el agua en el recipiente, después se añadió el cementante y se mezcló a velocidad baja durante 30 segundos, enseguida se añade el agregado. Se mezcla a velocidad media durante 30 segundos. Se detiene durante 1 minuto 30 segundos y se finaliza con un mezclado a velocidad media durante 60 segundos.

Los morteros comerciales se mezclaron según lo especificado por el fabricante en la ficha técnica.

Después del mezclado se procede a la fabricación de las probetas, dependiendo del ensayo a realizar. Inmediatamente después de su fabricación, las probetas se cubren con una película de plástico para evitar la evaporación del agua y se conservaron en un cuarto de curado con temperatura de 23 ± 2 °C y humedad relativa de 100% durante 24 horas. Al término de este tiempo se desmoldaron y se llevaron de nuevo al cuarto de curado hasta los 14 días, fin del periodo de curado.

El tiempo de curado fue propuesto debido a que los morteros comerciales no señalan un tiempo de curado mínimo en las especificaciones del fabricante, además, en la práctica no es común que una reparación reciba un curado muy prolongado.

3.3.2.2.1. Consistencia.

La consistencia es una propiedad de los morteros y concretos en estado fresco, sirve para evaluar la facilidad de puesta en obra.

Esta facilidad de colocación, es un aspecto importante para los morteros de reparación porque en la mayoría de los casos puede ser más difícil una reparación que una obra nueva.

Esta prueba se realizó mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM C 1437 [86], ver Figura 3.9.

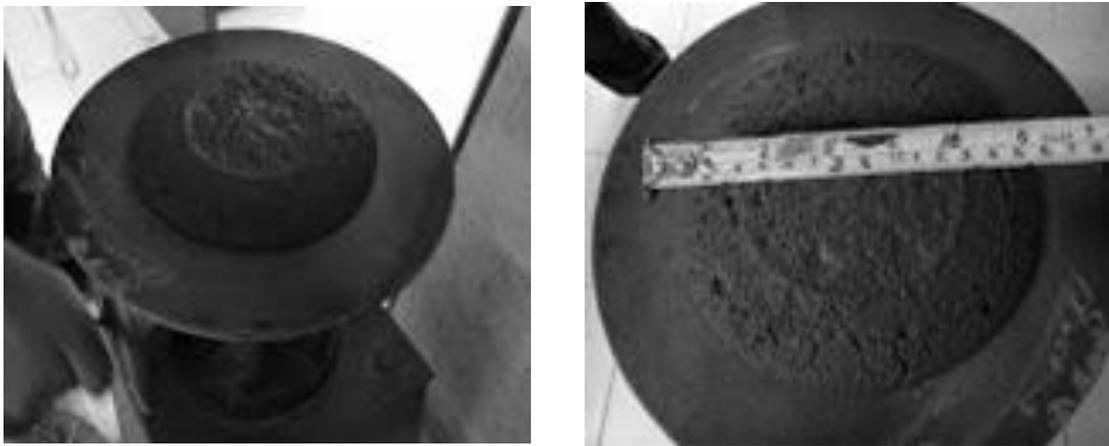


Figura 3.9. Prueba de consistencia en morteros ASTM C 1437.

3.3.2.2. Resistencia a la compresión.

Para este ensayo se fabricaron cubos de mortero de 50 mm de lado. El procedimiento de llenado de los cubos y del ensaye se realiza de acuerdo a lo especificado en la norma ASTM C 109 [88]. La resistencia a la compresión, es una característica habitual que aparece en las fichas técnicas ya que muchas veces va relacionado con la durabilidad del material (Figura 3.11)



Figura 3.11. Prueba de resistencia a la compresion ASTM C 109.

El cálculo de la resistencia a la compresión resulta de:

$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$

Siendo: σ_c = Resistencia a la compresión en MPa

P = Carga máxima total en N

A = Área donde se aplica la carga en mm^2

3.3.2.2.3. Resistencia a la flexión.

La resistencia a la flexión es otra característica que se proporciona habitualmente en los documentos técnicos de los fabricantes de materiales de reparación. El ensayo se realiza de acuerdo al procedimiento descrito en la norma ASTM C 348 [89], se utilizan probetas prismáticas de dimensiones 40x40x160 mm (Figura 3.12).



Figura 3.12. Prueba de ensayo a flexión ASTM C 348.

Las probetas son apoyadas en dos puntos y se le aplica una carga al centro del claro, por lo cual la resistencia a la flexión de la probeta viene dada por:

$$\sigma_t = 0.0028 \cdot P$$

Siendo: σ_t = Resistencia a la flexión en MPa

P = Carga máxima total en N

3.3.2.2.4. Retracciones.

Una de las propiedades importantes a considerar en los morteros de reparación, es la retracción que experimentan al endurecer y las consecuencias que se pueden derivar por este fenómeno.

En el presente estudio, se ha investigado la retracción por secado y la retracción autógena para evaluar la variación de volumen de los morteros de reparación, debido a las reacciones de hidratación y a su interacción con el ambiente.

Las probetas se fabricaron de acuerdo a la norma ASTM C 157 [89], en moldes de 25.4x25.4 mm de sección y 287 mm de largo. Por el centro de las paredes de la sección, pasan unos cilindros de acero que penetran en el molde y se sujetan para permanecer embebidos en el mortero, como se muestra en la Figura 3.13.

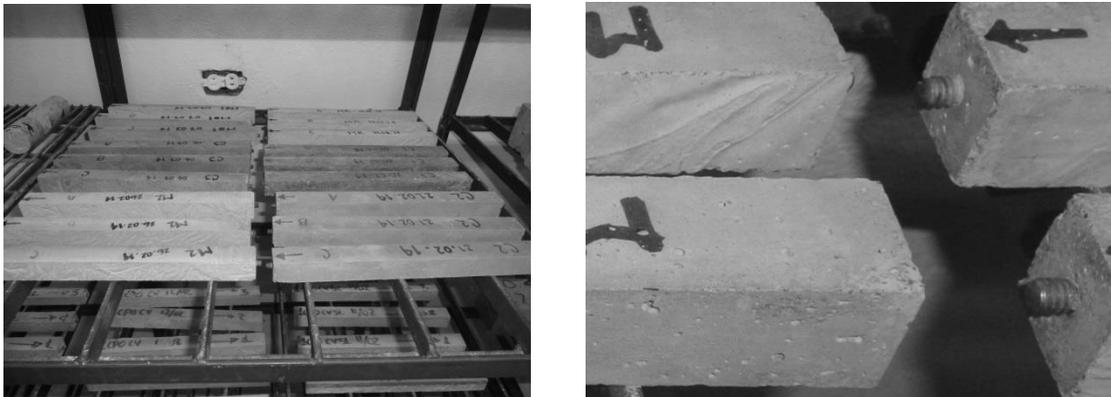


Figura 3.13. Probetas para retracción por secado ASTM C 157.

Después de su fabricación, las probetas se desmoldaron a las 24 horas y se almacenaron en el curado durante 14 días, durante este tiempo de curado, se monitoreo el cambio volumétrico a los 1, 3, 7 y 14 días.

El ensaye de retracción autógena se realizó de acuerdo a lo establecido en la norma Francesa NF P15-433 [90], después de desmoldar, las probetas fueron envueltas con varias capas de una película de aluminio, con el fin de evitar la evaporación del agua (Figura 3.14).

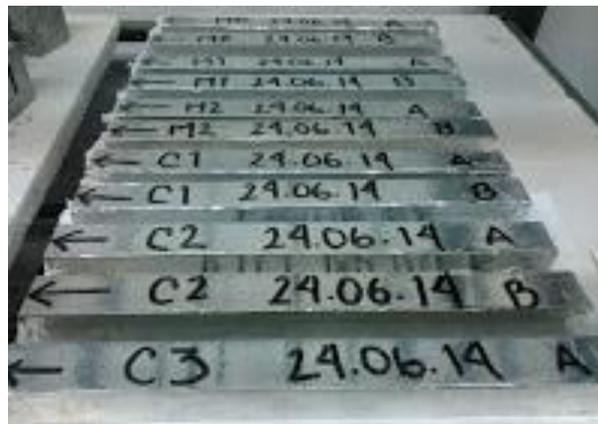


Figura 3.14. Probetas recubiertas con película de aluminio.

Para medir la variación de longitudes, se emplea un comparador de longitudes con micrómetro, con las características indicadas en la norma ASTM C 157. La primera medida se realiza inmediatamente después de desmoldar las probetas (L_1) y las medidas posteriores (L_2). Antes de cada medida, el comparador de longitudes se calibra con una barra metálica de 250 mm de longitud (Figura 3.15).

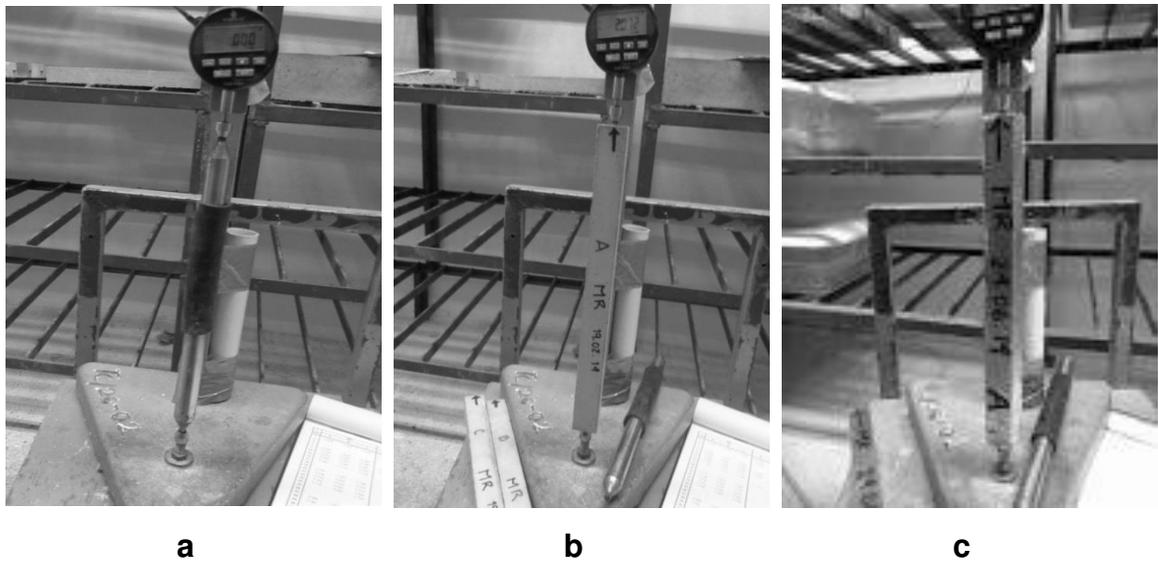


Figura 3.15. a) Calibración del comparador de longitudes, b) Medición de retracción por secado, c) Medición de retracción autógena.

Las variaciones de longitud (retracción) de cada probeta se calcula por la formula siguiente:

Siendo: V_L = Variación de longitud en %

$$V_L\% = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100$$

ΔL = Variación de la probeta con relación en la longitud original en mm

L_0 = Longitud de la barra de control en mm

3.3.2.2.5. Porosidad al agua.

La porosidad es una propiedad física que impacta en la durabilidad de un material, está directamente relacionada con su resistencia mecánica y su capacidad de absorción. La porosidad abierta de un material, es la relación que existe entre el volumen de poros comunicados al exterior y su volumen total.

El procedimiento para determinar la porosidad de los morteros, se realizó según lo propuesto en la norma ASTM C 642 [91], se utilizaron probetas prismáticas de 50x50x150 mm (Figura 3.16).



Figura 3.16. Probetas para determinar la porosidad abierta al agua.

El principio de esta prueba consiste en medir la porosidad accesible al agua de los morteros de reparación, por medio de la determinación de algunos pesos:

Peso seco (*A*), el cual se determinó secando las probetas en un horno a una temperatura de 100 a 110 °C, hasta tener peso constante, que la diferencia entre dos mediciones consecutivas sea menor a 0.5 %.

Peso saturado (*B*), después de obtener el peso seco, las probetas se sumergen en agua hasta que la diferencia de dos mediciones consecutivas sea menor a 0.5 %.

Peso saturado después de hervir (*C*), después de obtener el peso saturado en agua, se colocan las probetas en un recipiente con agua y se pone a hervir durante 5 horas, se mide el peso de las probetas después de dejarlas enfriar.

Peso sumergido (*D*), por último se obtiene el peso sumergido de las probetas en una pesa hidrostática.

Tras estas operaciones, la porosidad accesible al agua expresada en porcentaje de poros, se determina con la siguiente ecuación:

$$\text{Porosidad } \% = \frac{(C - A)}{(C - D)} \times 100$$

3.3.2.2.6. Permeabilidad al aire.

Los problemas de durabilidad en las estructuras de concreto, están asociados a la despasivación y corrosión del acero de refuerzo, debido al ataque de agentes agresivos como cloruros, sulfatos, CO₂, entre otros. La corrosión del acero de refuerzo se puede evitar restringiendo el ingreso de oxígeno y humedad a través del concreto.

La permeabilidad del concreto, al aire o al agua, es una excelente medida de su resistencia al ingreso de agentes agresivos en estado gaseoso o líquido y así constituye una medida de la durabilidad de un concreto. Por esta razón es importante que un mortero que se usará como reparación, tenga baja permeabilidad.

El procedimiento para determinar la permeabilidad al aire de los morteros de reparación se llevó a cabo mediante el ensayo de Permeabilidad de Torrent (TPT), sobre probetas cubicas de 150 mm [92,93], ver Figura 3.17.



Figura 3.17. Ensayo de permeabilidad al aire (TPT).

El equipo de permeabilidad tiene dos características distintivas,

- a) Una celda con doble cámara, basada en el principio del anillo de guarda, el cual consiste en una cámara interna (i) y una cámara externa (e).
- b) Un regulador de presión, cuya función es mantener a ambas cámaras siempre a la misma presión ($P_i = P_e$).

Este método se basa en crear vacío dentro de una celda colocada en la superficie del mortero y en medir la velocidad con que la presión retorna al valor atmosférico.

3.3.2.2.7. Adherencia entre el concreto y los morteros de reparación.

La adherencia entre el concreto base (sustrato) con el mortero de reparación es una característica de gran importancia para evaluar un mortero de reparación. Una buena adherencia (resistente y duradera) es un requisito crítico para lograr una reparación durable.

Existen distintos ensayos que permiten evaluar la adherencia entre el sustrato de concreto y el material de reparación cuando se somete a distintos esfuerzos. El ensayo utilizado fue el conocido como de corte inclinado, el cual utiliza un prisma de 100x100x300 mm, hecha de dos mitades idénticas unidas a 30° y probados bajo compresión axial (Figura 3.18).

El ensayo de corte inclinado se ha convertido en la prueba más aceptada para evaluar la adherencia de los materiales de reparación al sustrato de concreto [94].

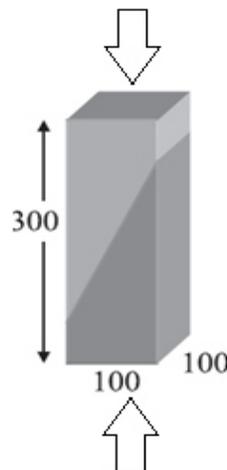


Figura 3.18. Esquema de ensayo de adherencia.

Inicialmente se fabricaron los prismas de concreto solido de 100x100x300 mm, después de 28 días de curado los prismas se cortaron por la mitad en una diagonal de 30° con una cortadora con disco adiamantado. A la superficie de contacto de cada mitad se le dio una rugosidad de 1 a 2 mm utilizando un cepillo de alambre de acero para remover la mezcla de cemento de la superficie de los agregados. Finalmente la superficie fue limpiada y humedecida antes de colocar el material de reparación.

3.3.3. Ensayos de Durabilidad.

Los siguientes ensayos se realizaron para evaluar el comportamiento de los morteros de reparación frente al ingreso de agentes agresivos y conocer el estado del acero de refuerzo en las probetas que se elaboraron para determinar el comportamiento protector de cada mortero.

3.3.3.1. Ambientes de exposición.

Con el fin de conocer el comportamiento protector de los morteros de reparación frente a la carbonatación y el estado de corrosión del acero de refuerzo a través del tiempo, los especímenes elaborados con y sin refuerzo, fueron expuestos a dos ambientes, un proceso de carbonatación acelerado y uno de carbonatación natural agresivo.

Carbonatación acelerada:

Los especímenes serán sometidos a una cámara de carbonatación acelerada, dejando fijos valores como la concentración de CO₂ (4%), temperatura (30 °C) y la Humedad Relativa (60-80%). En la Figura 3.19 se muestran las condiciones de exposición para los especímenes expuestos a la carbonatación acelerada.



Figura 3.19. Especímenes expuestos en el laboratorio (carbonatación acelerada).

Carbonatación natural:

Se colocarán especímenes de concreto en un ambiente industrial, con el fin de medir el avance de la carbonatación en condiciones agresivas.

La industria donde fueron colocados los especímenes lleva a cabo procesos que crean un ambiente agresivo y dañino para el concreto (Figura 3.20).



Figura 3.20. Grietas y desconchamientos en elementos de concreto de la planta de carbonatos.

Dentro de la industria hay dos plantas, una donde se produce el cloruro de sodio y cloruro de calcio, y la otra donde se fabrica el carbonato y bicarbonato de sodio, en esta última es donde se colocaron los especímenes debido al CO_2 liberado durante el proceso (Figura 3.21).



Figura 3.21. Especímenes expuestos en el ambiente industrial (carbonatación natural).

3.3.3.2. Profundidad de carbonatación.

La carbonatación es el resultado de la interacción del CO₂ atmosférico con los hidróxidos alcalinos en el concreto. Este fenómeno genera un descenso en el pH del concreto, el cual no es dañino para el concreto, sino para el acero, ya que pierde la forma pasiva que se forma en la interface del acero con el concreto, al llegar a valores de pH menores a 9 [21].

El objetivo de esta prueba es determinar de manera indirecta la difusión del CO₂ en los diferentes morteros de reparación y prever su comportamiento frente a la corrosión del acero de refuerzo. Para este ensayo, se fabricaron probetas prismáticas de 20x55x280 mm.

El procedimiento del ensaye consiste en partir cuidadosamente una parte de la muestra con el uso de cincel y martillo, inmediatamente después se limpia el exceso de polvo con una brocha.

Una vez hecho lo anterior, con el uso de un atomizador se rocía con una solución de fenolftaleína al 1% en la superficie recién quebrada, después de poco tiempo se debe detectar el cambio de coloración a rosa-purpura, típico de la fenolftaleína en un ambiente básico, mientras que en las áreas carbonatadas se mantiene sin cambios de color.

Finalmente se mide el avance de la carbonatación en la zona incolora, desde la superficie (cara externa de exposición), hasta el límite del cambio de coloración. En la figura 3.22 se pueden apreciar muestras de mortero que fueron rociadas con fenolftaleína y donde se aprecia el avance de carbonatación de cada mortero.

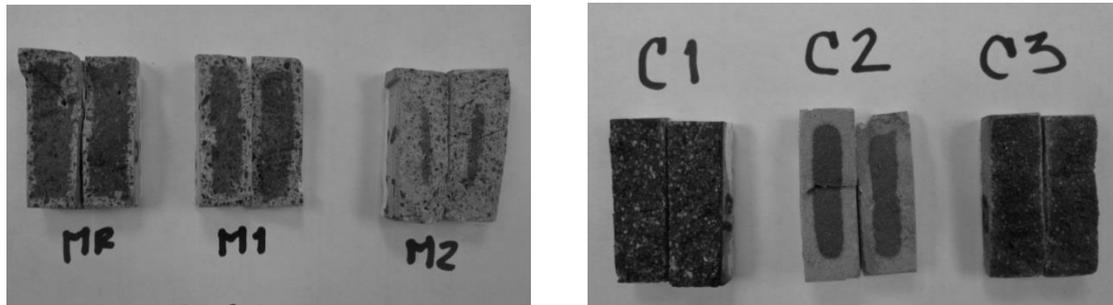


Figura 3.22. Muestras rociadas con fenolftaleína para medir el avance de carbonatación.

3.3.3.3. Pruebas electroquímicas.

Los análisis electroquímicos nos permiten definir el periodo de tiempo durante el cual la corrosión en el acero de refuerzo pasa del periodo de iniciación a la propagación, es decir, el tiempo que tardan el CO_2 en alcanzar el acero dependiendo la protección que le brinde cada mortero.

Fabricación de probetas.

Para llevar a cabo las pruebas electroquímicas se procedió a la elaboración de dos tipos de probetas, prismas de mortero de 20x55x80 mm y vigas de concreto de 150x150x400 mm con una reparación simulada.

Prismas de mortero

Este tipo de probetas se utilizaron para medir los potenciales y las velocidades de corrosión a corto plazo, porque su tamaño las hace susceptibles a la acción del CO₂, disminuyendo el tiempo de exposición.

Se elaboraron probetas por triplicado (tres por mortero), en total se fabricaron 18 probetas para cada ambiente de exposición. Cada probeta está constituida por dos varillas de acero al carbono (electrodos) de 6 mm (1/4 in) de diámetro aproximadamente y longitud de 10 cm, además de un contraelectrodo de grafito de 6 mm y longitud de 8 cm (Figura 3.23 y 3.24).

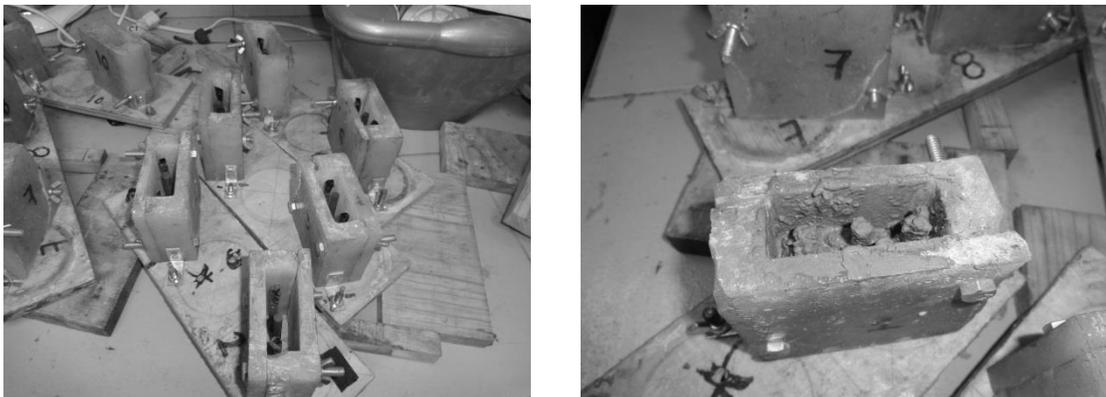


Figura 3.23. Proceso de fabricación de prismas de mortero.

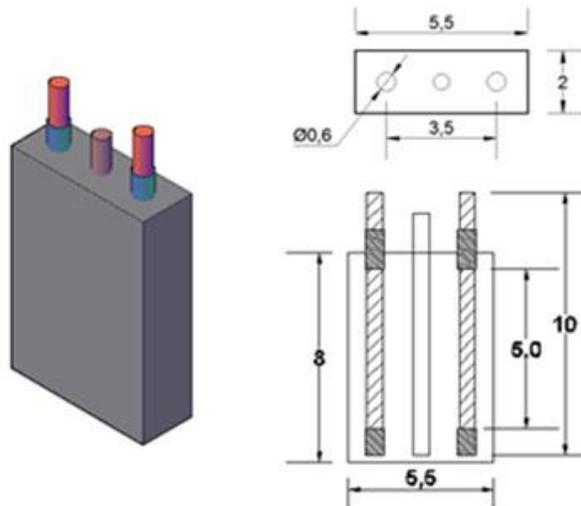


Figura 3.24. Esquema de prismas de mortero (unidades en cm).

Vigas de concreto con reparación.

Las vigas de concreto se elaboraron para simular una reparación en la práctica. Con esta configuración se evaluó la protección que ejerce el mortero sobre el acero de refuerzo y el comportamiento que presenta el acero en la interface (concreto-mortero) de la reparación, la influencia de la junta frente a la penetración de CO₂.

Se fabricaron tres vigas de concreto para simular la reparación de cada mortero, se elaboró un cajón de madera para hacer el espacio destinado a colocar el mortero de reparación. Cada viga está constituida por 6 varillas de 9.5 mm (3/8 in) de diámetro, de las cuales dos fueron destinadas para evaluar la protección ejercida del mortero sobre el acero de refuerzo, dos para el comportamiento del acero en la interface entre el sustrato de concreto y el mortero de reparación y dos más para el monitoreo de la corrosión del acero

dentro solamente del concreto (Figura 3.25 y 3.26).

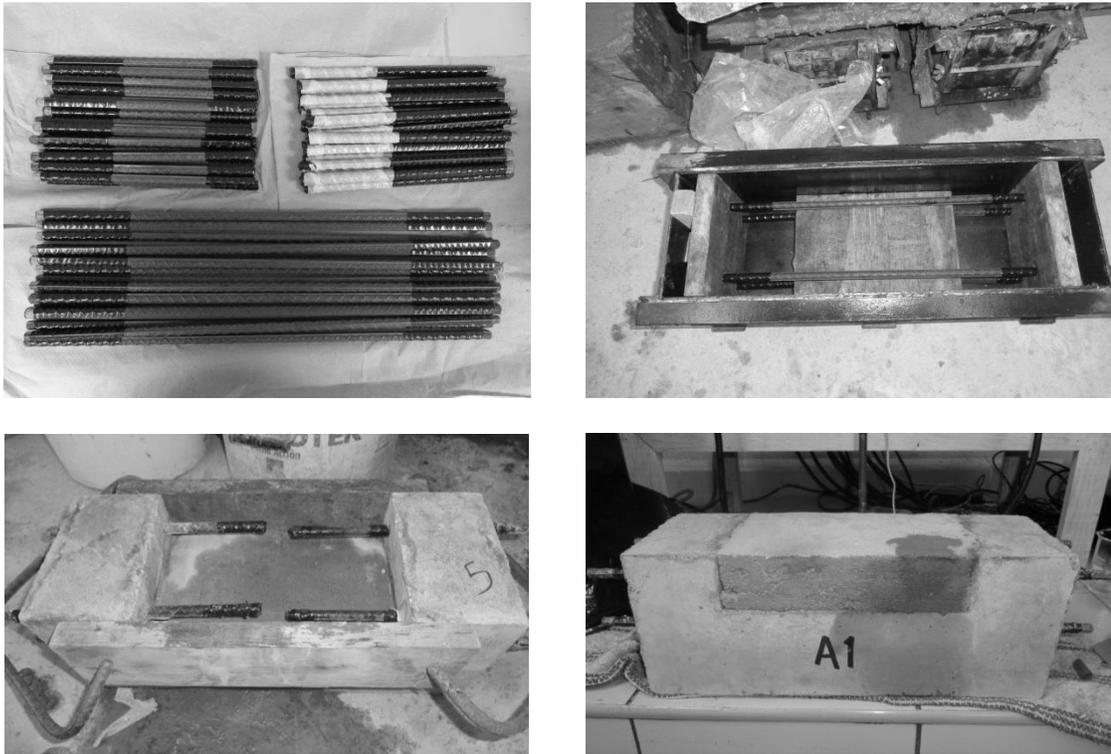


Figura 3.25. Proceso de fabricacion de vigas de concreto.

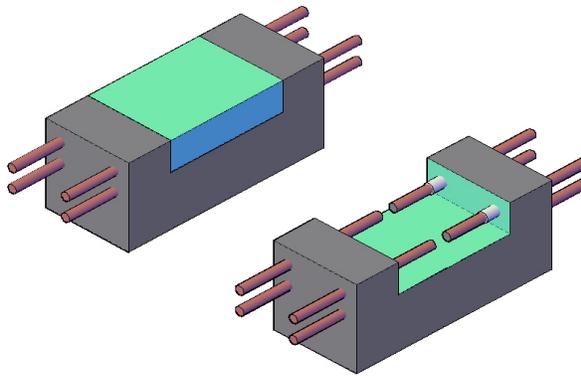


Figura 3.26. a) Esquema de viga de concreto y su reparación.

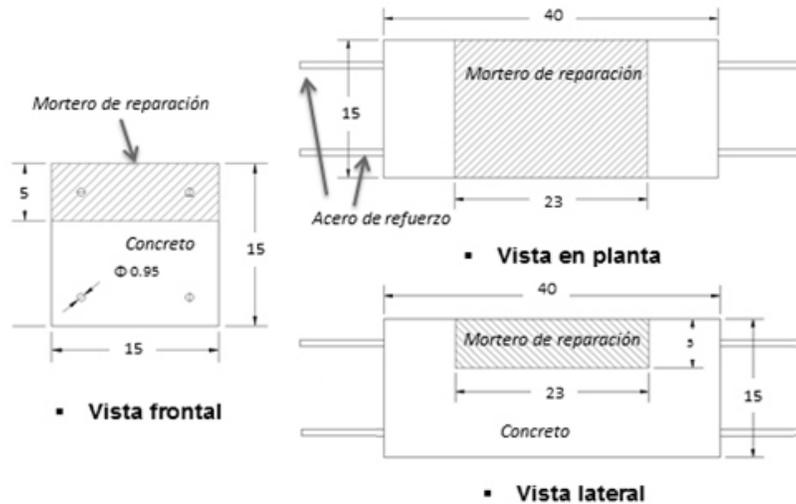


Figura 3.26. b) Esquema de viga de concreto y su reparación.
(unidades en cm)

Preparación del acero.

Antes del mezclado para la fabricación de las probetas, se procedió a la preparación del acero. El acero utilizado tanto en los prismas de mortero y las vigas de concreto, se preparó y limpio siguiendo el procedimiento establecido en ASTM G1 [95], el cual consiste en remover completamente los productos de corrosión que pudiera tener antes de comenzar el ensayo.

Después de la limpieza del acero, se pesó y se encintó cuidadosamente para delimitar el área a estudiar. En los prismas de mortero se dejó expuesta una longitud de 5 cm. En las vigas, el área donde el acero solo está embebido en el mortero, se dejó una longitud de 6 cm y en el área donde el acero está en la interface concreto-mortero se dejaron sin encintar 10 cm.

3.3.3.3.1. Potencial de corrosión (E_{corr}).

Los potenciales de corrosión nos brindan información sobre la probabilidad de que el acero se encuentre en estado activo de corrosión. La medida del E_{corr} consiste en determinar la diferencia de potencial eléctrico entre el acero de refuerzo y un electrodo de referencia que se coloca en la superficie del elemento a medir.

El procedimiento para la realización de esta prueba se describe en la norma ASTM C 876 [96]. Los rangos de potenciales y la probabilidad de que se presente corrosión, se muestra en la Tabla 3.7, donde se tiene el E_{corr} con respecto al electrodo de Calomel.

Tabla 3.7. Criterios para evaluar el E_{corr} en el acero [30].

E_{corr} vs CuSO_4 (mV)	E_{corr} vs Calomel (mV)	Condición de corrosión
> - 200	> - 80	10% que se presente
- 200 a - 350	- 80 a - 230	Zona incierta
< - 350	< - 230	90% que se presente
< - 500	< - 380	Corrosión severa

3.3.3.3.2. Velocidad de corrosión (I_{corr}).

La velocidad de corrosión nos indica que tan rápido se están desarrollando las reacciones de corrosión en las probetas. Los resultados de esta probeta están correlacionados con el área superficial del acero en exposición.

La resistencia a la polarización lineal (RP), es una técnica cualitativa, no destructiva, que permite la estimación de la velocidad de corrosión instantánea de un metal en un medio. Esta técnica es aplicable para el estudio de la protección que ejercen los morteros de reparación sobre el acero de refuerzo. El ensayo se realizó con una velocidad de barrido de 0.06 mV/s, en la zona catódica de 0 a -10 mv. Se utilizó un potencióstato/galvanostato, Interface1000 de la marca Gamry.

En la Tabla 3.8 se muestran las consideraciones necesarias para evaluar el estado de corrosión del acero de refuerzo, de acuerdo a I_{corr} .

Tabla 3.8. Nivel de corrosión en función del I_{corr} .

Velocidad ($\mu A/cm^2$)	Nivel de corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1 a 0.5	Baja
0.5 a 1.0	Moderada
> 1.0	Alta

Capítulo IV

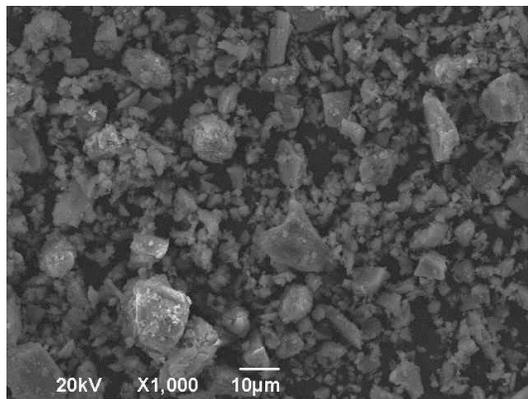
Resultados y discusión

CAPITULO IV – RESULTADOS Y DISCUSIÓN

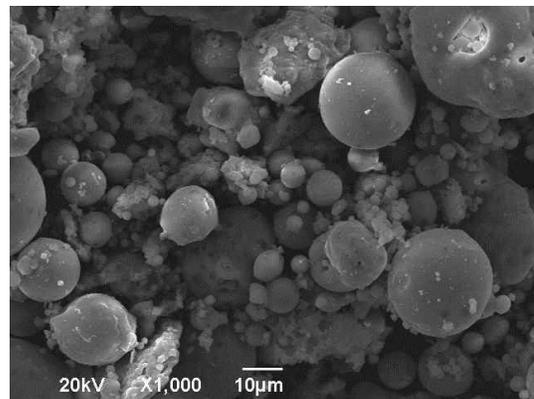
4.1. Caracterización de los materiales.

4.1.1. Microscopia electrónica de barrido (SEM).

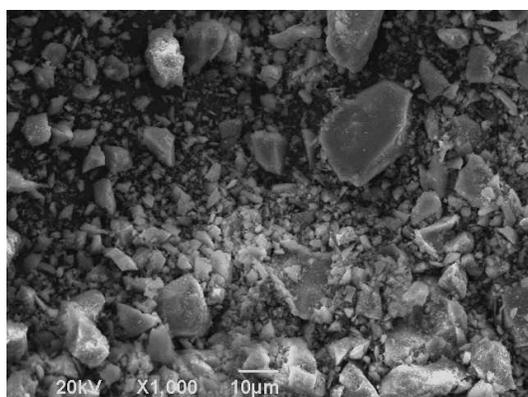
En la Figura 4.1 se presentan imágenes de la morfología del CPO, CV y de los morteros de reparación comerciales. Las imágenes mostradas son con una magnitud de amplificación de x1000. Se puede observar una morfología similar entre las partículas de cemento y los morteros comerciales, además de la morfología esférica, típica de la ceniza volante.



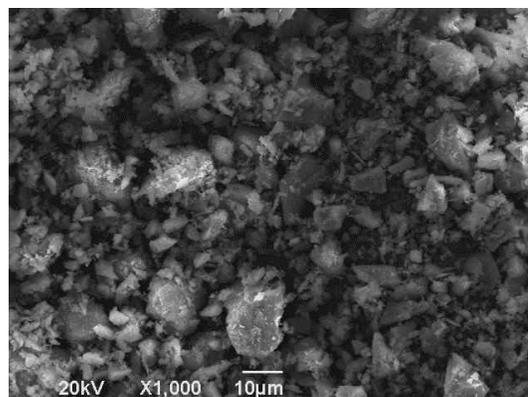
CPO 40



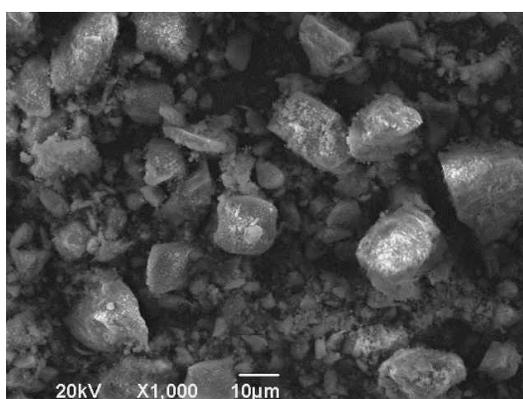
CV



C1



C2



C3

Figura 4.1. Micrografías de los materiales.

4.1.2. Espectroscopia de dispersión de energía (EDS).

La composición química elemental de los materiales se presenta en la Tabla 4.1. Se pueden observar los elementos típicos que componen al CPO y la CV, además de los morteros comerciales, de los cuales no se cuenta con información más que la descrita en la ficha técnica.

Tabla 4.1. Composición química elemental por EDS.

Elemento	CPO 40	CV	C1	C2	C3
C	22.87	19.16	16.18	2.20	25.43
O	42.31	48.13	44.35	45.52	46.00
Mg	-	-	0.44	0.56	0.35
Al	1.26	8.43	1.34	2.84	1.03
Si	4.72	20.26	6.79	4.94	8.85
S	1.70	-	1.10	4.01	0.59
K	0.38	0.68	0.59	0.37	0.64
Ca	26.77	0.48	27.75	19.09	16.15
Ti	-	0.59	-	-	-
Fe	-	2.27	1.46	0.66	-

4.1.3. Difracción de rayos X (DRX).

Los difractogramas obtenidos por medio de éste análisis, se muestran en la Figura 4.2. Se pueden observar las principales fases presentes en un cemento portland, las cuales coinciden con las fases de los morteros comerciales. El cuarzo observado en los morteros comerciales indica el tipo de agregado que contienen y la existencia de algún material suplementario como la microsílíce y la CV.

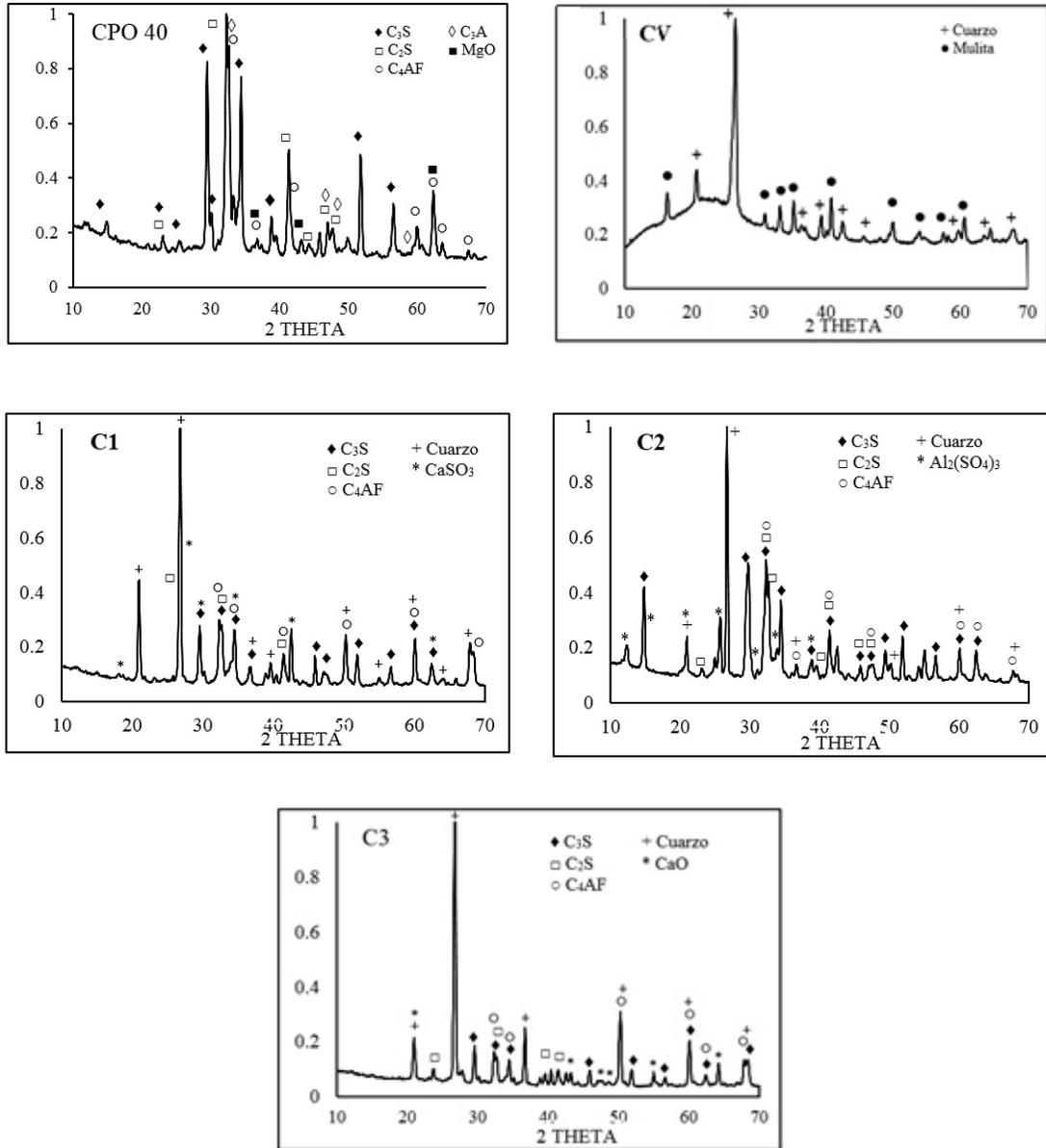


Figura 4.2. Difractogramas de los materiales.

El espectro obtenido de la CV, indica que el material es parcialmente amorfo y presenta como componentes cristalinos cuarzo y mulita.

4.1.4. Fluorescencia de rayos X (FRX).

En la Tabla 4.2 se muestra la composición química en óxidos de cada uno de los materiales. Los contenidos de SiO_2 y CaO varían dependiendo el tipo de agregado y adición mineral que componen a los morteros de reparación, además, compuestos como Al_2O_3 y SO_3 indican el uso de un cemento con características diferentes al CPO.

Tabla 4.2. Composición en óxidos de los materiales por FRX.

Compuesto	OPC 40	CV	C1	C2	C3
SiO_2	17.43	56.511	70.319	44.767	76.993
Al_2O_3	4.669	33.105	4.901	11.327	6.899
Fe_2O_3	2.245	1.486	0.693	0.858	0.306
CaO	63.271	0.698	18.193	24.437	6.589
MgO	1.230	1.667	1.667	3.277	0.678
SO_3	4.9814	0.344	1.800	12.798	0.784
Na_2O	0.5634	3.315	-	-	4.770
K_2O	0.746	0.518	0.329	0.314	0.941
TiO_2	0.2435	0.357	0.054	0.117	0.036
P_2O_5	0.093	-	-	-	-
MnO	0.073	-	0.021	0.105	0.004
SrO	-	-	0.012	-	-

Los compuestos SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 y CaO representan los principales constituyentes en un cemento portland, los cuales también están existentes en los morteros comerciales. La suma de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 de la ceniza da como resultado 90%, lo que indica una ceniza de tipo F de acuerdo a la clasificación de la norma ASTM C 618.

4.1.5. Distribución del tamaño de partícula (DTP).

Con esta prueba se pretende conocer la distribución por tamaño de las partículas que componen a los morteros comerciales, tanto para la parte fina como para los agregados. En la Figura 4.3 se representan las distribuciones granulométricas de los morteros comerciales comparadas con el CPO y CV.

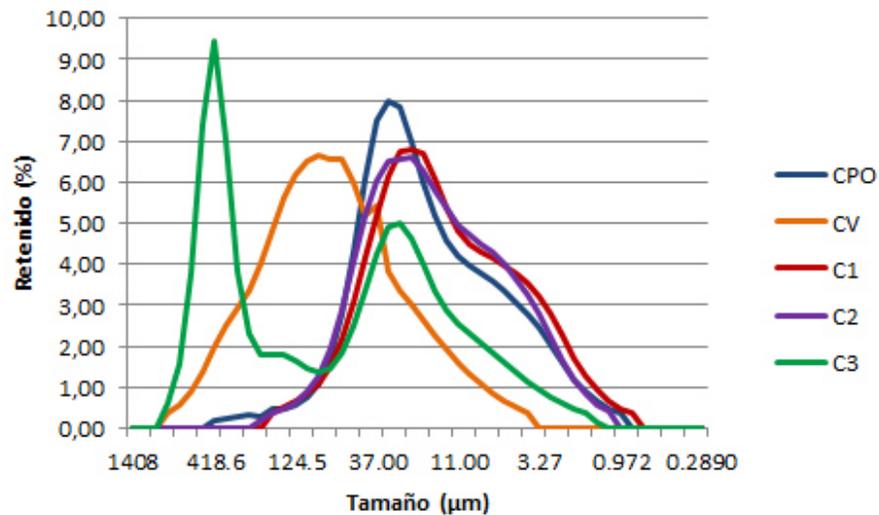


Figura 4.3. Distribución granulométrica de los materiales.

Se puede observar que el agregado que contiene cada mortero tiene una granulometría diferente; siendo el agregado del mortero C3 el más grueso. En cuanto a sus partículas finas, presentan una distribución muy similar en todos los morteros comerciales en comparación con el CPO.

4.2. Ensayos Físico - Mecánicos.

4.2.1. Ensayos al concreto.

4.2.1.1. Propiedades en estado fresco.

La finalidad de estos ensayos es conocer la calidad del concreto para predecir su comportamiento mecánico. El concreto fue diseñado para que fuera muy permeable y así tener resultados de deterioro en poco tiempo. El uso de este concreto fue solamente para fabricar las vigas donde se simuló una reparación tradicional por parcheo. Estos especímenes se utilizaron para evaluar la durabilidad de los morteros de reparación en los ambientes en estudio. La Tabla 4.3 muestra las propiedades obtenidas en estos ensayos.

Tabla 4.3. Propiedades del concreto en estado fresco.

Rel a/c	Revenimiento (cm)	Peso volumétrico (Kg/m ³)	Contenido de aire (%)
0.7	26.0	2322	0.5

El revenimiento está relacionado directamente con el contenido de agua de la mezcla. Estos valores son un indicador de un concreto muy permeable. El peso volumétrico y el contenido de aire dependen directamente de los materiales utilizados para la fabricación del concreto, es de gran importancia el uso de un agregado grueso de ½” para que se obtengan estos valores.

4.2.1.2. Resistencia a la compresión.

La Tabla 4.4 muestra la evolución de la resistencia a la compresión del concreto a los 7, 14, 21 y 28 días de ser elaborado.

Tabla 4.4. Resistencia a la compresión del concreto (kg/cm²).

Rel a/c	Edad (días)			
	7	14	21	28
0.7	206.6	231.4	263,2	273,6

La resistencia a la compresión puede ser un indicador de la calidad del concreto, ya que al tener resistencias a la compresión bajas es señal de un concreto muy permeable y de baja durabilidad.

4.2.1.3. Módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad es la pendiente de la recta secante obtenida del diagrama esfuerzo-deformación dentro del rango “plástico” del concreto utilizado en el presente estudio.

El resultado del módulo de elasticidad a los 28 días fue de 1196.83 kg/cm², este valor puede ser un indicativo de la compatibilidad dimensional con los morteros de reparación. Afecta a la adherencia entre el mortero de reparación y el sustrato de concreto, debido a que un material de bajo módulo de elasticidad se deforma más que uno de alto módulo, la diferencia en la deformabilidad hará que las tensiones se acumules en la unión mortero-concreto y por tanto falle la reparación.

4.2.2. Ensayos a los morteros de reparación.

4.2.2.1. Consistencia.

El ensayo de consistencia permite evaluar la facilidad de puesta en obra de un mortero de reparación, esta es una característica principal en los morteros de reparación. En la Tabla 4.5 se reflejan los resultados obtenidos.

Tabla 4.5. Valores del diámetro en la mesa de fluidez.

Mortero	Rel Agua/Solido	Diámetro promedio (mm)
MR		208
M1	0.125	203
M2		199
C1	0.100	-
C2	0.229	144
C3	0.093	169

Se agrega al análisis un parámetro que puede tener relación con la consistencia de los morteros, la relación agua/solido, la cual se toma de la suma del material cementante, agregados, aditivos y fibras (según sea el caso).

De los valores obtenidos en el ensayo se deduce que la consistencia dada en los morteros M1 y M2 es muy similar a la referencia (MR), valor relacionado con su contenido de agua, por lo tanto, estos son más fáciles de poner en obra.

El C3 es el mortero comercial que tiene los valores de consistencia más cercanos a los morteros M1 y M2, valores relacionados con el contenido de agua y su consistencia, sin embargo para el mortero C1, el cual, tiene una relación agua/sólido más alta que el mortero C3, la fluidez fue nula, como se observa en la Figura 4.4.



Figura 4.4. Consistencia del mortero C1.

Caso similar, el mortero C2 es el que tiene la relación agua/sólido más alta, sin embargo, no se refleja en su fluidez, siendo menor en comparación con el resto de los morteros.

4.2.2.2. Resistencia a la compresión.

En la Tabla 4.6 se muestran los resultados del ensayo a compresión en cubos de mortero a los 28 días.

Se puede observar, que el mortero C1 es el que presenta la resistencia a la compresión más alta. Mientras que el mortero M1 presenta una relativamente alta resistencia, solo 30% menor que C1.

Se puede afirmar que el mortero M1 elaborado en el laboratorio, es más resistente que algunos morteros comerciales, 17% mayor que el C3 y 90% mayor que C2.

Las resistencias más bajas están dadas por el mortero M2 elaborado en el laboratorio y el mortero comercial C2.

Se puede afirmar que el mortero M1

Tabla 4.6. Valores de resistencia a compresión y flexión de los morteros.

Mortero	Resistencia a Compresión	Resistencia a Flexión
	28 días (MPa)	28 días (MPa)
MR	65.8	12.7
M1	57.4	11.7
M2	32.6	10.6
C1	75.4	16.4
C2	30.0	7.4
C3	49.2	14.3

4.2.2.3. Resistencia a la flexión.

El mortero C1 también muestra las resistencias más altas en flexión (Tabla 4.6). Este comportamiento puede deberse a la adición de fibras en el mortero comercial.

A diferencia de los resultados de resistencia a la compresión, el mortero C3 presenta mejor comportamiento a la flexión que el mortero M1 en un 22% aproximadamente.

Resultando los morteros M2 y C2 los que presentan los valores más pequeños, de igual forma que el caso de la resistencia a la compresión.

En la Figura 4.5 se puede observar la relación que existe entre la resistencia a la compresión y a la flexión de los morteros, se puede concluir que a mayor resistencia a compresión le puede corresponder mayor resistencia a flexión, exceptuando el mortero C3 el cual presenta mayor resistencia a flexión que los morteros MR y M1, pero menor resistencia a la compresión que estos.

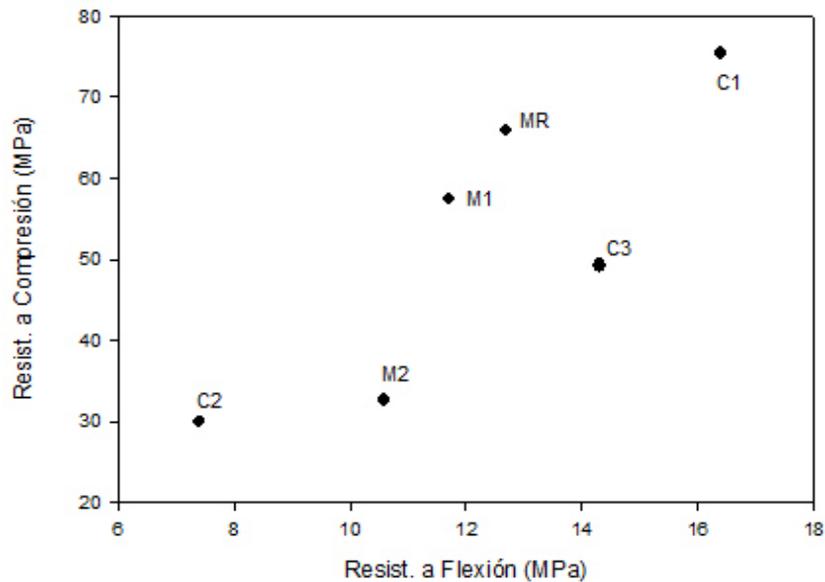


Figura 4.5. Resistencia a Flexión vs Resistencia a Compresion de los morteros estudiados (28 días).

Por último, se puede confirmar que las resistencias a la compresión y flexión de todos los morteros de reparación, no están en función de la relación agua/sólido como ocurre comúnmente, esto es debido a las diferentes adiciones minerales que los componen, además de algunos aditivos en el caso de los morteros comerciales.

4.2.2.4. Retracciones.

La contracción es una deformación debida a un cambio de volumen y está ligada a la pérdida de agua que presenta el concreto. Esta contracción se ha atribuido a la presión capilar negativa que conduce a una contracción de volumen de la pasta. Las tensiones se generan cuando el agua se elimina de la pasta principalmente por evaporación, por una serie compleja de meniscos que se forman en los poros llenos de agua en el concreto.

La evolución de la retracción en los morteros de reparación en el tiempo, se presenta en la Figura 4.6. Los valores negativos corresponden a retracción y los positivos a expansión.

Retracción por secado

La retracción por secado se monitoreó desde las primeras edades durante el curado (14 días), para observar los cambios de volumen debidos a la hidratación de los especímenes. Durante este tiempo la mayoría de los morteros presentaron expansión, excepto el C3, el cual registra valores de contracción muy bajos durante este periodo.

Después del día 14 todos los morteros presentan contracción que va en aumento con respecto a la edad, hasta llegar a un punto de estabilidad, donde los cambios volumétricos son nulos.

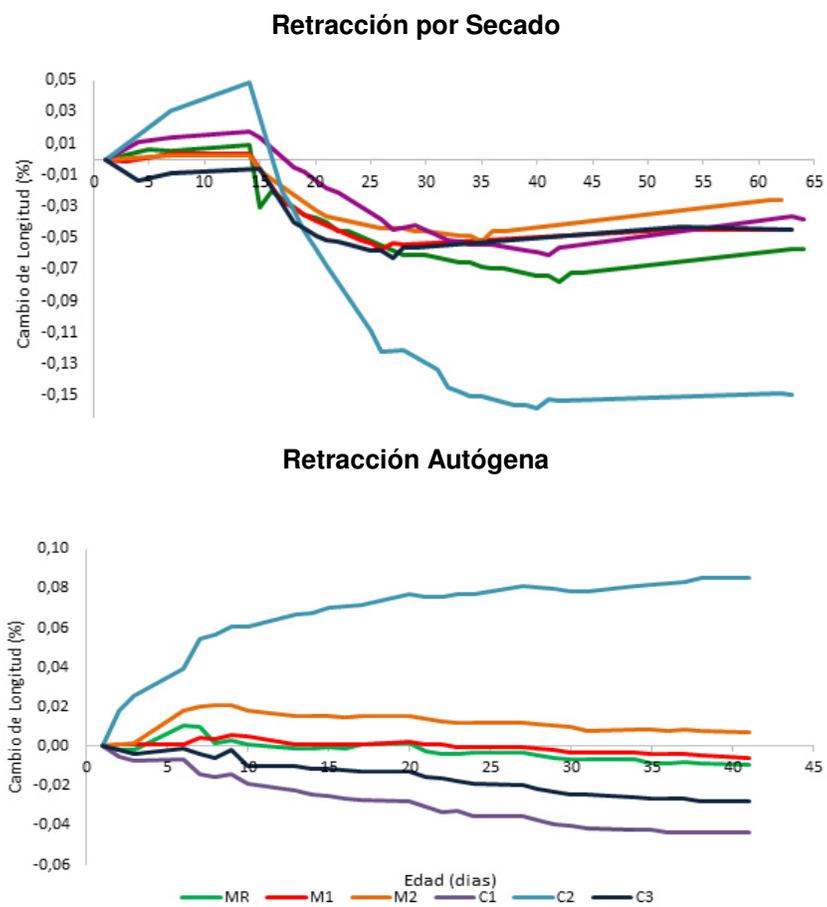


Figura 4.5. Evolución de la retracción por secado y autógena de los morteros de reparación.

Los morteros que presentan menores valores de contracción son M1, M2, C1 y C3. Lo cual quiere decir que las adiciones de CV en los morteros M1 y M2 le ayudaron a los morteros a presentar bajas retracciones, independientemente del porcentaje de sustitución de la CV. Como ha sido reportado, el uso de la CV reduce la retracción por secado del concreto, específicamente Davis et al. [97], comentaron que para espesores delgados, el concreto adicionado con CV reduce su retracción.

Según el fabricante el mortero C1 es de contracción compensada y los resultados lo confirman porque la contracción presenta valores muy pequeños además de tener una tendencia más estable que el resto de los morteros.

El mortero C2 presenta los valores más altos de cambios dimensionales tanto en la expansión como en la contracción, estos valores no son adecuados para una reparación durable.

Retracción Autógena

La retracción autógena es un cambio de volumen a nivel macroscópico, se desarrolla como consecuencia de la retracción química, durante el proceso de hidratación actuando como un sistema cerrado, sin ningún intercambio de humedad con el exterior.

Esta prueba se llevó a cabo según las recomendaciones establecidas en la norma NF P15-433, el procedimiento se describe en la sección 3.3.2.2.4.

El mortero M1 es el que presenta la menor retracción, menor incluso que la referencia (MR), seguido por el mortero C3 con valores más altos de retracción. El mortero C1 es el que presenta los valores más grandes de retracción. Los altos valores de retracción en los morteros comerciales pueden deberse a la adición de microsílíce en las mezclas pre-empacadas. Según Sellevold [98], la inclusión microsílíce aumenta significativamente la retracción autógena del concreto debido al refinamiento de la distribución del tamaño de poro, lo cual conduce a un nuevo aumento de la presión capilar.

4.2.2.5. Porosidad al agua.

Los resultados obtenidos se expresan como volumen de poros para cada uno de los 6 morteros a la edad de 28 días (Figura 4.6).

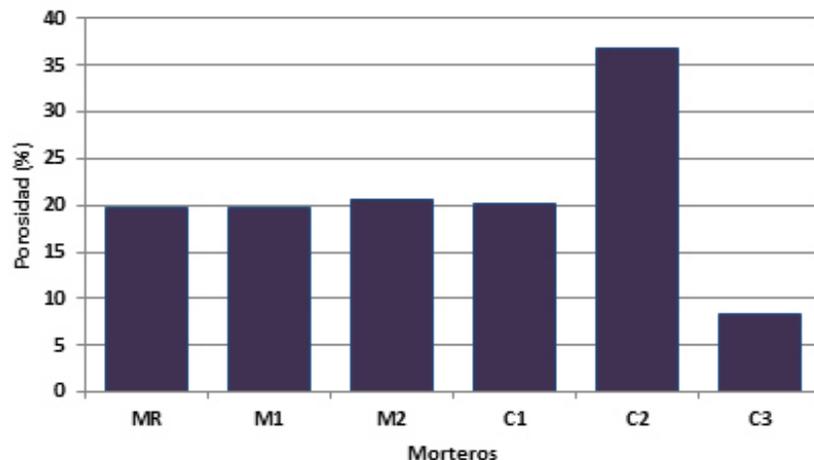


Figura 4.6. Porosidad abierta al agua de los morteros de reparación a los 28 días

Los morteros M1, M2 y C1 presentan valores de porosidad muy parecidos con respecto a la referencia (MR), en promedio de 20%, siendo M2 y C1 ligeramente mayores, siendo M1 solo un 3% menor.

El mortero C2 es el que presenta valores de porosidad mayores del 35%, mientras que por otra parte, el mortero C3 muestra los valores más pequeños de porosidad, por el orden del 10%.

En la Figura 4.7 se presenta la relación que existe entre la porosidad del mortero y su resistencia a la compresión, se puede observar que esta relación no es proporcional, el mortero con la porosidad menor no representa la resistencia más alta.

Solo el mortero C2 es el que presenta la porosidad mayor y la resistencia más baja.

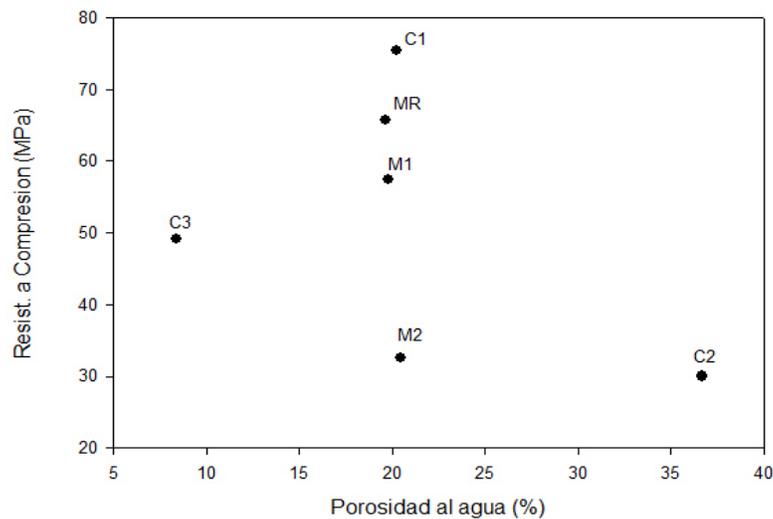


Figura 4.7. Porosidad vs Resistencia a Compresion (28 dias).

De la Figura 4.8 se observa que la porosidad tiene una relación lineal con el contenido de agua, por tanto; a mayor relación agua/sólido, mayor porosidad. Solo el mortero C1 no cumple con esta teoría, debido a su superficie porosa.

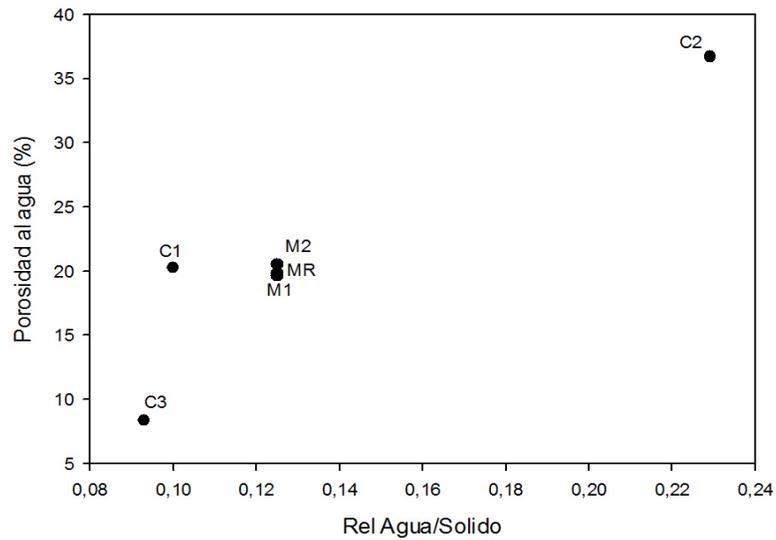


Figura 4.8. Porosidad de los morteros en función de Rel Agua/Sólido.

4.2.2.6. Permeabilidad al aire.

El concreto es un material poroso y permeable, estas propiedades afectan la forma en que el concreto resiste al ataque de agentes agresivos. La corrosión del acero de refuerzo se puede evitar restringiendo el ingreso de oxígeno y humedad al acero. Por esta razón es importante que un mortero de reparación tenga baja permeabilidad.

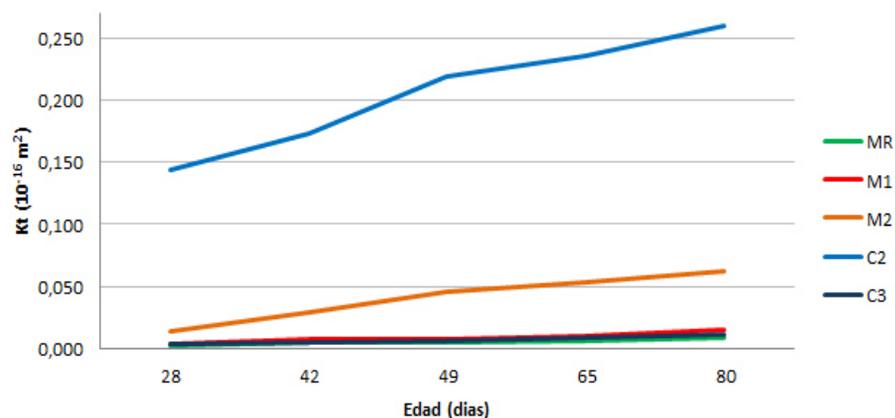


Figura 4.9. Evolución de la permeabilidad (Kt) en el tiempo.

La Figura 4.9 muestra la relación de la permeabilidad al aire en el tiempo para los diferentes morteros. Se observa como la permeabilidad va en aumento en todos los morteros, siendo los morteros C3 y M1 los que presentan los valores de permeabilidad más bajos.

Por lo tanto se puede decir que el mortero M1 presenta buena resistencia al ingreso de CO₂, tan buena como el mortero comercial C3.

El mortero C2 muestra los valores más altos de permeabilidad, seguido del mortero M2. El mortero comercial C1 no pudo ensayarse debido a presentar una superficie muy permeable (Figura 4.10), donde no es posible llevar a cabo el ensayo.



Figura 4.10. Superficie del mortero comercial C1.

Debido a la superficie porosa del mortero comercial C1, y en base a los resultados de este ensayo, se puede decir que el recubrimiento de mortero permite el ingreso de CO_2 a través del mismo, pudiendo llegar a afectar el acero de refuerzo, sin necesidad de bajar la alcalinidad.

4.2.2.7. Adherencia entre el sustrato de concreto y el mortero de reparación.

Para evitar la pérdida de adherencia del mortero de reparación debido a las tensiones generadas por las cargas, la temperatura y gradientes de humedad, es necesario que el mortero de reparación tenga una fuerte adhesión al sustrato de concreto.

La adherencia se evaluó por el tipo de falla que presentan los prismas, en la Tabla 4.7 se muestra la resistencia a la adherencia de cada mortero a los 28 días y su tipo de falla.

Tabla 1.7. Adherencia de los morteros de reparación.

Mortero	Resistencia a la Adherencia 28 días (MPa)	Tipo de Falla
MR	22.2	Interface
M1	26.1	Interface
M2	13.4	Interface
C1	19.4	Conc.-Mortero
C2	0	Interface
C3	22.53	Conc.-Mortero

Los tipos de fallas que se podían presentar en los ensayos de adherencia pueden ser los siguientes (Figura 4.11)



1. Falla monolítica



2. Falla en adherencia

Figura 4.11. Tipos de fallas en ensayo de adherencia.

Si existe buena adherencia, la muestra falla monolíticamente (concreto - mortero), en lugar de fallar a lo largo de la unión [69]. Los resultados de la resistencia a la adherencia, muestran que los morteros con mejor comportamiento son el C1 y C3 debido a que la falla se presenta en conjunto con el concreto.

En la figura 4.11 se muestra el tipo de falla de los morteros C1 y C3, los cuales fallaron monolíticamente y a los cuales se les asigna el mejor comportamiento en adherencia.

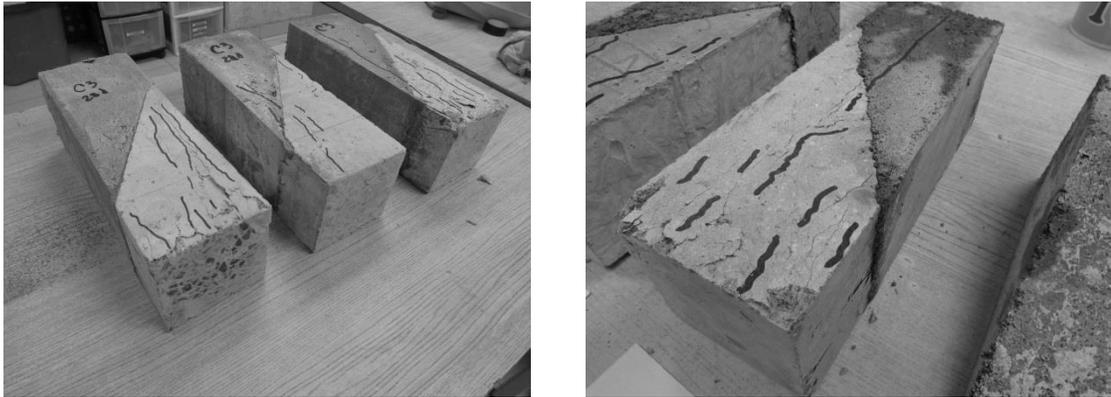


Figura 4.11. Ejemplo de falla monolitica concreto – mortero.

Los morteros elaborados en laboratorio y el mortero comercial C2, presentan el tipo de falla llamado “falla en adherencia”, la cual se define cuando el plano de falla es a lo largo de la superficie de interfaz [99]. Siendo el mortero M1 el que presentó mayor resistencia a la adherencia. Por el contrario, el mortero C2 mostró un comportamiento muy deficiente debido a que la falla ocurría al momento de aplicarse la carga, por tal motivo no se registraba.

4.3. Ensayos de durabilidad.

En términos generales, el objetivo de los siguientes ensayos es caracterizar el comportamiento de los diferentes morteros comerciales y los elaborados en el laboratorio ante la acción de CO_2 . Comparar su acción protectora evaluando la durabilidad de los morteros en estudio.

4.3.1. Profundidad de carbonatación.

En el presente trabajo se estudia el proceso denominado carbonatación, el cual, como ya se ha explicado en capítulos anteriores, se produce en todos los concretos de cemento portland. La velocidad a la que el concreto se carbonata está determinada por su permeabilidad, el grado de saturación de agua y el contenido de hidróxido de calcio disponible para la reacción.

Tal y como se ha descrito en la parte experimental, las probetas fueron sometidas a dos ambientes, uno acelerado y otro natural. Comparando a lo largo del tiempo, el avance de la carbonatación, mediante la prueba de la fenolftaleína. Los parámetros ambientales se describen a continuación:

- Carbonatación acelerada: Los especímenes serán sometidos a una cámara de carbonatación acelerada, dejando fijos valores como la concentración de CO₂ (4%), temperatura (25°C) y RH (60-70%).
- Carbonatación natural: Se colocarán especímenes en un ambiente industrial, con el fin de evaluar la durabilidad en condiciones agresivas. En base al monitoreo ambiental previo [100], las condiciones del ambiente fueron CO₂ (0.05 ± 0.02%), temperatura (35 ± 5°C) y RH (50 ± 20%).

La velocidad de carbonatación puede verse afectada por el tipo de cemento, las condiciones ambientales, condiciones de curado, relación agua/cemento y la microestructura de la mezcla [101,102].

En la Figura 4.12 se muestra el avance de carbonatación a través del tiempo para los 6 morteros de reparación, en ambiente acelerado y natural.

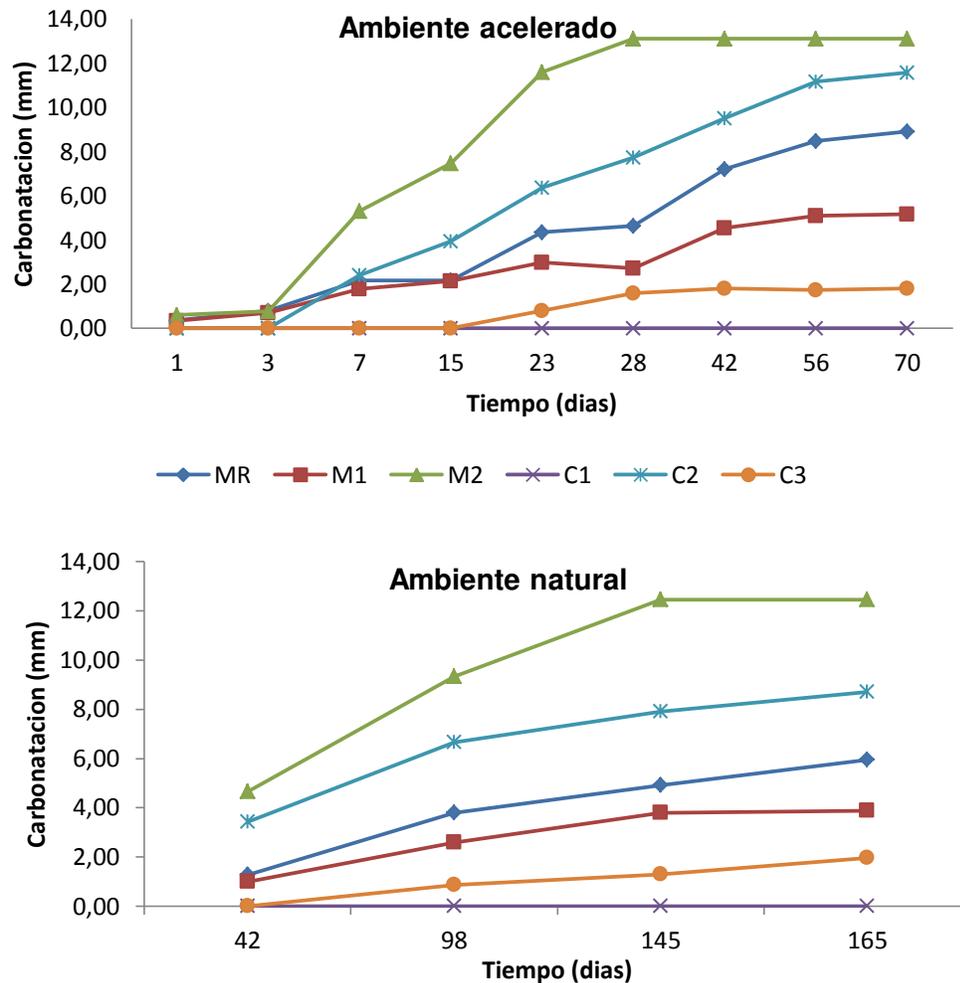


Figura 4.12. Profundidad de carbonatación a través del tiempo.

El comportamiento de los morteros en ambos ambientes es prácticamente el mismo. Los morteros que presentan mayor avance en la carbonatación tanto en condiciones controladas de laboratorio como en ambiente industrial, son los morteros M2 y C2, incluso el mortero M2 presenta carbonatación en toda la

sección desde los 28 días en ambiente acelerado y desde los 145 días en natural, esto puede deberse al consumo de los elementos alcalinos por parte de la ceniza volante a edades tempranas, lo que disminuye el pH de la solución de poro y acelera la carbonatación.

Los morteros comerciales C1 y C3 presentan los menores valores de profundidad de carbonatación, lo cual puede indicar que el proceso de corrosión del acero de refuerzo puede tardarse más en iniciar que en el resto de los morteros. Esto puede ser debido a la baja permeabilidad de dichos morteros, además de la cantidad de hidróxido de calcio disponible para llevar a cabo la reacción de carbonatación.

Los morteros MR y M1 presentan un avance intermedio en comparación con los demás morteros, para ambos ambientes.

De acuerdo a los resultados obtenidos y recordando la modelación de las probetas fabricadas para evaluar la durabilidad de cada mortero, donde los prismas de mortero tienen un recubrimiento de 7 mm, en ambiente acelerado los morteros M1, M2 y C2 serían los que puedan presentar valores de corrosión activa, mientras que en el ambiente natural solo el M2. En cuanto a las vigas donde se simula la reparación, el recubrimiento de mortero es de 20 mm, en este caso solo el mortero M2 podría presentar valores de corrosión activa para ambos ambientes.

4.3.2. Potencial de corrosión (E_{corr}).

Los potenciales de corrosión nos indican la probabilidad de que exista la corrosión, por ser una medición cualitativa, más no la certeza de que realmente haya una corrosión activa. En la Figura 4.13 se muestran los potenciales de corrosión a través del tiempo de los prismas de mortero, en ambiente natural y acelerado.

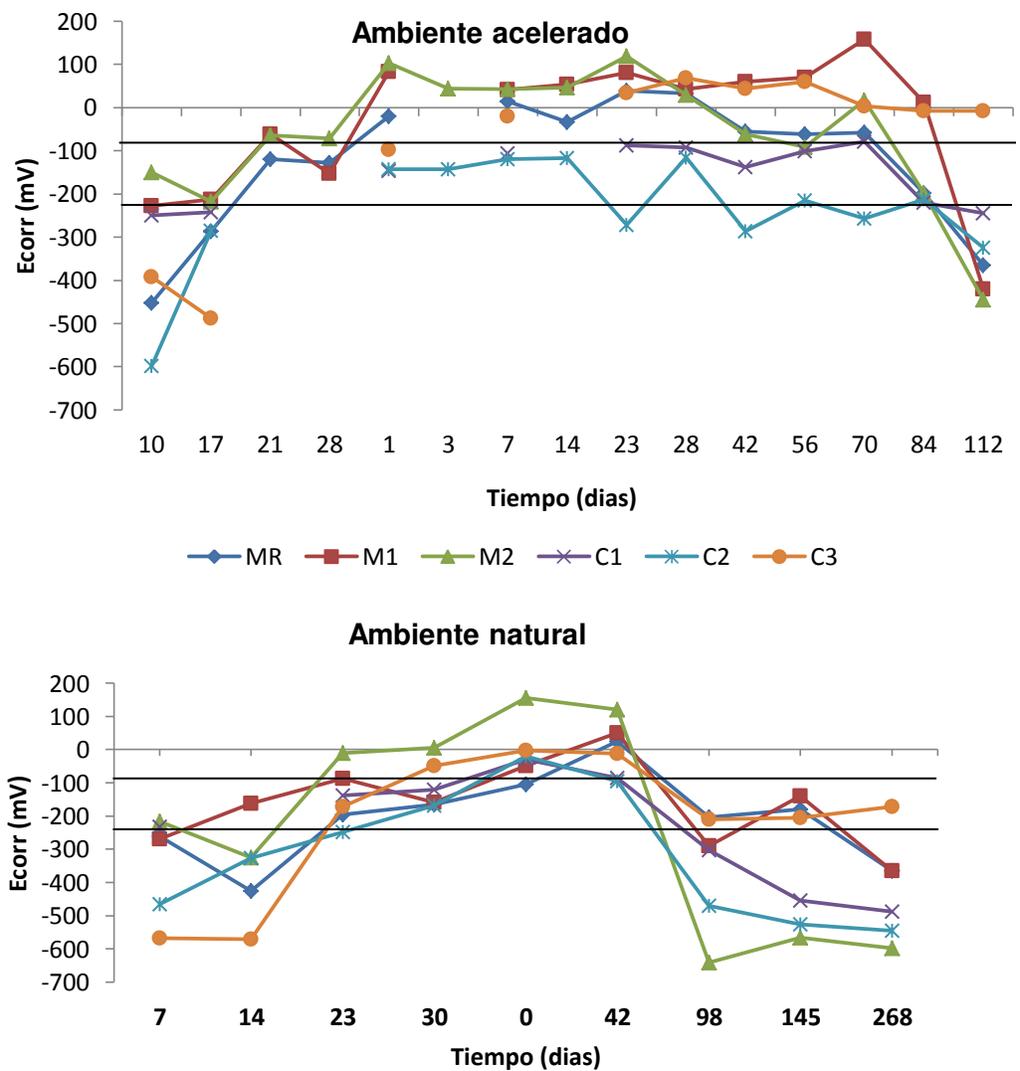


Figura 4.13. Potenciales de corrosión en prismas de mortero.

El monitoreo de los ensayos electroquímicos se llevó a cabo desde las primeras edades de fabricación y después durante su deterioro, marcando como “1” al primer día de deterioro en el ambiente acelerado y como “0” al inicio de la exposición al ambiente natural.

Los potenciales presentados, fueron medidos con referencia al electrodo de Calomel (Er) +240 mV vs ENH. En las figuras se presentan marcados los rangos de zona incierta donde pueda presentarse la corrosión del acero de refuerzo.

En las gráficas se observa como el acero embebido en los prismas de mortero antes de ser expuestos a los ambientes en estudio fueron en aumento hacia valores positivos.

En el ambiente acelerado, se puede observar que los morteros M1 y C3 a los 84 días, son los que presentan el mejor comportamiento frente a la corrosión del acero embebido en los prismas de mortero. Mientras que para los 112 días, solo el mortero C3 es el que presenta las probabilidades de corrosión más bajas, por debajo del 10%, mientras que el resto de los morteros ya podría presentar valores de corrosión.

Para el ambiente natural, prácticamente muestra el mismo resultado en el comportamiento de cada mortero. A los 98 días ya presentaba valores de probabilidad de corrosión, siendo los morteros M2 y C2 los que presentan el comportamiento protector más deficiente sobre el acero de refuerzo.

En la Figura 4.14 se muestra la configuración del acero en las vigas, donde se llevó a cabo el monitoreo de las pruebas electroquímicas.

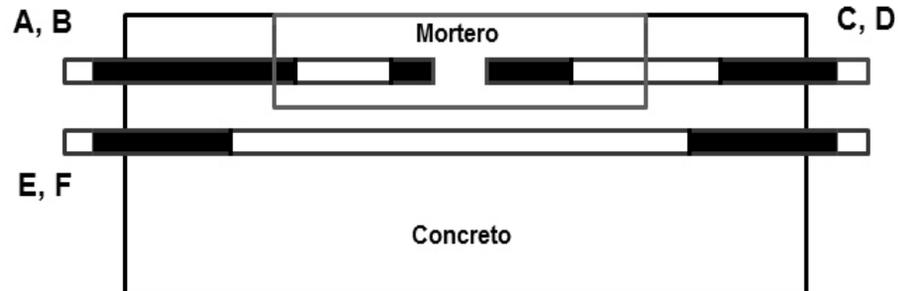


Figura 4.14. Esquema de la configuración del acero en vigas.

La parte sombreada indica el área donde fue encintada la varilla para delimitar el área de medición, en las varillas indicadas por A y B se dejó expuesta un área de 60 mm embebido en el mortero de reparación, las varillas C y D se dejó expuesta un área de 100 mm, embebida en ambos ambientes, mortero y concreto (50 mm cada lado), mientras que las varillas E y F que están embebidas solo en el concreto, tienen un área de exposición de 300 mm.

El monitoreo de los potenciales de corrosión en las vigas, se llevó a cabo de la misma forma que en los primas de mortero. En las Figuras 4.15 y 4.16 se muestra la evolución de los potenciales de corrosión a través del tiempo en el ambiente acelerado y natural, respectivamente.

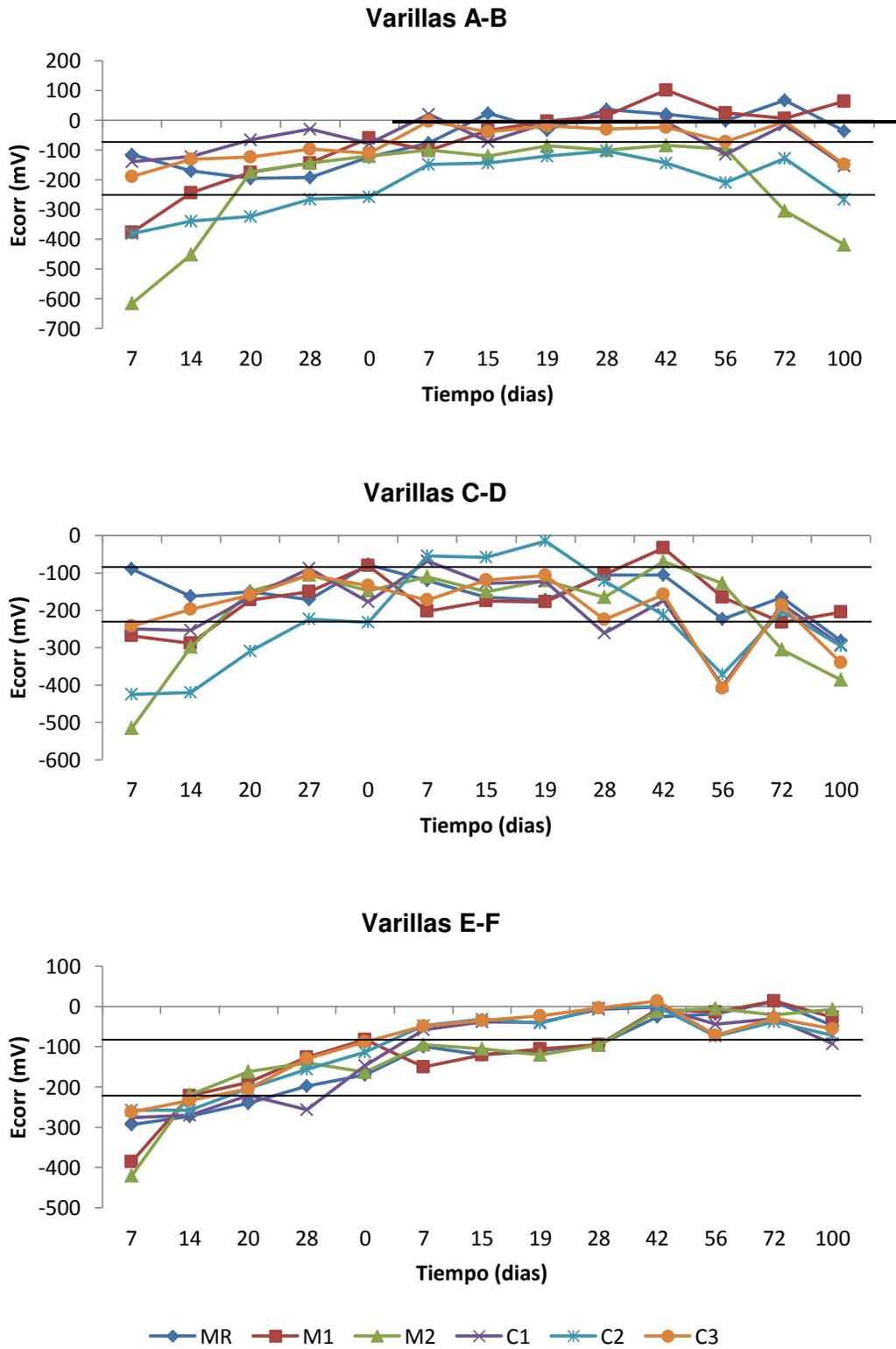


Figura 4.15. Potenciales de corrosión en vigas, ambiente acelerado.

Los valores de potenciales muy negativos en las primeras edades no se deben a la existencia de corrosión ya que tienden hacia valores menos negativos, lo cual indica que el acero se está pasivando debido. El mismo comportamiento ocurre en los prismas de mortero.

En el par de varillas A y B, los morteros M2 y C2, a los 100 días muestran los potenciales más negativos, con un 90% de probabilidad de que se presente corrosión, mientras que los morteros MR y M1 presentan el mejor comportamiento con solo el 10% de probabilidad de que se presente corrosión.

Las varillas C y D que se ubican en la interface entre el mortero de reparación y el concreto, todos los morteros muestran valores de probabilidad alta de corrosión a los 100 días, los morteros M2, C1 y C2 desde los 56 días. Siendo el mortero M1 el que presenta el mejor comportamiento, con valores de potenciales ubicados en zona incierta.

En cuanto al par de varillas E y F, no existe distinción alguna sobre el tipo de mortero utilizado, debido a que el acero está embebido solamente en el concreto, teniendo valores relativamente similares, indicando baja probabilidad de que exista corrosión.

Como era de esperar, según los resultados obtenidos en los ensayos de permeabilidad y profundidad de carbonatación, los morteros M2 y C2 son los que presentan el comportamiento más deficiente, generado por la baja protección que le da el mortero al acero.

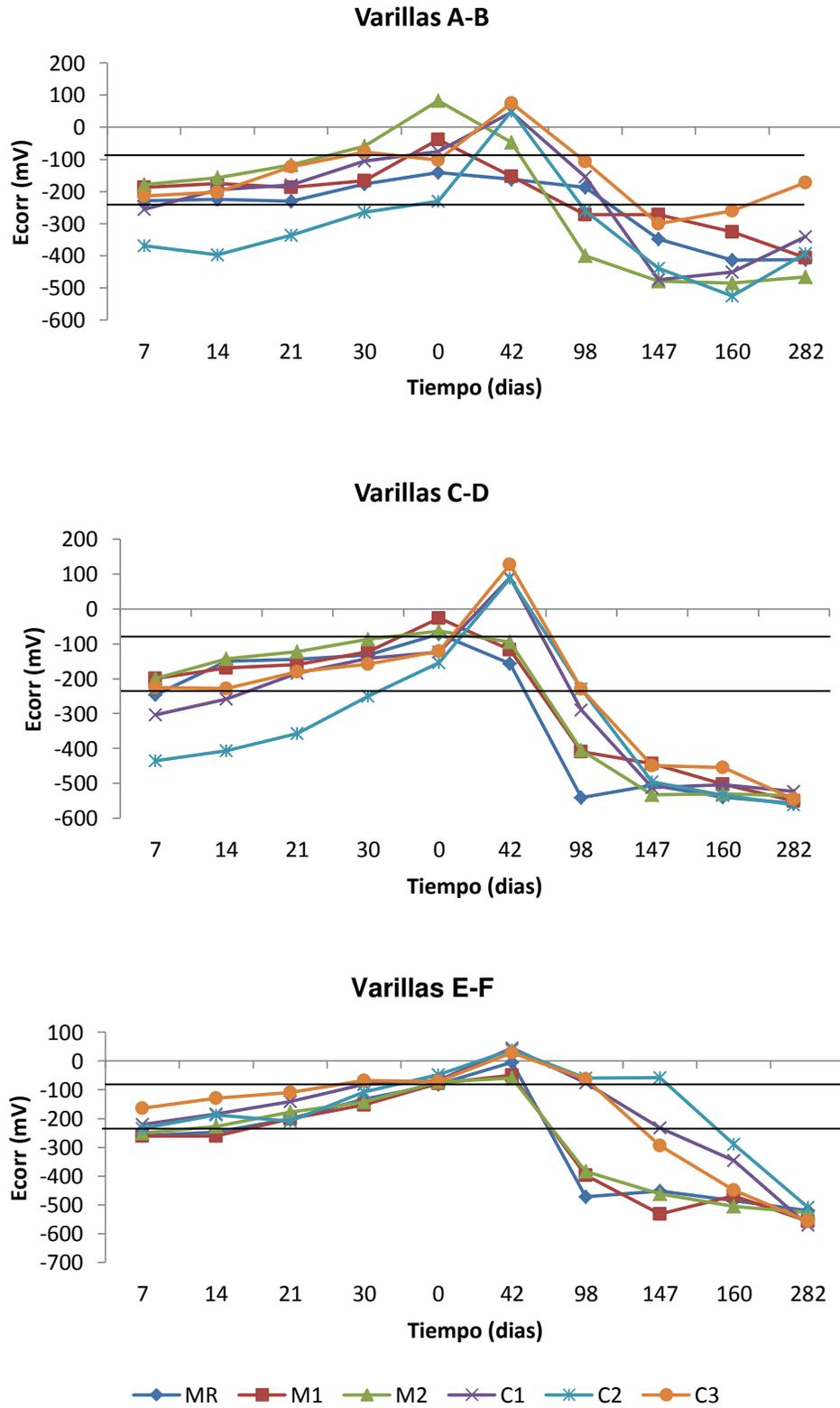


Figura 4.16. Potenciales de corrosión en vigas, ambiente natural.

El efecto protector que ejercen los morteros de reparación sobre el acero de refuerzo se ve reflejado en los resultados de potenciales de corrosión obtenidos de las varillas A y B, las cuales solo son afectadas por la protección del mortero. Estos valores indican el buen comportamiento del mortero C3, con valores de potenciales que indican un 10% de probabilidad que exista corrosión, comprobado con los resultados obtenidos anteriormente. También se demuestra la deficiente protección que ejercen los morteros M2 y C2, desde los 98 días de deterioro.

En cuanto a las varillas C y D se observa un comportamiento similar en todos los morteros, presentando valores de probabilidad alta de que exista corrosión en el acero desde los 98 días, lo cual demuestra el efecto de la interface de mortero con concreto, generando corrosión por la diferencia de ambientes en los que está expuesto el acero.

El acero expuesto solo en el concreto indica un comportamiento similar en todos los casos, tomando en cuenta que el mortero de reparación no tiene ningún efecto en estos resultados. Todos los valores tienden al mismo comportamiento, de alta probabilidad de que exista corrosión a los 282 días, a diferencia de los resultados obtenidos en el ambiente acelerado, donde se pudieran esperar valores de corrosión más altos.

Los valores obtenidos en este ensayo nos dan un indicador del estado en el que se encuentra el acero dentro de los ambientes en estudio, se comprueba con los resultados obtenidos en el ensayo de velocidad de corrosión.

4.3.3. Velocidad de corrosión (I_{corr}).

La velocidad o densidad de corrosión nos indica que tan rápido se están desarrollando las reacciones de corrosión en las probetas. Los resultados de esta prueba están correlacionados con el área superficial del acero en exposición.

La densidad de corriente de corrosión depende de la especie iónica, cantidad de la misma, humedad relativa del ambiente interno (mortero), el cual es influenciado también por la humedad del ambiente y la disponibilidad de oxígeno [21].

Lo que se pretende en estos ensayos es caracterizar la función de los morteros estudiados, como barrera física contra la penetración de sustancias agresivas como CO_2 , comparada con el comportamiento de morteros comerciales a base de cemento portland, fabricados para la misma aplicación.

Estos valores nos darán la pauta para determinar cuál de los morteros en estudio presenta la mejor protección al acero de refuerzo en estructuras de concreto expuestas a ambiente industrial.

En la Figura 4.17 se presentan los valores de I_{corr} registrados en el acero embebido en los prismas de los diferentes morteros estudiados, en los diferentes ambientes (natural y acelerado).

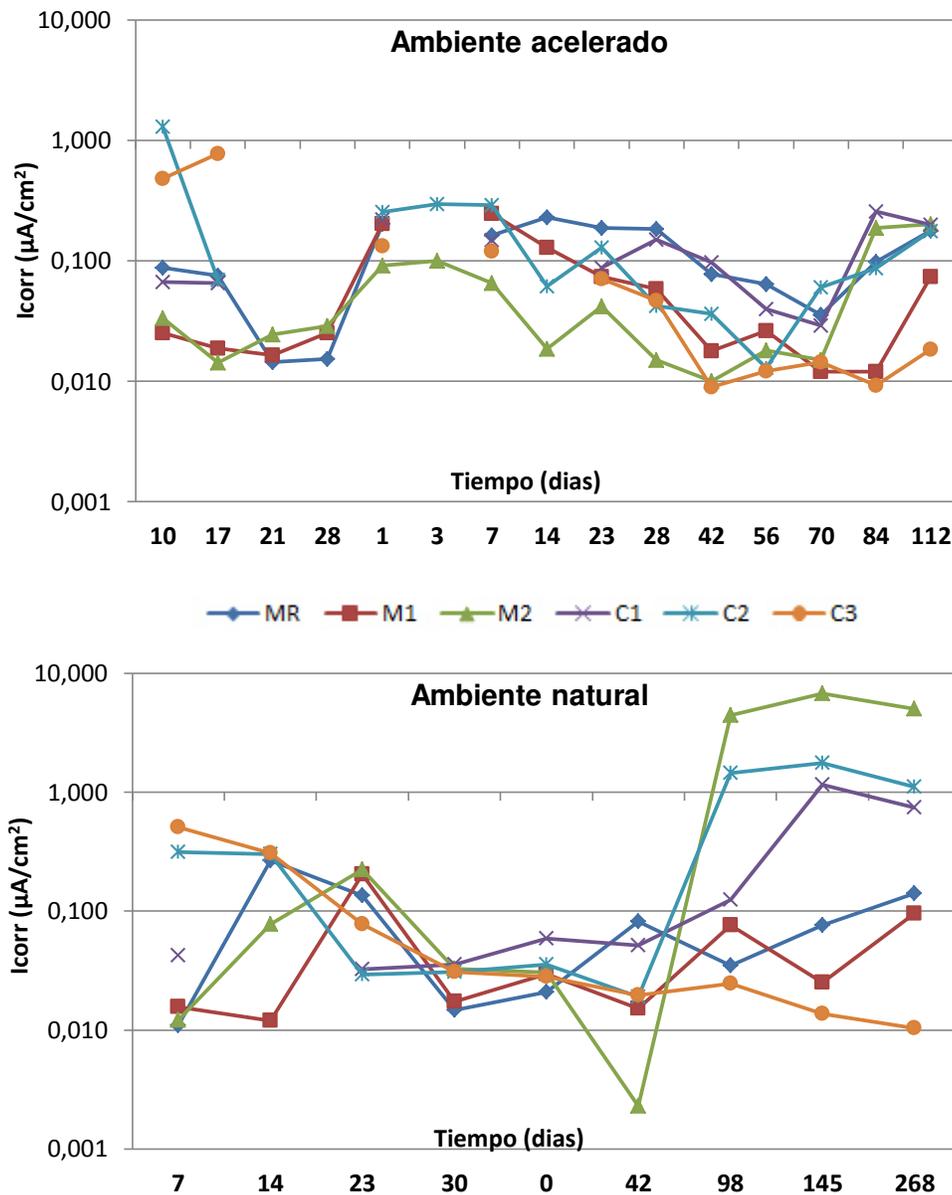


Figura 4.17. Evolucion del I_{corr} en el acero embebido en prismas de mortero.

En todos los morteros estudiados, el monitoreo de los ensayos electroquímicos se llevó a cabo desde las primeras edades después de su fabricación y durante el tiempo de exposición al ambiente en estudio.

Se puede observar que previo a iniciar el deterioro, los valores de I_{corr} comienzan con valores debajo de $0.1 \mu A/cm^2$, propios del estado de pasivación que tiene el acero al ser embebido en mortero o concreto.

Los resultados de I_{corr} comprueban los valores obtenidos en la medición de los potenciales (E_{corr}), donde para el ambiente natural los morteros MR, M2, C1 y C2 comienzan a mostrar valores de corrosión a partir de los 84 días, edad donde los morteros MR, M2 y C2 ya presentan profundidad de carbonatación mayor a los 7mm, que es el valor del recubrimiento de mortero en los prismas.

Caso similar ocurre en el ambiente natural, donde los morteros M2, C1 y C2 muestran los valores de corrosión por encima de $0.1 \mu A/cm^2$, momento en el cual, solo los morteros M2 y C2 muestran valores de profundidad de carbonatación que han llegado al acero, el mortero comercial C1, no presenta carbonatación durante todo el tiempo de exposición. En el caso del mortero C1, los valores altos de corrosión se le puede atribuir al hecho de que por ser un mortero muy permeable (Sección 4.2.2.6), los agentes agresivos penetran con facilidad y dan lugar a la corrosión del acero.

En el ambiente acelerado y natural, el mortero C3 es el que muestra el mejor comportamiento frente al ataque de CO₂, con valores de 0.015 y 0.020 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ respectivamente, lo cual indica valores de corrosión despreciables.

El mortero M1 elaborado en el laboratorio, presenta un buen comportamiento en comparación con el mortero comercial C3, ya que de igual manera muestra valores de corrosión menores a 0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Los resultados anteriores se pueden comprobar con los valores obtenidos del ensayo a las vigas de concreto, donde el par de varillas A y B se encuentran embebidas solo en el mortero de reparación (Figura 4.14), la variable a considerar sería el recubrimiento de 20 mm que se presenta en las vigas. En la Figura 4.18 se muestran los resultados obtenidos de I_{corr} en las varillas A y B para los dos ambientes.

Para los resultados obtenidos en el ambiente acelerado, desde el día 7 de exposición, la mayoría de los morteros, a excepción de los morteros C1 y C3, muestran valores de corrosión moderada. Hasta los 56 días de deterioro, se observa como el mortero C1 presenta valores de corrosión en el acero, lo cual indica su despasivación.

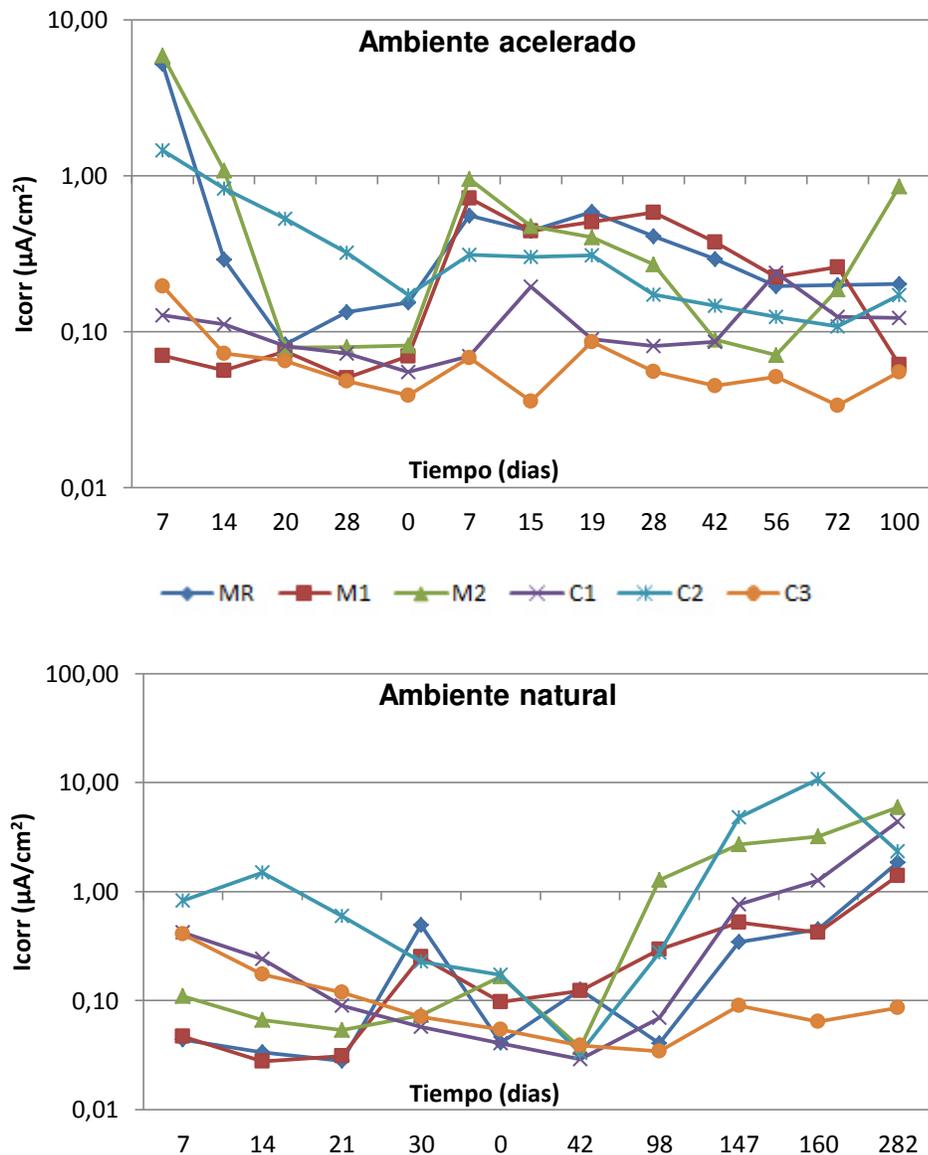


Figura 4.18. Evolución del Icorr en varillas A y B, embebidas en el mortero.

El mortero comercial C3 continua presentando buena acción protectora al acero de refuerzo, con los resultados de Icorr por debajo del $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, lo cual indica niveles de corrosión despreciables. Seguido por el mortero M1 el cual muestra valores de corrosión moderada, desde los 7 días hasta los 56 días en

el ambiente acelerado. Dicho comportamiento se puede comprobar con los resultados obtenidos en el ambiente natural, donde a los 98 días ya muestra valores de corrosión baja y continua en aumento a lo largo del tiempo. Sin embargo a los 282 días, continua teniendo el mejor comportamiento del resto de los morteros, solo el mortero C3 presenta valores de corrosión despreciable, por debajo del $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Los morteros M2, C1 y C2 muestran altos niveles de corrosión ($>1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), desde los 147 días, valores que van en aumento.

En general, se puede observar el mismo comportamiento de los morteros de reparación para diferentes ambientes de deterioro y en diferentes especímenes evaluados. De acuerdo a los valores reportados, el mejor comportamiento frente a la corrosión del acero, se muestra en el siguiente orden:

C3 → M1 → MR → C1 → C2 → M2

En primer lugar el mortero C3, con valores de corrosión bajos, que puede deberse a la utilización de adiciones minerales como la microsílíce y a diferentes aditivos. El mortero M1 con sustitución de cemento portland en 20% de CV, presenta resultados que permiten ubicarlo enseguida del mortero C3 con valores de corrosión bajos a edades avanzadas, tanto para ambiente acelerado como natural, esto debido a la adición de CV en contenido óptimo.

Numerosas investigaciones [103], reportan que al adicionar CV como reemplazo de cemento, la velocidad de carbonatación se reduce, por tal motivo, la velocidad de corrosión también es menor.

Enseguida se puede situar el mortero de referencia (MR) y después el mortero C1, el cual aunque no presenta carbonatación, muestra valores de velocidad de corrosión alta. Este comportamiento puede deberse a la permeabilidad tan alta en la superficie del mortero, lo cual se demuestra en secciones anteriores. Con el ingreso de CO₂ y humedad a través del recubrimiento de mortero se genera la corrosión en el acero y da inicio la etapa de propagación de corrosión.

Después, el mortero C2 muestra valores de velocidad de corrosión que van de moderada a alta, sin embargo, dicho comportamiento pudo preverse debido a los resultados obtenidos en los ensayos realizados a lo largo de la investigación, como lo son: resistencia a la compresión, permeabilidad y profundidad de carbonatación.

Por último, se ubica el mortero M2, con los valores más altos de velocidad de corrosión, a diferencia del M1, que la sustitución de CV no garantizó el buen comportamiento del mortero. Esto indica el peor nivel de protección de todos los morteros. Dicho comportamiento también está relacionado con las pruebas mecánicas, de permeabilidad y profundidad de carbonatación.

Otro motivo por el cual los morteros comerciales C1 y C2 muestran deterioro tan avanzado, puede ser debido a la existencia de poros o grietas generadas desde su colocación ya que su consistencia para el moldeo es muy rígida y no es posible colocarlo fácilmente.

Estos resultados obtenidos hasta el momento, corroboran, para ambos ambientes de exposición, que el efecto de las variaciones ambientales, (sea humedad relativa, temperatura y contenido de CO₂), tienen gran influencia con respecto al efecto de la corrosión en el acero, así como también la protección que le da el tipo de mortero de reparación, principalmente de las adiciones minerales y aditivos que lo componen.

Uno de los factores de mayor importancia, sin duda es la composición de cada mortero, la importancia de sus materias primas y sus características físicas y químicas. Se pudo comprobar que el uso de algunos materiales cementantes suplementarios no siempre son en beneficio de la durabilidad, debido a que su comportamiento final, ya que puede ser afectado por las dificultades de colocación del mismo y a sus características físicas finales.

- *Corrosión del acero en la interface mortero de reparación – sustrato de concreto*

La reparación de la parte dañada de una estructura por aplicación de un mortero que sustituya a la parte eliminada de concreto original, da lugar a una interface o superficie de contacto del sustrato de concreto con el mortero de

reparación. La acción que ejerce la interface mortero-concreto en la corrosión del acero se observa en la Figura 4.19.

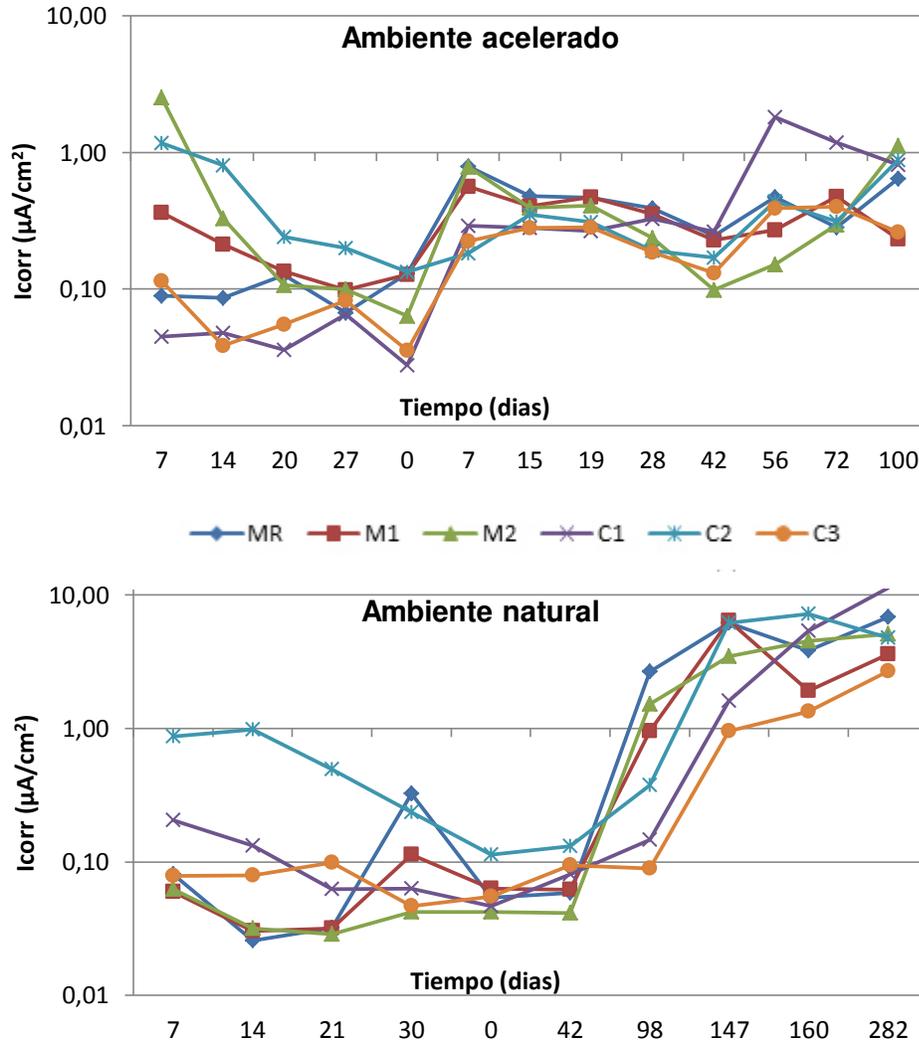


Figura 4.19. Evolución del Icorr en varillas C y D, en la interface mortero-concreto.

Para este ensayo se utilizó la configuración de la viga mostrada en la Figura 4.14. El acero marcado por C y D ubica el área expuesta del acero en los dos ambientes, para estudiar el efecto de la interface (junta), que es típica en una reparación tradicional.

Como puede observarse, al comienzo del deterioro, todos los valores de I_{corr} registrados para las diferentes barras, se sitúan por debajo de $0.1 \mu A/cm^2$, propios del estado de pasivación que tiene el acero al ser embebido en mortero o concreto.

Se puede observar que desde la primera medición (7 días) en el ambiente acelerado, todo el acero comienza a mostrar valores de I_{corr} que indican corrosión activa. Pasa lo mismo para el ambiente natural, solo que los valores de corrosión activa comienzan a reflejarse a partir de los 98 días.

Los valores obtenidos en el ambiente acelerado oscilan entre 0.1 y $1.0 \mu A/cm^2$, mientras que para el ambiente natural, hasta la última medición ya se ubican entre 1.0 y $10 \mu A/cm^2$.

Las diferencias entre los distintos morteros son coherentes en comparación con las diferencias observadas en el estudio de los prismas de mortero y en las varillas A y B de la misma viga. En ellas se demostraba el mejor nivel de protección frente a la corrosión, los morteros C3 y M1, en comparación con el resto de los morteros.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede observar la diferencia de tiempo que necesita el agente agresivo en alcanzar el acero, siendo en los morteros M1 y C3, mayor que con los morteros M2, C1 y C2.

Se puede concluir de manera puntual, que la diferencia existente entre los materiales de reparación, con precios muy elevados, en comparación con un mortero fabricado en el laboratorio, aunado a la sustitución de cemento portland por un subproducto industrial, que además de ayudarle a mejorar algunas propiedades de durabilidad, es mucho más económico y por tanto no es necesario el uso de un mortero de reparación comercial de alto costo.

Capítulo V

Conclusiones

CAPITULO V – CONCLUSIONES

En general, las pruebas llevadas a cabo nos permitieron comparar entre los morteros de reparación comerciales y los elaborados con CV, de este modo fue posible determinar el comportamiento mecánico y de durabilidad de cada mortero.

El comportamiento mecánico y de durabilidad de los morteros de reparación, está relacionado directamente con la composición química de cada uno. Los aditivos y adiciones minerales que presentan los morteros comerciales, dan algunas propiedades específicas, que no necesariamente les permite tener un comportamiento más durable que un mortero tradicional, frente al ingreso de agentes agresivos como el CO₂.

El uso de adiciones minerales como la microsílíce, en el caso de los morteros comerciales C1 y C3, favorece su comportamiento mecánico en comparación con los morteros fabricados en el laboratorio, sin embargo, no garantiza el efecto protector del mortero de reparación al acero de refuerzo.

En el caso de las retracciones en morteros, el uso de ceniza volante en los morteros fabricados en laboratorio, muestran mejor comportamiento que los morteros comerciales, debido a que el uso de microsilíce aumenta la retracción autógena, a causa del aumento en la presión capilar por el refinamiento de la distribución del tamaño de poro.

El ensayo de permeabilidad, nos da un indicativo de la resistencia que opone cada mortero frente al ingreso de CO_2 , este ensayo está relacionado directamente con la profundidad de carbonatación, excepto el mortero C1 el cual a pesar de ser muy permeable, muestra los valores mínimos de carbonatación.

En cuanto a la adherencia entre el mortero y el concreto, los valores obtenidos del ensayo, indican que los morteros C1 y C3 presentan el mejor comportamiento ya que la falla se genera monolíticamente, sin embargo, se puede considerar al mortero M1 con buena adherencia, debido a que presenta el mayor valor de resistencia a la adherencia, lo cual indica que se necesita mayor carga para que la reparación falle por adherencia.

El comportamiento de los morteros de reparación comerciales y los fabricados en laboratorio, es similar en ambos ambientes (natural y acelerado), sin embargo, el ambiente natural (industrial) fue más agresivo de lo que se esperaba, esto debido a las condiciones ambientales: temperaturas más altas y frecuente variación en la humedad relativa.

Algunas pruebas llevadas a cabo, como la resistencia a la flexión y compresión, retracción por secado y autógena, permeabilidad y porosidad, sumadas con las pruebas de durabilidad, nos dan la pauta para pensar que un mortero tradicional (cemento-arena y cemento con sustituciones minerales) puede comportarse como una reparación adecuada y duradera.

Las pruebas de durabilidad realizadas en los morteros, demostraron con mayor certeza la protección que da una reparación sobre la corrosión del acero de refuerzo.

En términos de desempeño y durabilidad los morteros que presentan el mejor comportamiento son M1 y C3. El mortero M1 con sustitución de CV de 20%, mejora el comportamiento de la referencia (MR) frente al ataque de CO_2 , incluso mejor que algunos morteros comerciales.

Desde el punto de vista de la corrosión, no todos los morteros comerciales presentan buenas propiedades de durabilidad. Entonces en comparación con morteros tradicionales de buenas propiedades de durabilidad, no es necesario el uso de un mortero comercial de alto costo.

Capítulo VI

Referencias bibliográficas

REFERENCIAS

1. PCA. “*Diseño y control de mezclas de concreto*”, 2004.
2. A. M. Neville, “*Tecnología del concreto*”, IMCYC, Vol. 3, México, 1988.
3. F.M. Lea y N. Davey, “*The deterioration of concrete in structures*”, J. Inst. C.E., No 7, Londres, 1949.
4. O. de Rincón, A. de Carruyo, C. Andrade, P. Helene, Red DURAR, Sub-Programa XV, CYETD – “*Manual de Inspección, Evaluación y diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*”, 1997, 1ª Edición.
5. P. Helene, “*Estructuras de Concreto, Proyectar para la Durabilidad*”, ACI Seccional Colombiana, Reporte Técnico.
6. ACI 222, “*Corrosion of metals in concrete*”, American Concrete Institute.
7. EN 206-1, “*Specification, Performance, Production and Conformity*”, European Committee for Standardization, 2001.
8. H. F. W. Taylor, “*Cement Chemistry*”, Academic Press Inc. London, 1990.
9. A. M. Neville, “*Properties of Concrete*”, 4th Edition, Longman Group Limited, Harlow, 1995.
10. L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri y R. Polder, “*Corrosion of Steel in Concrete*”, Wiley-VCH, Weinheim, 2004.
11. G. C. Mays. “*The behavior of concrete, Durability of concrete structures. Investigation, repair, protection*”, Edited by Geoff Mays, U.K. 1992.
12. P. G. Terradillos, M. A. Vliment y E. Zornoza, “*Corrosion de armaduras en estructuras de hormigón armado*”, ECU, 2008.

13. P. K. Mehta, P. J. M. Monteiro, "*Concrete: Structure, Properties, and Materials*", Prentice Hall, 1993.
14. F. M. Lea, P. C. Hewlett, "*Lea's Chemistry of Cement and Concrete*", Butterworth-Heinemann, 4th Edition, 1997.
15. J. C. Scully, "*The fundamentals of corrosion*", 3, Oxford: Pergamon Press, 1990.
16. M. J. Sánchez, "*Extracción electroquímica de cloruros del hormigón armado: estudio de diferentes variables que influyen en la eficiencia del tratamiento*". Tesis de doctorado, UA, Valencia, España, 2004.
17. K. Tuutti, "*Corrosion of steel in concrete*", Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.
18. Z. P. Bazant, "*Physical model for steel corrosion in concrete sea structures*", Journal of the Structural Division, ASCE, 1979.
19. C. L. Page, "*Corrosion and its control in reinforcent concrete*", The sixth Sir F. Lea Memorial Lecture, 26th Annual Convention of the institute of Concrete Technology, Bosworth (UK), 6-8 Aprin, 1998.
20. J. A. Gonzalez, "*Control de la corrosion. Estudio y medida por técnicas electroquímicas*", Madrid, España, 1989
21. C. Andrade, "*Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras*". Madrid, España, 1989.
22. P. K. Metha, P. J. M. Monteiro, "*Concrete*", Third Edition, Mc Graw Hill, 2006.
23. G. Sergi, "*Corrosion of Steel in Concrete: Cement Matrix Variables*", PhD Thesis, University of Aston, Birmingham, 1986.

24. C. Alonso, C. Andrade, *“Life time of rebars in carbonated concrete, in Progress in Understanding and Prevention of Corrosion”*, J. M. Costa, A. D. Mercer (Eds.), Institute of Materials, London, 1994.
25. H. J. Wierig, *“Long-time studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure”*, Rilem Seminar on Durability of Concrete Structures under Normal Outdoor Exposure, Hannover, 1984.
26. L. J. Parrott, *“Carbonation, moisture and empty pores”*, Advances in Cement Research, 1991/92.
27. H. Davis, G. W. Rothwell *“The Effectiveness of Surface Coating in Reducing Carbonation of Reinforced Concrete”*, BRE Information, 1998.
28. D. W. S. Ho, R. K. Lewis, *“Carbonation of concrete and its prediction”*, Cement and Concrete Research, 1987.
29. C. L. Page, *“Nature and properties of concrete in relation to reinforcement corrosion”*, in Corrosion of Steel in Concrete, Aachen, 1992.
30. J. P. Broomfield, *“Corrosion of steel in concrete: Understanding, investigation and repair”*, Taylor and Francis, 2nd Edition, 2007.
31. S. Lay, P. Schiebl, J. Cairns, *“Service Life Models; Instructions on methodology and application of models for the prediction of the residual service life for classified environmental loads and types of structures in Europe”*, LIFECON, Deliverable N° D 3.2, 2003.
32. N. J. M. Wilkins, P. F. Lawrence, *“The corrosion of steel reinforcements in concrete immersed in seawater”*, Proc. Corrosion of Reinforcement in Concrete, (Ed.) A. P. Crane, Society of Chemical Industry, 1983.

33. P. Castro-Borges, *“Corrosión en estructuras de concreto armado. Teoría, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones”*, IMCYC, México, 1998.
34. Rilem Technical Committee 124- SRC, *“Draft recommendation for repair strategies for concrete structures damaged by reinforcement corrosion”*, Materials and Structures, 1994.
35. ACI 546R-96, *“Concrete Repair Guide”*, American Concrete Institute, 1996.
36. D. Cambell-Allen, H. Ropr, *“Concrete Structures: Materials, Maintenance and Repair”*, Longman Scientific and Technical, 1991.
37. N. P. Mailvaganam, *“Repair and Protection of Concrete Structures”*, CRC Press Inc., 2000 Corporate Blvd, N. W., Boca Raton, Florida 1992.
38. BRE, Digest 444-3, *“Corrosion of Steel in Concrete – Part 3: Protection and Remediation”*, Building Research Establishment, Garston, 2000.
39. K. Babaei, K. C. Clear, R. E. Weyers, *“Workbook for Workshop of SHRP Research Products Related to Methodology for Concrete Removal, Protection and Rehabilitation”*, Wilbur Smith Associates, Falls Church, 1996.
40. N. K. Emberson, and G. C. Mays, *“Significance of property mismatch in the patch repair of structural concrete, part I: properties of repair systems”*. Mag. Concr. Res., 42, (152), 1990.
41. R. Rixom, N. Mailvaganam, *“Chemical Admixtures for Concrete”*, 3rd Edn. E. & F.N. Spon, 1999.
42. S. H. Alsayed, *“Durability of the repair materials and repaired structures”*, 6th Saudi Eng. Conference: 3; 2002.

43. G. Mays, and W. Wilkinson, "Polymer repairs to concrete: their *influence on structural performance*". ACI SP-JOO, 1987.
44. P. H. Emmons, A. M. Vaysburd and J. E. McDonald, "A *rational approach to durable concrete repairs*", *Concr. Inter*, 15, (9), 1993.
45. P. H. Emmons, A. M. Vaysburd and J. E. McDonald, "Concrete Repair *in the Future Turn of the Century-Any Problems*" *Concr. Inter*, 16, (3), 1994.
46. P. H. Emmons, "Concrete repair and maintenance" illustrated. R. S. Means Company Inc., 1993.
47. N. Mailvaganam, "Repair and Protection of Concrete Structures", CRC Press, 1992.
48. J. J. W. Gulikers and J. G. M. van Mier, "The effect of patch repairs on the corrosion of steel reinforcement in concrete".
49. D. R. Morgan, "Compatibility of concrete repair materials and systems", *Construction and Building Materials*, 1, (10), 1996.
50. D. Cusson, N. P. Mailvaganam, "Durability of repair materials", *Concrete International: Design and construction*, 18, (3), 1996.
51. M. Fernandez Cánovas, "Hormigón". *Servicio de publicaciones del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*, Madrid, 3ª edición, 1993
52. P.S. Mangat and M.C. Limbachiya, "Repair material properties for effective structural application", *Cem. Concr. Res.* 27, (4), 1997.
53. M.H. Decter and C. Keeley, "Durable concrete repair-Importance of compatibility and low shrinkage" *Const. Build. Mat.* (11), 1997.

54. G. Gudmudsson, H. Olafsson, *“Silica fume in concrete – 16 years of experience in Iceland, alkali-aggregate reaction in concrete”*, A. Shayan, Editor, Proceedings of the 10th International Conference, Melbourne, 1996.
55. B. Lagerblad, P. Utkin, *“Silica granulates in concrete-dispersion and durability aspects”*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1993.
56. S.L. Marusin, L.B. Shotwell, *“Alkali-silica reaction in concrete caused by densified silica fume lumps – a case study”*, Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Supplementary Volume, 1995.
57. M.N. Haque and O.A. Kayyali, *“Aspects of chloride ion determination in concrete”*, ACI Mater. J. 92, (5), 1995.
58. R. Mahyuddin, T. Amin Akhovan, *“Effects of polymer modification on the permeability of cement mortars under different curing conditions: A correlational study that includes pore distributions, water absorption and compressive strength”*, Const. Build. Mat. 28, 2012.
59. L.K. Aggarwal, P.C. Thapliyal, S.R. Karade, *“Properties of polymermodified mortars using epoxy and acrylic emulsions”*, Const. Build. Mat. 21; 2007.
60. Carvajal A., Giani R., Lagos R., Catinello F., Gómez C. y Vera R., *“Durabilidad de morteros con acrílico incorporado”*, en memorias del 2º Encuentro Internacional de Corrosión ACHORR, Chile 2008.

61. A. Vico, G. Rivera, L. Traversa y M. Vázquez, *“Corrosión de refuerzos de acero en presencia de morteros de reparación”*, en memorias de congreso CONAMET/SAM, Rio Negro, Argentina 2003.
62. M. Valdes y M. Vazquez, *“Corrosion de hormigones y morteros de reparación”*, en memorias de Congreso; IV Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción, Honduras 2004.
63. F. Burak, S. Turkel, A. Yigit, *“Effects of steel fiber reinforcement on surface wear resistance of self-compacting repair mortars”*, Cem. Concr. Compos. 29, (5), 2007.
64. G. Mantegazza, A.M. Penna, and S. Tattoni, *“Modification of Cement Mortars by Polymeric latexes and Their Use for Repairing Concrete”*, SP 148-24, Superplasticizers and Chemical Admixtures.
65. A. Nepomuceno y C. Andrade, *“Steel protection capacity of polimeric based cement mortars against chloride and carbonation attacks studied using electrochemical polarization resistance”*, Cem. Concr. Compos. 29, 2006.
66. D. Bjegovic, V. Ukraincik, and Z. Beus, *“Evaluation and Repair of Concrete Structure in Urban Environment: Case Study”*, SP 122-22, Paul Klieger Symposium.
67. J. Chaohua, C. Da, W. Yujuan and Z. Wei, *“Study on the mechanisms and properties of repair mortar for hydraulic concrete surface”*, Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS. Nanjing, China 2008.

68. V. Saraswathy, Ha-Won Song, *“Evaluation of cementitious repair mortar for corrosion resistance”*, Portugaliae Electrochimica Acta, 26, (5), 2008.
69. J.G. Cabrera and A.S. Al-Hasan, *“Performance properties of concrete repair materials”*, Const. Build. Mat. 5, (11), 1997.
70. NMX-C-414-ONNCCE-2004, *“Industria de la construcción - Cementos Hidráulicos – Especificaciones y métodos de prueba”*.
71. ASTM C-188. *“Standard test method for density of hydraulic cement”*: ASTM International, 2004.
72. ASTM C-618. *“Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete”*. ASTM International, 2004.
73. ASTM C-311. *“Standard test method for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in portland-cement concrete”*: ASTM International, 2004.
74. ASTM C-136. *“Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates”*. ASTM International, 2004.
75. ASTM C-33. *“Standard specification for concrete aggregates”*: ASTM International, 2004.
76. ASTM C-29. *“Standard test method for bulk density (“unit weight”) and void in aggregate”*: ASTM International, 2004.
77. ASTM C-127. *“Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate”*: ASTM International, 2004.

78. ASTM C-136. “*Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*”: ASTM International, 2004.
79. ASTM C-305. “*Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency*”: ASTM International, 2004.
80. ASTM C-143. “*Standard practice for Slump of hydraulic-cement concrete*”: ASTM International, 2004.
81. ASTM C-138. “*Standard practice for Density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete*”: ASTM International, 2004.
82. ASTM C-231. “*Standard practice for Air content of freshly mixed concrete by the pressure method*”: ASTM International, 2004.
83. ASTM C-39. “*Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*”: ASTM International, 2004.
84. ACI 318S-08. Requisitos para concreto estructural y comentarios: IMCyC, 2008.
85. ASTM C-469. “*Standard test method for static modulus of elasticity and poisson’s ratio of concrete in compression*”: ASTM International, 2004.
86. ASTM C-1437. “*Standard test method for flow of hydraulic cement mortar*”: ASTM International, 2007.
87. ASTM C-185. “*Standard test method for air content of hydraulic cement mortar*”: ASTM International, 2008.
88. ASTM C-109. “*Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortar*”: ASTM International, 2004.
89. ASTM C-157. “*Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete*”: ASTM International, 2004.

90. NF P 15-433. *“Methods of testing cement - determination of shrinkage and swelling”*; 1994.
91. ASTM C-642. *“Standard test method for density, absorption and voids in hardened concrete”*: ASTM International, 2004.
92. R. J. Torrent, *“A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site”*, Materials and Structures 25(6) 1992.
93. B. Kucharczykova, P. Misak, and T. Vymazal, *“The air permeability measurement by Torrent Permeability Tester”*, The 10th International Conference, Modern Building Materials, Structures and Techniques, Vilnius, Lithuania, 2010.
94. A.I. Abu-Tair, S.R. Rigden, E. Burley, *“Testing the bond between repair materials and concrete substrate”*, ACI Mater. J. 93, (6), 1996.
95. ASTM G1, *“Standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens”*. ASTM International, 1999.
96. ASTM C-876. *“Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete”*: ASTM International, 2004.
97. R.E. Davis, R.W. Carlson, J.W. Kelly and H.E. Davis, *“Properties of cements and concretes containing fly ash”*. Am. Concr. Inst. 33, 1937.
98. E.J. Sellevold, F.F. Radjy, *“Condensed Silica Fume (microsilica) in Concrete: Water Demand and Strength Development, in Proceeding of the 1st Mineral By-Products in Concrete”*, Ed, by V. M. Malhotra, vol. II (American Concrete institute Special publication 79), 1983.

99. A. Momayez, M. R. Ehsani, A. A. Ramezani pour and H. Rajaie, *“Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials”*, Cem. Concr. Research, (35), 2005.
100. E. u. de los Santos, “Efecto sinérgico de un agente de curado interno y un aditivo reductor de la retracción en el incremento de la durabilidad de concretos de alto desempeño expuestos a un ambiente industrial, Tesis, México, 2012.
101. H.G. Smolczyk, *“Exploration of the German long time study on the rate of carbonation”*, in Proceedings of RILEM International Symposium on Carbonation of Concrete, London, UK, 1976.
102. A. Meyer, *“Investigations on the carbonation of concrete”*, in Proceedings of 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, (3), Tokyo, Japan, 1968.
103. Khunthongkeaw J, Tangtermsirikul S. Leelawat T., *“A Study on Carbonation Depth Prediction for Fly Ash Concrete”* Constr Build Mater. 20(9), 2006.