

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**EFFECTO DE LA COHESIÓN EN LA ADHERENCIA Y  
DURABILIDAD DE MORTEROS DE REPARACIÓN BINARIOS  
ADICIONADOS CON MICROFIBRAS DE POLIPROPILENO BAJO  
LA ACCIÓN DE CO<sub>2</sub> ACELERADO**

**Por**

**ING. JULIO CÉSAR GONZÁLEZ FÉLIX**

**Como requisito para obtener el Grado de Maestría en Ciencias  
con Orientación en Materiales de Construcción.**

**Enero, 2021**

## TABLA DE CONTENIDO

Capítulo	Pág.
<b>1. Introducción</b> .....	2
1.1. Durabilidad de estructuras de concreto .....	3
1.2. Componentes del concreto armado .....	5
1.2.1. Concreto.....	5
1.2.2. Acero de refuerzo .....	6
1.3. Degradación de elementos de concreto armado .....	8
1.4. Corrosión del refuerzo en concreto reforzado.....	9
<b>2. Antecedentes</b> .....	21
2.1. Factores que afectan la union entre concreto envejecido y su reparación.....	22
2.2. Estado de esfuerzos en zona de interfaz.....	24
<b>3. Planteamiento del problema, hipótesis y objetivos</b> .....	28
3.1. Planteamiento del problema .....	28
3.2. Hipótesis.....	29
3.3. Objetivo General.....	29
3.4. Objetivos Específicos .....	29
<b>4. Programa Experimental</b> .....	30
4.1. Equipos para caracterización .....	30
4.1.2. Distribución de tamaño de partícula (DTP).....	30
4.1.3. Microscopio Electrónico de Barrido .....	30
4.1.4. Fluorescencia de rayos X (FRX) .....	31
4.2. Materiales y métodos.....	32
4.2.1. Cemento.....	32
4.2.5. Superplastificante.....	39
4.3. Elaboración de especímenes para adherencia.....	41
4.4. Elaboración de morteros de reparación. ....	45
4.4.1. Consistencia.....	45

<b>5. Resultados y Discusión</b> .....	48
5.1. Resistencia a la compresión.....	48
5.2. Resistencia a la compresión diametral .....	49
5.3. Módulo de Elasticidad.....	53
5.4. Esfuerzo oblicuo: Adherencia, ángulo de fricción interna y cohesión. ....	57
5.4.1. Fricción interna de la arena caliza.....	57
5.4.2. Cohesión y ángulo de fricción interna en zona de interfaz, mortero-sustrato.....	60
5.5. Retracción.....	66
5.6. Porosidad.....	67
5.7. Resistividad .....	68
5.8. Carbonatación. ....	71
5.8.1. Profundidad de carbonatación .....	74
5.9. Discusión .....	76
5.9.1. Carbonatación.....	79
5.9.2. Adherencia .....	80
<b>6.Conclusiones y recomendaciones</b> .....	85
6.1. Conclusiones .....	85
6.2. Recomendaciones .....	87
<b>7. Bibliografía</b> .....	88

# Capítulo 1

## 1. Introducción

El concreto se conceptualiza como un material durable, sin embargo, dicha durabilidad está relacionada con su diseño de mezclas y su exposición a los agentes ambientales; a la existencia y posición de acero de refuerzo, la colocación, acabado, curado y protección dada en sus etapas tanto de concreto en estado fresco como endurecido.

Debido a la explosión demográfica, la necesidad por espacios y servicios ha incrementado el uso de los materiales de la construcción siendo el más usado el concreto. El concreto reforzado ofrece, como material compuesto, las características que diseñadores y especialistas en construcción requieren, ya que posee un comportamiento apropiado a las solicitaciones de servicio que los proyectos en general especifican. Por mucho tiempo las características más relevantes fueron las mecánicas, donde la resistencia a la compresión fue la predominante.

La exposición de las estructuras de concreto armado ante agentes ambientales, cambios de uso y servicio, por mencionar algunos factores, evidencian una degradación de las características mecánicas que originalmente se consideran al momento de la concepción de la obra en particular. Debido a lo anterior, los especialistas han manifestado la relevancia del mantenimiento de las estructuras para aumentar la vida útil de estas, donde dichas edificaciones, construcciones u obras cumplan con las propiedades mecánicas con las que fueron conceptualizadas.

Se encuentran dos vertientes en cuanto a mantenimiento se refiere, la primera es la preventiva y la segunda más crítica aún, la correctiva. Cuando es

requerido realizar una acción correctiva, es cuando se considera el concepto de reparación. Dichas reparaciones son necesarias debido al aumento de edificaciones o estructuras con deficientes programas de mantenimiento preventivo, y debido también a la visión sustentable de la sociedad por disminuir la cantidad de desechos provenientes de la demolición de las construcciones; por lo anterior, el tema de las reparaciones toma relevancia en la actualidad (ACI 546.3, 2014).

### 1.1. Durabilidad de estructuras de concreto

El concreto hidráulico es el material de construcción más utilizado en los últimos tiempos, está compuesto básicamente por una parte aglutinante, agregados, aditivos; adiciones minerales y refuerzos de diversa índole (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tenesi, 2004; Mehta, 1988). Siendo el concreto un material cerámico tiende a poseer baja resistencia a la tensión y fallas frágiles. Debido a lo anterior, al concreto se le ha incorporado acero al carbono, con lo cual las propiedades mecánicas han sido satisfactorias para los sistemas constructivos y necesidades modernas. Entonces, todos materiales existen una similitud en cuanto al coeficiente de dilatación, por ello, al trabajar en sinergia, no se quedan esfuerzos residuales permitiendo que el concreto en sí funcione como una barrera física y química, que ralenticen los procesos de deterioro del acero al carbón ante los agentes ambientales, físicos, químicos o biológicos que una estructura o elemento están sujetos ante la vida en servicio.

El comité 201R del Instituto Americano del Concreto (ACI, por sus siglas en ingles), define a la durabilidad del concreto como la habilidad de resistir la acción del intemperismo, ataque químico o cualquier proceso de deterioro. Las características inherentes tanto del diseño de mezclas del concreto, la calidad de la materia prima que lo conforma, condiciones de servicio y agentes internos y externos, agentes biológicos y aquellos vinculados al cambio climático, intervienen en la antes definida durabilidad del concreto (Mendoza-Rangel & Castro-Borges, 2009; Portland Cement Association, 2004).

Según la Norma mexicana NMX-C-546-ONNCCE-2018, el concepto de vida útil o vida de servicio se define con un periodo de tiempo, que tiene un enfoque similar al comité a 201R, aportando que la estructura debe de mantener sus características mecánicas, geométricas, funcionales y estéticas. Todo lo anterior con un mínimo de mantenimiento con lo cual le permita que el elemento la estructura el soporten a los agentes tanto internos como externos (ONNCCE, 2018) .

De acuerdo con autores (Sanjuan-Barbudo, Miguel ; Castro, 2001) la vida útil de una estructura de concreto reforzado tiene dos periodos relevantes (véase, Figura 1), el de iniciación ( $t_0$ ) y el de propagación ( $t_p$ ). En el primer periodo es donde el concreto permanece sin alteraciones, mientras está expuesto a diversos agentes agresivos. El periodo de propagación se caracteriza por ser aquel donde los agentes agresivos propician un daño o proceso deleznable o demeritorio, hasta el punto de que la integridad de la estructura o funcionalidad del elemento o estructura es inaceptable.

El criterio para determinar el estado límite de una estructura es subjetivo ya que dependen de diversos factores interrelacionados, como el grado de deterioro mínimo aceptable en servicio de la estructura o para proponer una reparación efectiva y económica. La predicción de dicha vida útil residual, esta función del proceso de corrosión debido a que este es el mecanismo de deterioro afecta a las estructuras de concreto reforzado en cuanto a su servicialidad y funcionalidad (Mendoza-Rangel, J.M. , Flores-Jarquín, 2016).

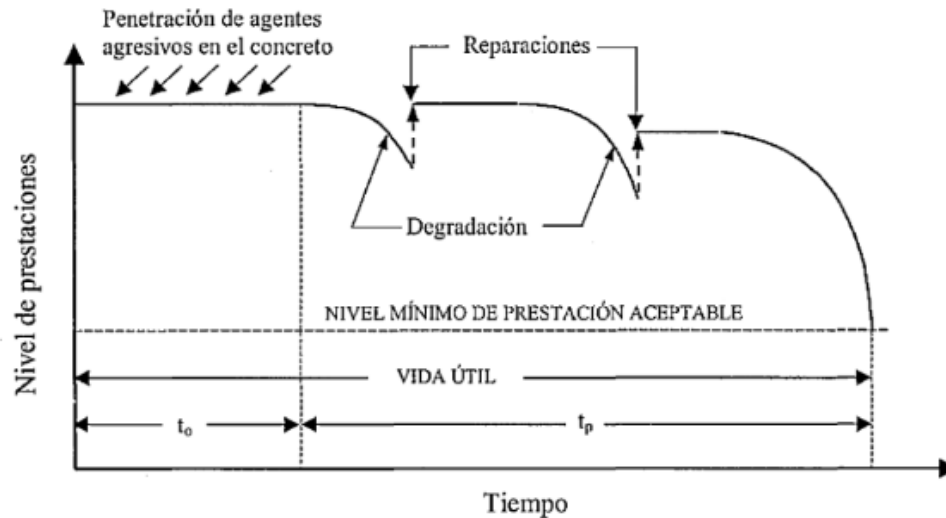


Figura 1.- Esquema representando la vida útil de una estructura de concreto (Sanjuan-Barbudo, Miguel ; Castro, 2001)

## 1.2. Componentes del concreto armado

### 1.2.1. Concreto

El concreto es un material pétreo, artificial y obtenido de una mezcla en proporciones determinadas, tanto agua, cemento y agregados. A este concreto algunas veces se le añaden ciertas sustancias denominadas aditivos que a su vez mejoran o modifican algunas de las propiedades del concreto en su estado fresco o endurecido.

El concreto simple, sin ningún tipo de refuerzo, es considerado un material con limitada aplicabilidad en el ámbito del diseño estructural, siendo un material cerámico posee un excelente desempeño ante las sollicitaciones de compresión, sin embargo, una muy limitada capacidad de atención per se.

A través de los años el uso del acero estructural utilizado comúnmente en forma de barras o varillas ha sido utilizado para restringir el agrietamiento del concreto en ciertas zonas donde se considera que las tensiones producidas ante las sollicitaciones de servicio generen agrietamientos.

El uso del refuerzo mediante el acero al carbón ha incrementado la resistencia final a la compresión del elemento reforzado, empleado para disminuir deformaciones unitarias de los elementos o estructura, ya sean éstas generadas o el servicio o debidas a la aplicación de cargas en el tiempo y adicionalmente proporcionar al concreto un confinamiento que indirectamente aumenta su resistencia a la compresión (González Cuevas & Robles, 2005) y su desempeño ante fenómenos tales como: sismos, acciones accidentales o sobrecargas.

### 1.2.2. Acero de refuerzo

Para la producción de acero, el mineral de hierro (óxido de hierro) se calienta en un alto horno en presencia de coque (carbono) y oxígeno. El carbono reduce el óxido de hierro a hierro en bruto líquido, produciendo monóxido de carbono y bióxido de carbono como subproductos. La piedra caliza, agregada para ayudar a eliminar impurezas, se funde produciendo escoria líquida. Dado que el hierro bruto líquido contiene cantidades muy grandes de carbono, se sopla oxígeno en el horno de oxigenación o de aceración básico para eliminar carbono excedente y producir acero líquido. También, se produce acero calentando la chatarra del mismo metal. A menudo ésta se introduce en un horno eléctrico de arco, en el cual el calor la funde. Muchos aceros aleados y aceros especiales también se producen utilizando hornos eléctricos. El acero líquido a veces se vacía directamente en moldes para producir fundiciones de acero terminadas; también se le permite solidificar en formas que posteriormente son procesadas por técnicas de conformado de metales como es el laminado o el forjado (Askeland, Donald ; Wright, 2017).

El acero que se utiliza para reforzar elementos de concreto existe en dos presentaciones, acero laminado en caliente o acero trabajado en frío. En todos los diámetros usuales de barras producidas en México podemos encontrar que varían desde 1/4 a 1 1/2 pulgadas, todas las barras a excepción de la 1/4, generalmente lisa, tienen corrugaciones en la superficie para mejorar e incrementar la adherencia con el concreto.



El tipo de acero es fácilmente determinado al conocer su estado límite o esfuerzo de fluencia característico, obtenido de las curvas esfuerzo-deformación del propio material (Figura 2). En México se cuenta con una gran variedad de hacer acero de refuerzo por mencionar el caso de las barras laminadas en caliente las cuales tienen límite de fluencia que oscilan entre 2300 hasta 4200 kg/cm<sup>2</sup>.

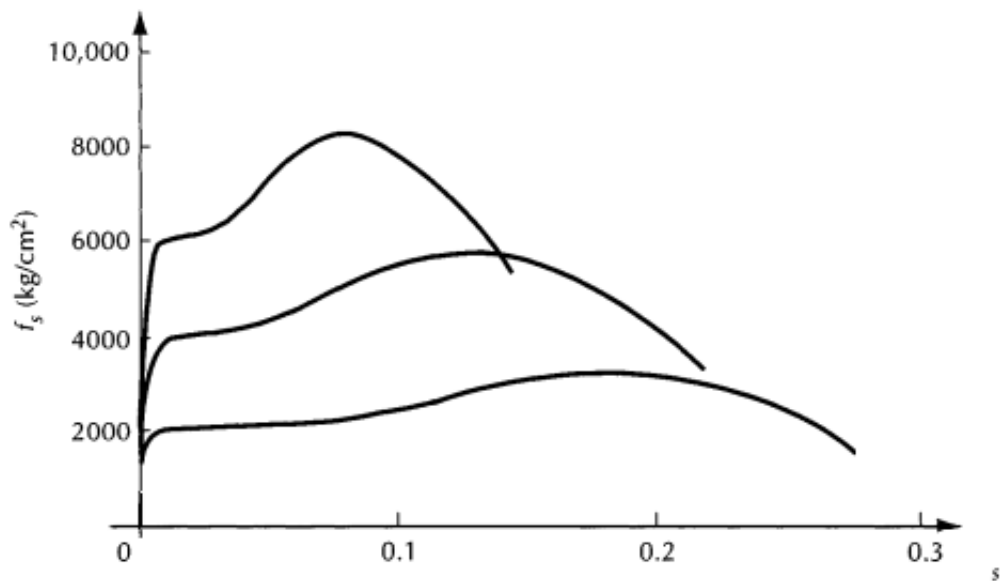


Figura 2.- Curvas esfuerzo-deformación unitaria de aceros laminados en caliente (González Cuevas & Robles, 2005)

### 1.3. Degradación de elementos de concreto armado

Los factores descritos en la Figura 3 son aquellos causantes de dañar el concreto armado, y estos pueden ser físicos, químicos o biológicos. Entre los factores físicos se encuentran aquellos generados por la erosión, impactos, explosiones, abrasiones, cambios bruscos en la temperatura, congelamiento-deshielo y las propias cargas inerciales o de servicio (cambios de uso, asentamientos, cargas mantenidas en el tiempo) en una estructura. El contacto con aguas marinas, puras, ácidas, sulfatadas o agentes ambientales, representan algunos tipos de ataques químicos. Por último, tenemos los factores biológicos consideramos a los microorganismos, algas o seres vivos, quienes segregan, alimentan o inducen daños debido a la simbiosis con el sustrato (Sanjuan-Barbudo, Miguel ; Castro, 2001). Los efectos adversos de la contribución individual o en sinergia de los factores antes mencionados produce que los elementos o estructura de concreto reforzado se vean afectadas en sus propiedades mecánicas, superficies o comportamiento estructural, en demerito de las características estéticas, funcionales y de servicio que originalmente fueron proyectadas.

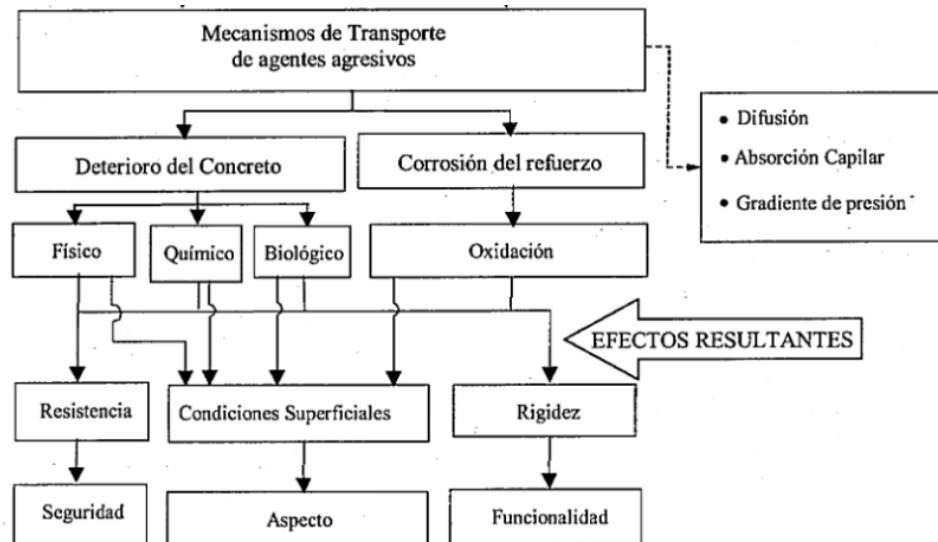


Figura 3.- Factores que afectan al concreto armado (Sanjuan-Barbudo, Miguel ; Castro, 2001)

#### 1.4. Corrosión del refuerzo en concreto reforzado

Según el Organismo Nacional de Normalización y Certificación para la Construcción y la Edificación (ONNCCE), “la corrosión del acero de refuerzo es un proceso electroquímico deterioro de un metal colocado en el interior de una matriz de concreto hidráulico. Eso significa que envuelve la transferencia de cargas (electrones) desde un elemento a otro. Entendiendo que la corrosión es un proceso espontaneo de destrucción que experimentan los metales en contacto con el medio ambiente, regresándolos a un estado más estable, es decir, a su forma de óxidos. Para que reacción química ocurra debe ocurrir dos reacciones de media celda, una capaz de producir electrones (la reacción anódica, la oxidación del Hierro (Fe) y otra capaz de consumir electrones (la reacción catódica, la reducción del oxígeno para formar iones hidroxilo (OH))” (García, 2003; ONNCCE, 2018).

Los productos del acero de refuerzo posteriores al proceso corrosión dan como resultado la formación de óxidos con un volumen de 2 a 4 veces más que el volumen original (García, 2003), derivando en una pérdida de sus propiedades mecánicas. Adicionalmente, generando una reducción de la sección transversal del acero cuya consecuencia es la disminución de la capacidad resistente del acero; fisuras y delaminaciones en el concreto y un comportamiento mecánico del elemento de concreto armado no satisfactorio a los niveles de servicio.

Conforme a la literatura, el concreto reforzado en su estado natural cuenta con un pH de entre 12.6 a 14, el acero de refuerzo para estas condiciones de alcalinidad se mantiene en un estado pasivado es decir, queda protegido de la iniciación de la corrosión (Feliu, S; Andrade, 1989) (Figura 4). Sin embargo, en la vida útil de los elementos de concreto reforzado ciertas interacciones con el medio provocan que el pH del concreto baje a valores cercanos o menores a 10, propiciando que la capa protectora del acero se pierda e inicie el proceso de la corrosión.

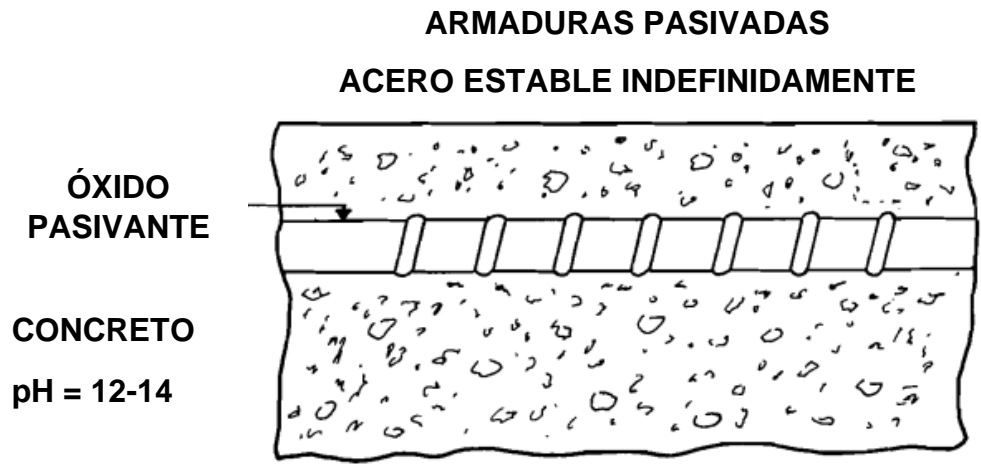


Figura 4.- Armaduras embebidas en concreto sin contaminantes (Feliu, S; Andrade, 1989)

La clasificación de la forma o morfología en que se presenta la corrosión (Figura 5), resulta útil para la evaluación del daño producido, presentándose en una forma uniforme, localizada, picadura, fisuramiento o agrietamiento. La corrosión uniforme, es práctica ya que permite determinar la vida útil mediante el avance del daño sobre la superficie del metal. La corrosión por picadura o localizada se refiere a los ataques en puntos aislados de la superficie metálica pasiva, propagándose de forma de canales cilíndricos hacia el interior.

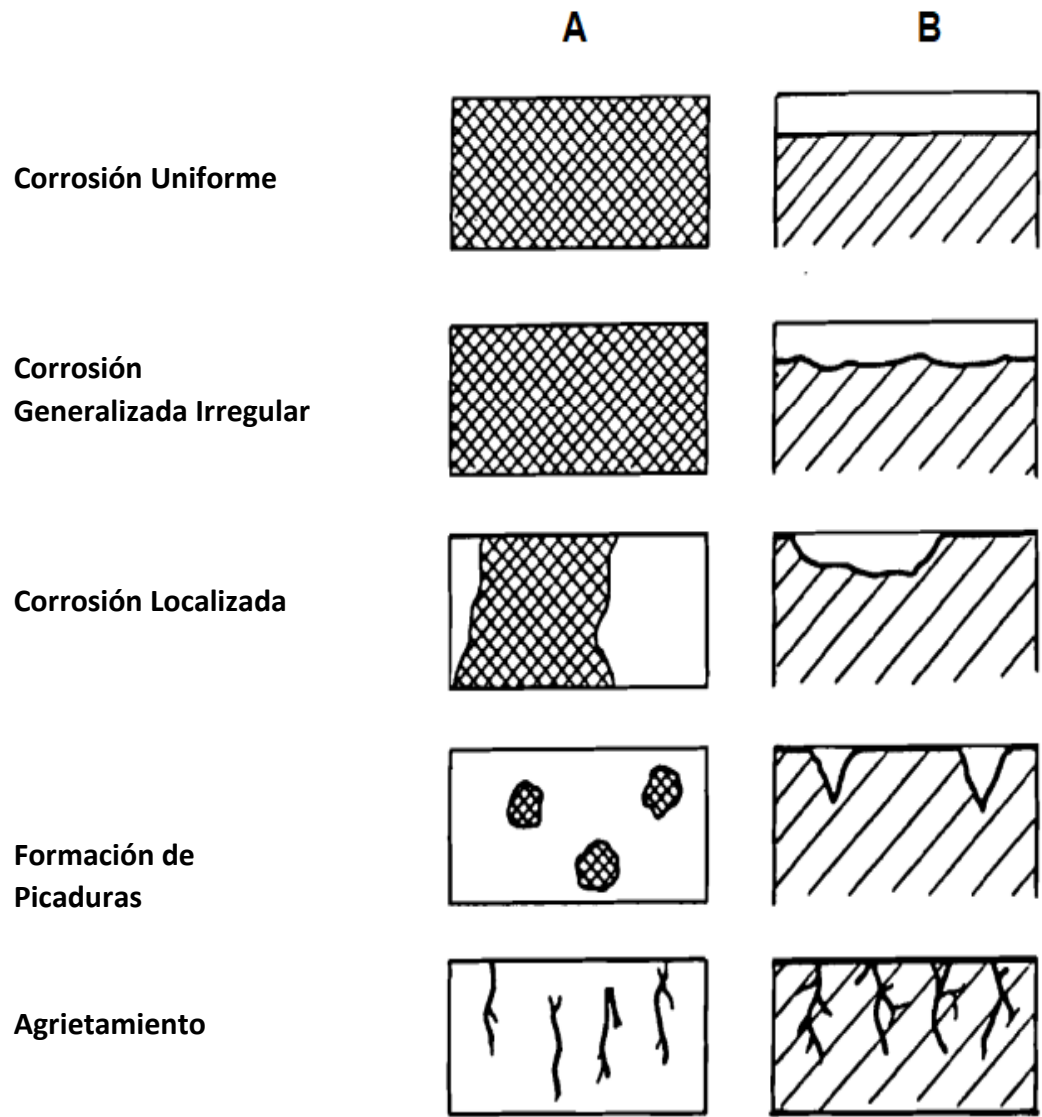


Figura 5.- Morfología de la corrosión (Andrade & Feliu, 1989)

### 1.4.1. Corrosión por carbonatación

Según la Red Iberoamericana DURAR, posterior al proceso de hidratación del cemento portland, se forman los compuestos de hidratación y entre sus poros una fase acuosa, dicha solución contiene componentes alcalinos. El dióxido de carbono presente en el ambiente penetra en solución en forma de ácido carbónico con pH alrededor de 6 (Fajardo-San Miguel, 2009), comenzando un proceso de neutralización; este reacciona químicamente con la solución de poro, precipitando compuestos y disminuyendo el pH del área. La disminución de pH modifica las condiciones de estabilidad termodinámica y genera la pérdida de la pasividad del acero de refuerzo, en un denominado “frente carbonatado”, manifestándose como una corrosión uniforme (véase, Figura 5). La carbonatación del concreto armado está íntimamente ligada a tres factores: a) contenido de humedad del concreto, b) su porosidad (a/c) y c) su contenido de materia potencialmente carbonatable (Red DURAR, 2000).

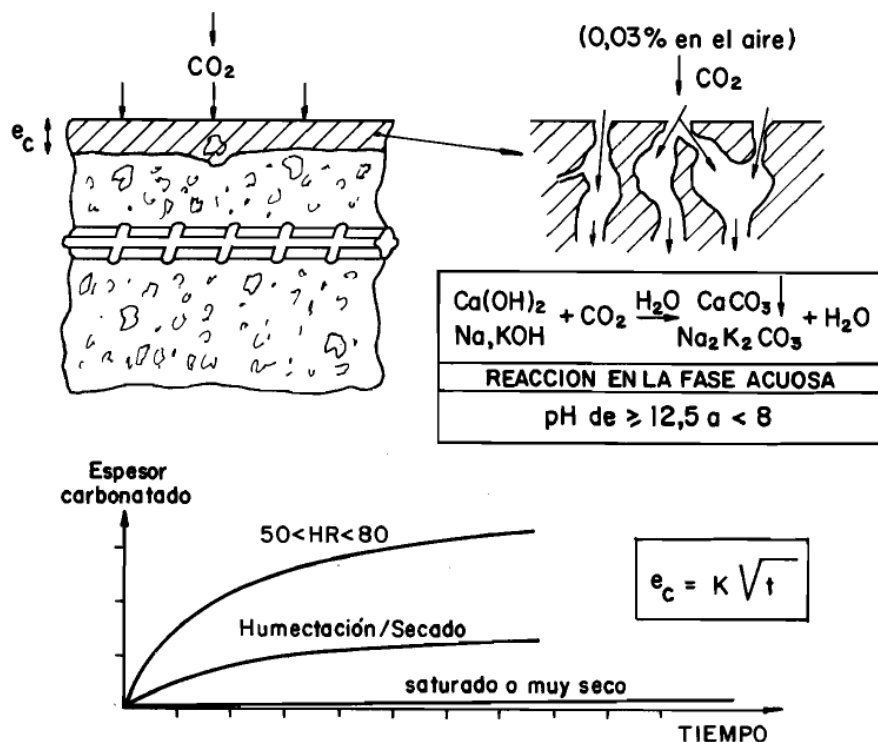


Figura 6.- Carbonatación del recubrimiento de concreto y la relación del espesor carbonatado con el tiempo y la humedad ambiental (Andrade & Feliu, 1989).

La Figura 6 muestra gráficamente el frente y espesor carbonatados ( $e_c$ ). Se aprecia como la red de poros, en función de la permeabilidad permite que las concentraciones de  $\text{CO}_2$  del ambiente, con un valor de 0.3% para condiciones ambientales normales interactúen con la fase acuosa en el concreto (Emmons, 2013). Las reacciones entre la portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) y los hidróxidos de sodio y potasio. En primer lugar, el  $\text{CO}_2$  se combina con la humedad del ambiente ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y forman ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). En segundo lugar, la interacción del ácido carbónico con el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) genera bicarbonato cálcico ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ). Por último, en el proceso de precipitación, el bicarbonato cálcico reacciona con el  $\text{CO}_2$  del ambiente precipitando  $\text{CaCO}_3$  y generando vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Los compuestos precipitados no son solubles en agua produciendo una baja en el pH por el proceso de neutralización y una disminución de la red de poros interna del concreto, por ello, la velocidad de penetración de  $\text{CO}_2$  con el tiempo es más lenta, obedeciendo la ley de Fick.

La humedad relativa (HR) es un factor clave en este proceso como se expresa en la parte inferior de la Figura 6, los valores de HR que están dentro del 50 al 80 %, ya que de no haber humedad el proceso se ralentiza debida a la baja solubilidad del  $\text{CO}_2$  en el aire, caso contrario al estar en saturación el material no permite que se generen los procesos químicos.

El espesor carbonatado puede describirse mediante la siguiente expresión:

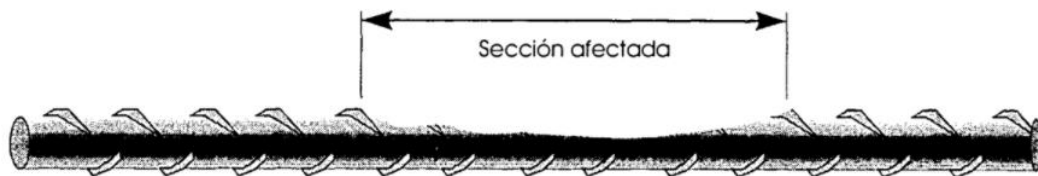
$$e_c = K\sqrt{t} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $e_c$  es el espesor carbonatado o profundidad de carbonatación (mm) y  $t$  es el tiempo (años). El coeficiente de carbonatación  $K$  ( $\text{mm/año}^{1/2}$ ) se puede tomar como referencia de la velocidad de carbonatación, el parámetro  $K$  está en función de las características el concreto, sus proporciones, tipo de cementantes, materias primas, presencia de materiales puzolánicos, entre otros.

#### 1.4.2. Efectos deletéreos del concreto armado asociados a la corrosión

Los principales efectos deletéreos de la corrosión del acero en elementos de concreto reforzado que repercuten directamente en la capacidad portante de la estructura o en su comportamiento estructural se mencionan a continuación (Mendoza-Rangel, J.M. , Flores-Jarquin, 2016):

- Disminución de la ductilidad del acero, debido a las fisuras en la sección del acero de refuerzo (Figura 7).
- Pérdida de la adherencia concreto-acero de refuerzo.
- Pérdida de la sección efectiva en los elementos debido al desconchamiento o desprendimiento de recubrimientos (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)



*Figura 7.- Pérdida de sección transversal en acero de refuerzo debido a la corrosión (Emmons, 2013)*

Con la finalidad de estudiar las manifestaciones de deterioro de las estructuras de concreto reforzado, éstas se han dividido en tres grupos: Deterioros superficiales, agrietamientos y deterioros ocasionados por problemas de durabilidad (Castro, 2012).



## Deterioros superficiales

- Descascaramientos o astillamientos. - Perdida del material superficial en forma de escamas, asociado a causas probables debidas a los agregados sucios, el exceso de agua durante el amasado, calidad y espesor del recubrimiento, diámetro del acero de refuerzo y porcentaje de corrosión por peso del acero de refuerzo (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) (Emmons, 2013).
- Desgaste superficial. - Pulimento de la superficie con aparición de agregado grueso, en general efecto estructural.
- Fisuramiento. - Agrietamiento poco severo con aparición de líneas finas interconectadas o familia de fisuras con tendencia a líneas paralelas, ocasionado por defectos en el proceso de curado o bien del exceso de agregado fino.
- Excesiva rugosidad. - Inadecuadas superficies planas debidas a un mal proceso constructivo.

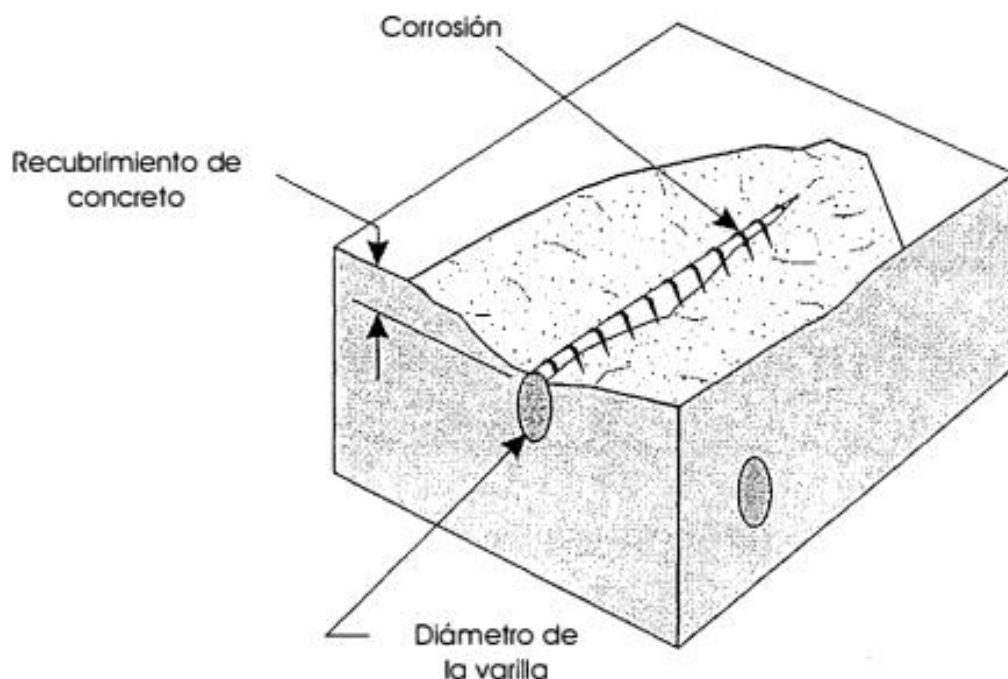


Figura 8.- Desconchamiento del concreto atribuido a corrosión (Castro, 2012).

## Agrietamientos diversos

- Disgregación. - Grietas en todas direcciones con desintegración del concreto, se manifiesta por la pérdida de adherencia entre el mortero y el agregado grueso. Algunas de las causas asociadas son aquellas derivadas de las reacciones álcali agregado, procesos de congelamiento y deshielo.
- Mapeo. – Grietas en forma de mapa con presencia en las mismas de gel expansivo propio de una reacción álcali-agregado, siendo el más común la reacción álcali-sílice, seguida de álcali-carbonato.

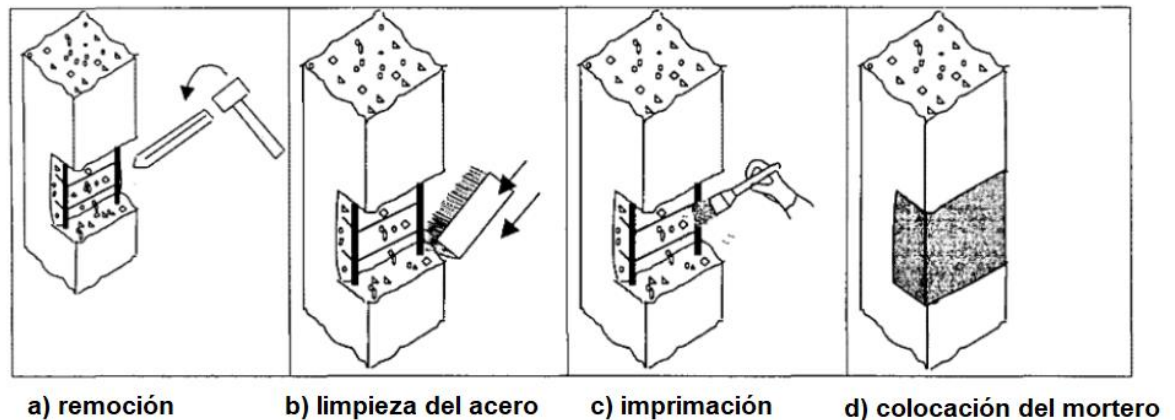
### 1.5. Sistemas de reparación para estructuras de concreto reforzado

Luego de que las estructuras están sujetas a un proceso de deterioro y con la finalidad de aumentar su vida útil, se inicia un proceso de rehabilitación. Las acciones correctivas o de reparación serán evaluadas por los criterios de seguridad, economía, recursos humanos y tecnológicos. Dentro de las más importantes sistemas de reparación se mencionan los morteros de tipo parcheo, recubrimientos ornamentales, aceros especiales, realcalinización, inhibidores de corrosión y protección catódica.

#### 1.5.1. Morteros tipo parcheo

El método mayormente usado para las reparaciones de concreto con problemas de corrosión. Consiste en remover el concreto deteriorado y los productos de corrosión del acero de refuerzo, aplicar algún agente de imprimación al armado, un agente de unión entre mortero y sustrato (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Los morteros de reparación deben ser compatibles al material a reemplazar (Castro, 2012).

Los morteros de reparación a utilizar deberán proteger al acero de refuerzo de las condiciones de servicio, acciones físicas y de los agentes agresivos.



*Figura 9.- Proceso de reparación tipo parcheo (Castro, 2012)*

Dentro de la clasificación de materiales de reparación se cuenta con tres grupos: morteros base cemento, base cemento modificados con polímeros y morteros resinosos (Flores, 2014). Por cuestión de la compatibilidad los morteros base cemento son según los investigadores los más compatibles y económicos, sin embargo, estos materiales cuentan con una contracción por secado relativamente alta, generando que el material se separe del sustrato. Los morteros modificados con polímeros cuentan con alta adherencia con el sustrato, buena trabajabilidad, buena resistencia a la abrasión, fáciles de aplicar, solo que son una opción costosa. Por último, los morteros resinosos tienen un excelente desempeño como material de reparación, pero al ser de origen polimérico, este forma una barrera de vapor que fomenta a que falle su adherencia con el sustrato.

## 1.6. Durabilidad de reparaciones

La compatibilidad se define como el equilibrio entre el material de reparación y el sustrato a reparar en cuanto a las propiedades físico, químicas, mecánicas, electroquímicas y dimensionales (Morgan, 1996) . Es relevante que existan las diversas compatibilidades debido a que la interacción de ambos materiales (sustrato-mortero de reparación) generarían esfuerzos internos al momento de la aplicación de solicitaciones mecánicas o deterioros diversos por reacciones químicas o físicas.

En la Figura 10 se muestran las características más relevantes para la durabilidad de las reparaciones en general. Dentro de la primera instancia es la selección del material denominado compatible, en su compatibilidad dimensional, química, electroquímica y permeabilidad. Las características que evaluar en primer instancia serán: la de retracción por secado, expansión térmica, fluencia, módulo de elasticidad y geometría de la sección.

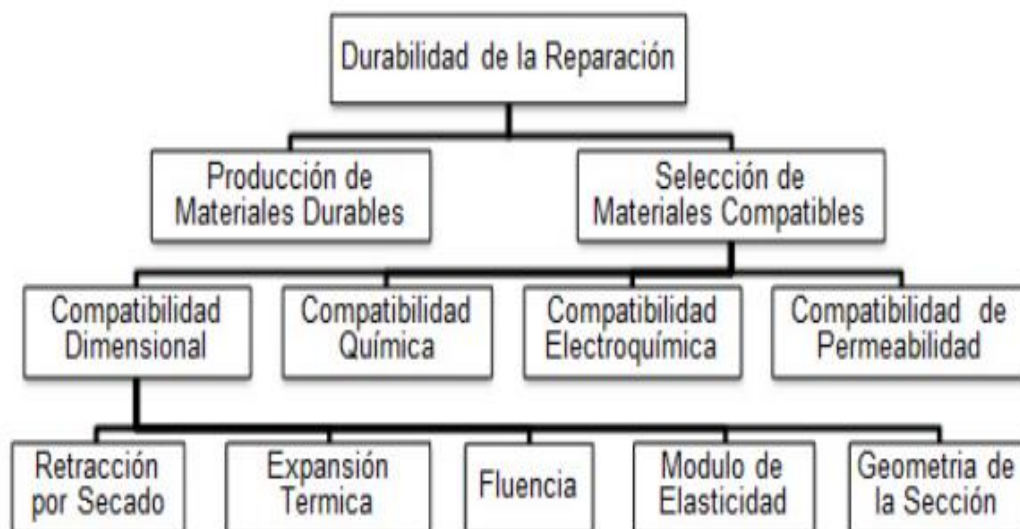


Figura 10.- Factores que afectan la durabilidad de un material de reparación (Morgan, 1996)

En la Tabla 1 se mencionan los principales criterios para asegurar la compatibilidad estructural de una reparación tipo parcheo, considerando principalmente las propiedades mecánicas.

Tabla 1 Requisitos generales para compatibilidad estructural para materiales tipo parcheo (Mays, 2001).

<b>Propiedad</b>	<b>Relación del mortero de reparación (R) con el concreto de sustrato (C)</b>
Resistencia a la compresión, tensión y flexión	$R \geq C$
Modulo a la compresión, tensión y flexión	$R \sim C$
Relación de Poisson	Depende del módulo y tipo de reparación
Coefficiente de expansión térmica	$R \sim C$
Adherencia en tensión y cortante	$R \geq C$
Curado y agrietamiento	$R \geq C$
Capacidad de deformación	$R \geq C$
Fatiga	$R \geq C$

La presente investigación se enfoca en la necesidad de la generación de conocimiento sobre materiales alternativos en la reparación de elementos de concreto. Por consiguiente, se propone aportar conocimiento en dicha área, mediante materiales de reparación base cemento, con la finalidad de aplicarse a elementos de concreto reforzado que han sufrido cierto grado de deterioro por causas ambientales. La característica principal de este trabajo radica en la elaboración de un material de reparación base cemento que cuente con un enfoque sustentable, por ello se opta por utilizar un subproducto industrial en este caso ceniza volante clase F. La importancia entre las características físicas-mecánicas del sustrato a reparar y el material de reparación serán revisadas desde un aspecto de esfuerzos internos y de interacción ante acciones mecánicas y de acción de un agente ambiental (acción del  $CO_2$ ).

Las principales causas que la literatura considera como áreas de oportunidad radican en la compatibilidad entre sustrato-material de reparación. Por ello, se evaluarán las características mecánicas, tales como: el módulo de Young, módulo de Poisson, resistencia a la compresión, resistencia a la compresión diametral (tensión indirecta), la determinación de ángulos de fricción interna y cohesión.

# Capítulo 2

## 2. Antecedentes

Courard y colaboradores (Courard, Piotrowski, & Garbacz, 2014) encontraron que dentro de los principales procesos de reparación a una estructura de concreto se encuentran los denominados reparaciones tipo parcheo. Los diversos factores que afectan la durabilidad, así como la eficiencia de una reparación están considerados en diversos grados de influencia. Conforme a estudios de Silfwerbrand se jerarquizó las cinco principales tópicos acerca de los materiales de reparación: microragrietamiento, ausencia de lechada, limpieza antes de colocación compactación y proceso de curado. Como parte del proceso constructivo, la intervención a sustratos a reparar consiste en la limpieza, remoción de la capa dañada y un aumento en la rugosidad de la superficie. Considerando los pasos anteriores, es factible que de no llevarse a cabo el procedimiento con calidad y con los cuidados necesarios, se induzcan microagrietamientos que decrezcan la calidad y resistencia del sustrato. Al presentarse discontinuidades entre los elementos en contacto es posible relacionarse con el proceso de ruptura entre la unión y el material de reparación.

Zanotti y colaboradores (Zanotti, Banthia, & Plizzari, 2014) afirman que la necesidad de conocimiento acerca de materiales de reparación con desempeño y procesos de colocación, que permitan reparaciones durables, estéticas, congruente relación costo-beneficio, posicionan a los materiales fibroreforzados como promisorios. Adicionalmente menciona que las propiedades de la interfaz entre concreto envejecido y concretos fibroreforzados está pobremente entendido. La durabilidad del concreto ha adquirido relevancia debido al alto y creciente costo de la construcción,

demolición, remplazo de estructuras deterioradas y, por último, la penalización que esta industria tiene debido a sus emisiones de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>).

Por lo anterior se pretende evaluar la implementación de microfibras de polipropileno a un mortero de reparación base cemento arena con sustitución del 20% de ceniza volante, la cual proviene de un estudio previo (Flores-Jarquín, 2014). La finalidad es reducir las retracciones en la matriz cementante, contribuyendo a menores esfuerzos en la zona de interfaz. Se pretende hacer un estudio más profundo acerca de cómo este mortero de reparación sufre modificaciones en la zona de interfaz en cuanto a su cohesión y el ángulo de fricción interna utilizando modificaciones en la prueba de cortante inclinado, el estado de esfuerzos de los propios morteros sujetos a tensión indirecta y su desempeño ante indicadores de durabilidad ligados a la carbonatación.

## 2.1. Factores que afectan la unión entre concreto envejecido y su reparación.

Estudios realizados que evalúan factores que afectan la unión entre sustrato y reparación (Zanotti et al., 2014), en cuanto a las características que afectan la resistencia de la zona de reparación enumeran las siguientes: dirección del colado, la rugosidad de la superficie, la limpieza y el estado de integridad mecánica de la zona a reparar, el contenido de humedad del sustrato al momento de reparar, la adhesión química o cohesión, el uso de agentes de unión, diseño de la mezcla y régimen de curado del material de reparación y la contracción producida traducida a cambios de volumen.

Espeche y León (Espeche & León, 2011), asumen que el mecanismo de falla se produce en la zona de interfaz entre los dos en sustrato y un material de reparación. Ocurre entre un plano de deformación y la formación del agrietamiento inicial, se origina cuando las componentes del esfuerzo normal ( $\sigma_n$ ) y el tangencial ( $\tau$ ) coinciden con la teoría de envolvente de falla de **Mohr-Coulomb** (Carol, I.; Pratt, 1997). Mencionan que se necesita de tres



parametros pára modelar un material de reparacion en una junta constructiva, necesitando la resistencia a tensión del especimen ( $f_t$ ) determinada por ejemplo de la resistencia a compresión diametral, la cohesión ( $c$ ) y la fricción interna del material ( $\phi$ ).

La evaluación cualitativa entre los mecanismos de unión entre interfaces entre viejo y nuevo concreto, es acorde con el modelo de Carol (Carol, I.; Pratt, 1997). El mecanismo de adhesión es relacionado con las fuerzas químicas actuantes a microescala, responsable de la incrustación entre las matrices reactivas de ambos materiales tanto el sustrato como el de reparación. En la Figura 11 basada de estudios realizados por Xie y colaboradores (Xie, Li, & Xiong, 2002), se conceptualizan tres capas en la zona de interfaz. En la primera capa conocida como capa de penetracion, la cual consiste principalmente de C-S-H con pequeñas cantidades de hidroxido de calcio,  $\text{Ca(OH)}_2$  formanda en la zona de interfaz entre el sustrato y los recientes constituyentes del recubrimiento sobre el sustrato. La segunda capa es mencionada como la mas debil, la cual contiene  $\text{Ca(OH)}_2$  y cristales de estringita,  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ , caracterizada como una zona altamente porosa y con constituyentes cristalinos en su mayoría orientados. La tercera capa es conocida como la capa con menos afectaciones, debido a que posee una microestructura similar a la del nuevo concreto.

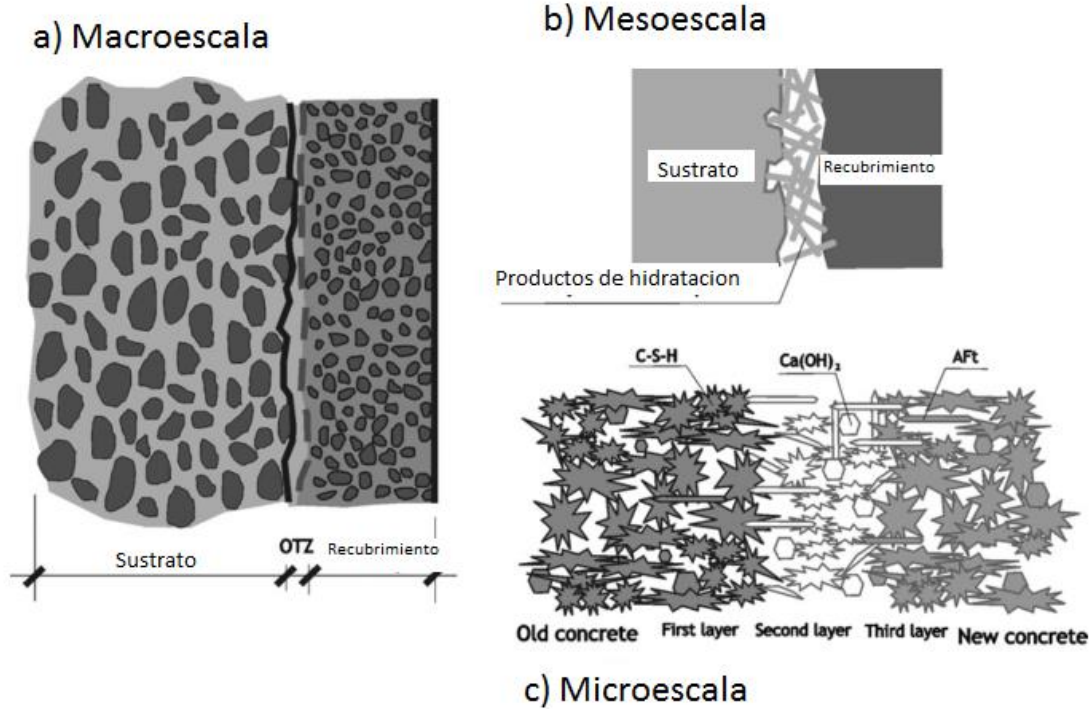


Figura 11.- Representación de la interfaz entre reparación y sustrato (Xie et al., 2002).

## 2.2. Estado de esfuerzos en zona de interfaz

La teoría de Coulomb supone que el esfuerzo normal actúa sobre un plano de falla, y además que existe una variación lineal entre el esfuerzo normal y cortante. La contribución de Mohr en la generalización de la teoría antes mencionada, fue el eliminar la hipótesis de variación lineal entre los esfuerzos en el plano crítico. Según Mohr, esa ley puede representarse por medio de una curva. Esta teoría explica satisfactoriamente varios factores básicos del comportamiento de los materiales frágiles, como rocas, concreto y suelos (Juarez Badillo, Eulalio; Rico Rodriguez, 1969).

Utilizando los criterios de falla de Mohr-Coulomb algunos investigadores (Banthia, Zanotti, & Sappakittipakorn, 2014; Diab, Abd Elmoaty, & Tag Eldin, 2017; Wang, Banthia, & Zhang, 2012) han evaluado la contribución de fibras en la adherencia entre concretos a sustratos ya envejecidos, entre las fibras

evaluadas se encuentran las de polivinil alcohol y polipropileno. Banthia y colaboradores (Banthia et al., 2014; Zanotti & Randl, 2019), realizaron experimentación para determinar los factores relevantes en la adherencia de concreto de reparación y el sustrato, utilizando especímenes con configuraciones que se muestran en la Figura 12, dichas dimensiones fueron consideradas para esta investigación, solo que los elementos cilindricos fueron propuestos como elementos prismáticos. Utilizando diversos planos de falla, y mediante los conceptos de esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y esfuerzo normal al plano ( $\sigma_n$ ) se establecieron distintos estados de esfuerzo mediante los criterios de Mohr-Coulomb. De dicha información se extrae el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y la cohesión ( $c$ ). Se entiende que el ángulo de fricción se determina como el ángulo que se desarrolla en la línea envolvente (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), es decir, es el ángulo de la pendiente de la línea de la envolvente, y la cohesión se determina cuando el esfuerzo normal al plano oblicuo es cero o definido como la plasticidad del concreto en un estado de cortante puro (Espeche & León, 2011).

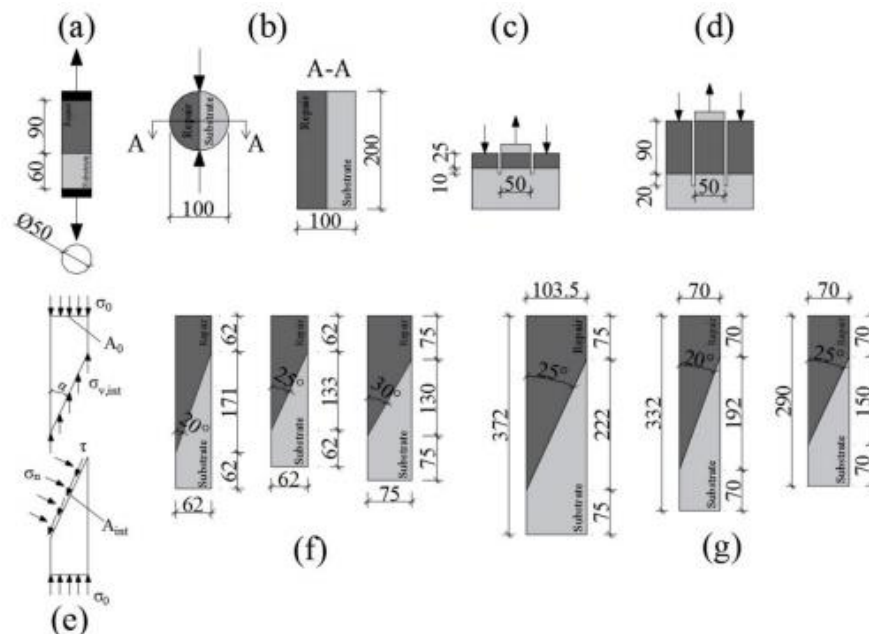


Figura 12.- Prototipos de especímenes cilíndricos y prismáticos: a) tensión directa, b) compresión diametral (tensión indirecta), c) y d) cortante y f) y g) ensayos a cortante oblicuo, dimensiones en mm (Zanotti & Randl, 2019)

Las principales causas que la literatura considera como áreas de oportunidad radican en la compatibilidad entre sustrato-material de reparación. Por ello, se evaluarán las características mecánicas, tales como: el módulo de Young, módulo de Poisson, resistencia a la compresión, resistencia a la compresión diametral (tensión indirecta), la determinación de ángulos de fricción interna y cohesión.

Se caracterizará la materia prima y los productos: sustrato y morteros de reparación; en cuanto a sus propiedades físicas y químicas. Dentro de las propiedades físicas se contempla su densidad, granulometría, tamaño nominal de partícula, porosidad, entre otras. Para las propiedades químicas se consideran sus composiciones en óxidos y los pH's en la etapa de carbonatación.

En la actualidad se han desarrollado nuevos materiales de reparación y rehabilitación de estructuras de concreto los cuales se han dividido en tres diversas clases: materiales basadas en cemento, materiales basados en cemento con polímeros modificados y polímeros o resinas. Los investigadores no han acordado que tipo de material de reparación es el más apropiado para los distintos procedimientos de evaluación. Dentro de estas investigaciones se ha determinado que un estado de esfuerzos, donde se encuentre esfuerzos cortantes y esfuerzos a compresión, simulan un estado real de tensión experimentado en materiales de reparación en servicio. En cuanto a la compatibilidad, los investigadores han sugerido, que es el factor más importante, ya que los cambios de volumen, debido a la contracción y expansión térmica con el cambio de humedad y temperatura, pueden resultar en un alto esfuerzo en la interfaz entre el material de reparación y el sustrato de concreto. Particularmente, la tensión puede ser lo suficientemente alta como para ser mayor que la resistencia de unión cuando hay gran diferencia en la capacidad de deformación entre el material de reparación y el concreto. En la actualidad, la compatibilidad se evalúa usualmente utilizando métodos

de ensayo comunes para medir la resistencia de la unión y la permeabilidad, por citar algunos.

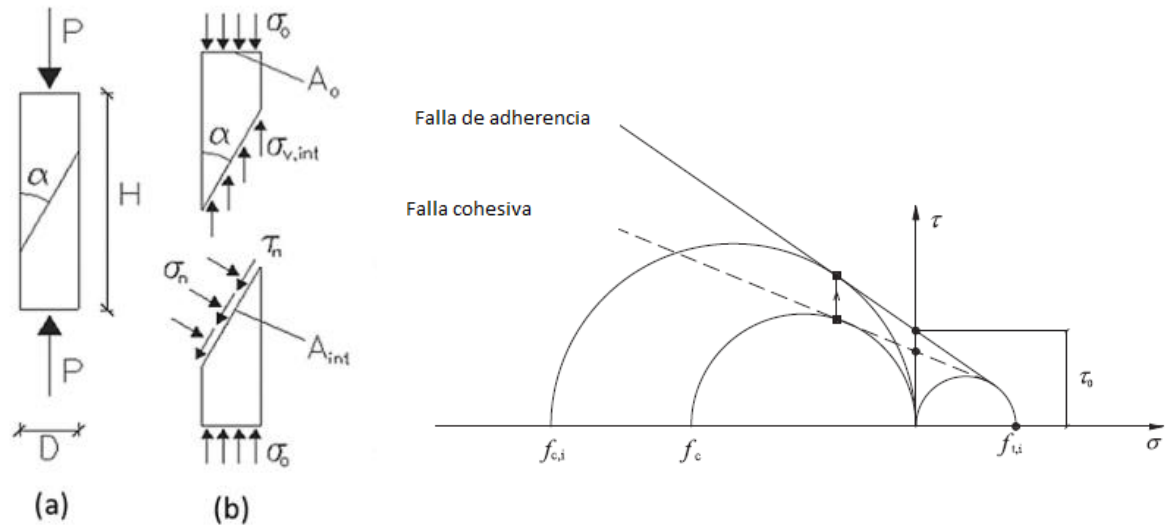


Figura 13.- Estados de Esfuerzo internos en un elemento con angulo preferencial y envolventes de falla (Zanotti, Rostagno, & Tingley, 2018)

# Capítulo 3

## 3. Planteamiento del problema, hipótesis y objetivos

### 3.1. Planteamiento del problema

El concreto es uno de los materiales de la construcción más usados en el planeta, sin embargo, su deterioro o daño por la interacción con el medio ambiente disminuye su vida útil, traducido a una disminución de servicialidad y seguridad en su infraestructura. Esto primordialmente por la falta de mantenimiento y la combinación de los siguientes factores: el uso de materiales de la construcción no durables, exposición a ambientes agresivos, pobres prácticas de construcción, incrementos de cargas y cambio climático (Castro-Borges & Mendoza-Rangel, 2010; Zanotti et al., 2014). Actividades como la reparación y la rehabilitación se han manifestado en aumento y generalizado a más países (Banthia et al., 2014). El concreto dañado o deteriorado debe ser removido, y reemplazado por concreto nuevo o materiales de reparación (Qian, You, Wang, Wang, & Jia, 2014). Los esfuerzos son dirigidos en desarrollar materiales sustentables y tecnológicamente apropiados para una colocación que pueda producir reparaciones de larga duración.

Investigaciones con morteros y concretos de reparación que contienen cementantes suplementarios han demostrado que al implementarse fibras de polipropileno el comportamiento en cuanto a las retracciones ha mejorado, sin embargo, existe una falta en el conocimiento acerca de estos ante carbonatación. Recientemente se ha estudiado la adherencia de dichos materiales con los sustratos a reparar y han utilizado una variante a la prueba de cortante oblicuo, para determinar cómo los incrementos en el volumen de fibra modifican la interfaz entre el sustrato y el material de reparación.

## 3.2. Hipótesis

La adición de microfibras de polipropileno a un mortero de cemento portland con una sustitución del 20% en masa de ceniza volante, promoverá un decremento en el ángulo de fricción interna de la matriz de mortero e incrementará la cohesión en la zona de interfaz debido a la reducción de las retracciones y al refinamiento de la matriz cementante propiciado por la ceniza volante.

## 3.3. Objetivo General

Evaluar el efecto en la cohesión y fricción interna en zona de interfaz mortero-sustrato en reparaciones elaboradas con morteros de reparación tipo parcheo base cemento portland con sustituciones del 20 % en masa de ceniza volante y con adiciones de 0%,0.5% y 1% de microfibras de polipropileno, respecto a un mortero de reparación cemento arena convencional, bajo un estado de esfuerzos semejantes a solicitudes de servicio y ante la acción de CO<sub>2</sub>.

## 3.4. Objetivos Específicos

- I. Evaluar las propiedades físicas, mecánicas y químicas de las materias primas a utilizar en la elaboración de los morteros de reparación en estudio.
- II. Analizar la contribución de la adición de diferentes volúmenes de fibra de polipropileno (0%, 0.5% y 1.0%) y sustituciones en masa de ceniza volante (0%, 20%) en el comportamiento mecánico, cohesión y en parámetros de durabilidad como la profundidad de carbonatación, resistividad eléctrica.
- III. Evaluar mediante la teoría de Mohr-Coulomb, el puente de unión entre el sustrato y los morteros de reparación mediante ensayos de adherencia (ensaye a cortante con ángulo preferencial) y el estado de esfuerzos del concreto en tensión indirecta.

## Capítulo 4

### 4. Programa Experimental

#### 4.1. Equipos para caracterización

Para llevar a cabo el proceso experimental es necesario determinar las características físicas, químicas y morfológicas debido a esto, se utilizarán equipos disponibles en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Las caracterizaciones se realizaron los Laboratorios de Materiales e innovación de la propia institución antes mencionada.

##### 4.1.2. Distribución de tamaño de partícula (DTP)

Se obtuvo la distribución del tamaño de partículas (DTP) utilizando el analizador de difracción láser de la marca Microtrac S3500. Mediante este equipo se determina el tamaño como la distribución de tamaños nominales de las partículas.

##### 4.1.3. Microscopio Electrónico de Barrido

La Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, siglas en inglés) fue utilizada para conocer características morfológicas de los materiales. Consiste en un haz de electrones incide sobre el material generando electrones secundarios y electrones retro dispersados. El equipo utilizado fue un microscópico electrónico modelo JEOL JSM-6490LV. En conjunto con el SEM, se realizó la Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS, siglas en inglés) para identificar la composición elemental de las partículas observadas en las microscopías.



#### 4.1.4. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Se utilizó esta técnica para determinar la composición química en forma de óxidos. En la técnica las muestras son bombardeadas con protones de alta energía en forma de rayos X, que desplazan los electrones de capas internas del átomo, haciendo que los electrones externos ocupen los sitios vacantes emitiendo una radiación característica del elemento. El equipo utilizado en esta técnica fue uno del modelo Epsilon 3 de PANalytical (*Figura 14*).



Figura 14.- Equipo de FRX

#### 4.1.5. Cámara de Carbonatación

Las muestras de mortero que están sujetas al dióxido de carbono, agente de deterioro de interés para este desarrollo experimental. Se emplea una cámara de carbonatación acelerada marca Fisher modelo ISOTEMP 40369. Dicho dispositivo permite mantener la concentración de CO<sub>2</sub> en su interior a la concentración de 4%, la humedad relativa entre 60-70% y una temperatura constante de 30° C. Para la determinación de la profundidad de carbonatación se elaboraron piezas prismáticas de mortero para las 4 mezclas con dimensiones 5 x 5 x 25 cm.



Figura 15.- Cámara de carbonatación acelerada

## 4.2. Materiales y métodos

### 4.2.1. Cemento

Se utilizó cemento portland ordinario (CPO) de acuerdo con la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCCE-2017 (ONNCCCE, 2017), de la marca Moctezuma. La composición química se presentará en Tabla 2. La densidad relativa del cemento fue de  $3.17 \text{ gr/cm}^3$ , acorde a ASTM-C188 (ASTM, 1985) y mediante el uso de un picnómetro como el que se muestra en la Figura 16.



Figura 16.- Picnómetro para determinar densidad de los cementantes.

#### 4.2.2. Ceniza Volante

La ceniza volante que se utiliza proviene de la planta carboeléctrica, José López Portillo, de la comunidad de Nava, Coahuila. Su composición química fue determinada antes y después de su cribado. La Figura 17 muestra el tratamiento mecánico utilizado fue tamizado por la malla No. 100, con una abertura de 150 $\mu$ m, teniendo la finalidad de reducir los tamaños de las partículas e incrementar el índice de actividad puzolánica de la ceniza volante. Por medio del Equipo Microtrac se ha caracterizado la distribución de tamaños de las partículas (

) que constituyen las muestras de ceniza, siendo reportado un tamaño promedio de partícula de 95.71 $\mu$ m y luego del tratamiento mecánico, se logró un tamaño promedio de 69.64  $\mu$ m. En la Figura 19, se ilustra las muestras de ceniza volante utilizada, antes y después de un tratamiento mecánico (cribado por la malla 100), las partículas de ceniza volante cuentan con la forma típica de cenosfera, no obstante antes del proceso de cribado, se apreciaban partículas porosas, las cuales fueron evaluadas mediante el equipo de EDS del microscopio electrónico con lo que las cantidades de Carbono presente en

primera instancia (Figura 20), lo que hizo factible el cribado y remoción de dichas partículas, este procedimiento fue corroborado por pruebas subsecuentes como pruebas adicionales de MEB-EDS, Florescencia de Rayos X y Pruebas de Ignición.



Figura 17.- Muestra de ceniza volante y posterior cribado por malla #100

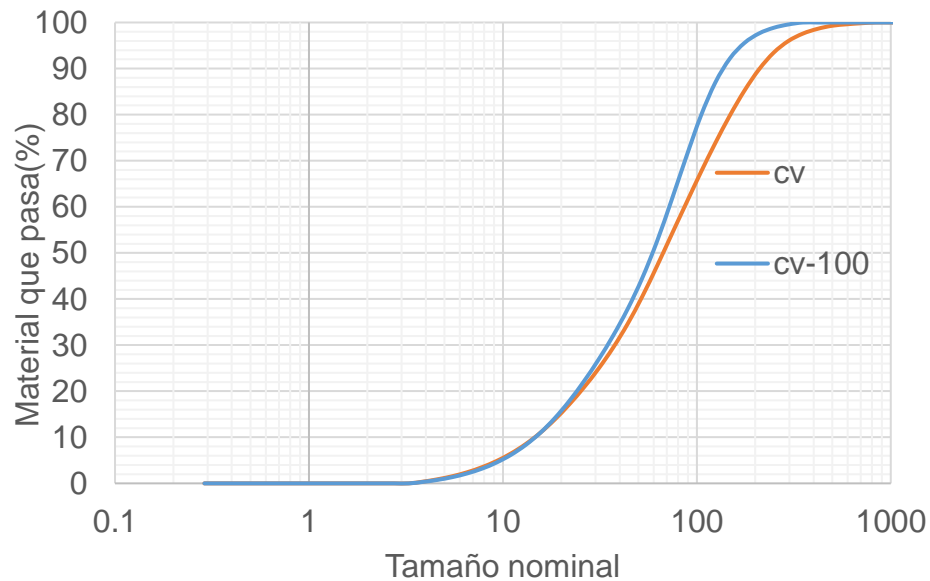


Figura 18.- Distribución del tamaño de partículas de la ceniza volante antes y después del cribado mecánico (DTP)

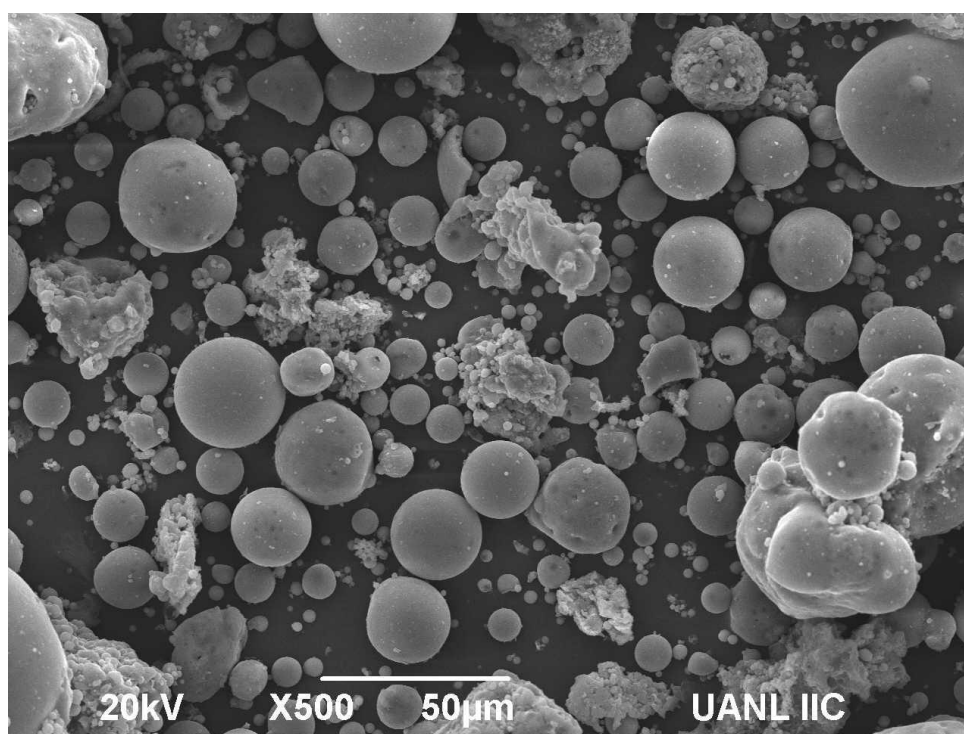
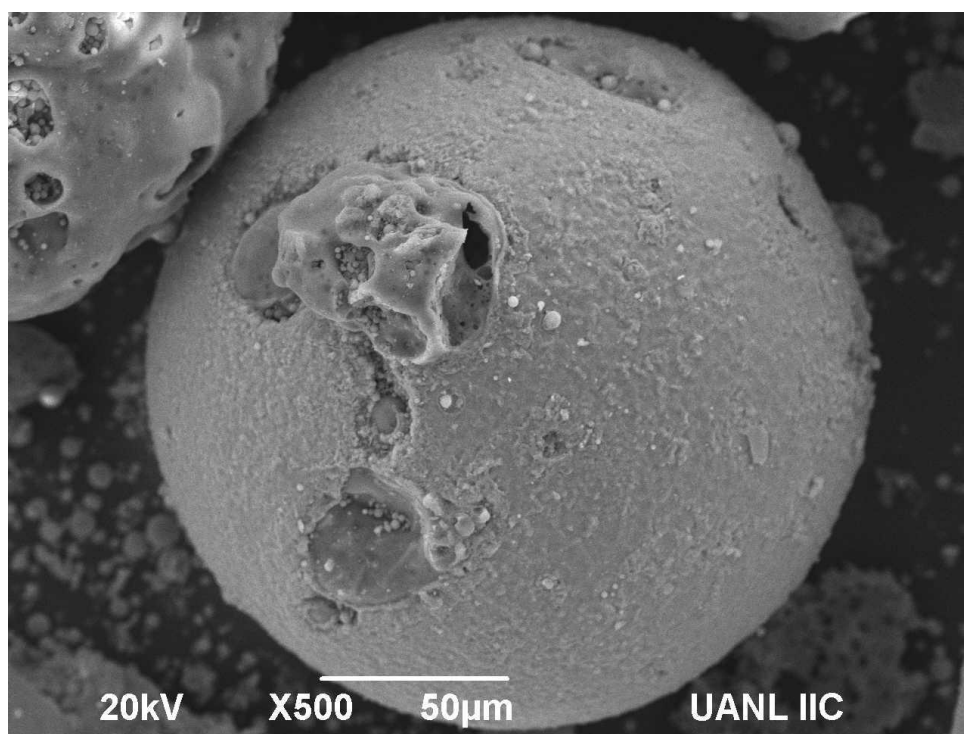
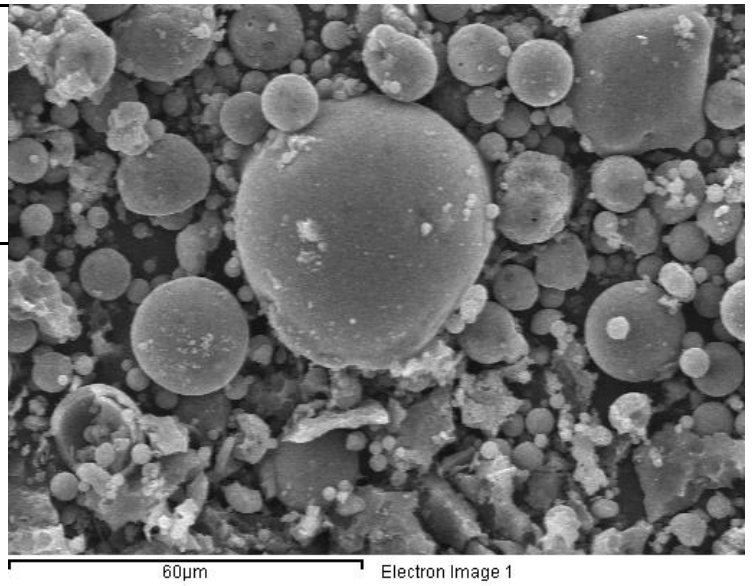


Figura 19.- Micrografía de ceniza volante sin cribado mecánico (arriba) y Ceniza CV100 luego de cribado mecánico por malla #100 (abajo)

Elemento	Peso%	Atomico %	Comp%	Formula
C K	19.99	26.44	73.24	CO2
Al K	4.47	2.63	8.45	Al2O3
Si K	7.95	4.50	17.00	SiO2
K K	0.40	0.16	0.48	K2O
Fe K	0.64	0.18	0.83	FeO
O	66.55	66.09		
<b>Total</b>	<b>100.00</b>			



Elemento	Peso%	Atomic%	Compd%	Formula
C K	15.60	21.73	57.16	CO2
Al K	4.88	3.03	9.23	Al2O3
Si K	14.62	8.71	31.28	SiO2
K K	0.34	0.14	0.41	K2O
Fe K	1.50	0.45	1.93	FeO
O	63.06	65.94		
<b>Total</b>	<b>100.00</b>			



Figura 20.- Muestra de ceniza volante vista en MEB-EDS sin cribado (arriba) y después de cribado por malla 100 (abajo).

Tabla 2.- Composición química de cemento CPO 40 y ceniza volante antes y después de cribado por malla No.100 (150um)

Composición química en masa (%)	CPO 40	CV	CV-100
SiO <sub>2</sub>	17.66	69.382	69.719
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.72	19.57	19.636
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.26	4.948	4.728
CaO	63.68	1.226	1.774
MgO	1.2	0.582	0.588
SO <sub>3</sub>	5.12	0.551	0.534
Na <sub>2</sub> O	0.66	0.219	0.225
K <sub>2</sub> O	0.74	1.553	1.486
TiO <sub>2</sub>	0.24	1.068	1.027
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	-	-
MnO	0.08	-	-
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	93.9	94.08

La clasificación asignada ambas cenizas volantes fue clase F, siendo que la suma de los componentes en masa de los compuestos mostrado en Tabla 6, SiO<sub>2</sub>+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> son mayores al 70%, acorde a ASTM C 618 (Duran-Herrera, Juarez, Valdez, & Bentz, 2011).

La pérdida por ignición estima la cantidad de carbón sin quemar presente en la ceniza volante. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra que la ceniza volante antes de ser cribada (CV) tuvo una pérdida por ignición de 4.8%, mientras la ceniza volante cribada por la malla No. 100 (CV 100) presentó una pérdida de 3.1%, por lo cual el cribado redujo en aproximadamente 3.5% la pérdida por ignición.

Tabla 3.- Perdida por ignición

<b>Material</b>	<b>Masa pérdida a 950°C (gr) A</b>	<b>Masa de material seco (gr) B</b>	<b>LOI%= 100(A/B)</b>
<b>CV</b>	0.048	1.0	4.8%
<b>CV 100</b>	0.031	1.0	3.1%

Se evalúa el índice de actividad puzolánica de la ceniza volante, después de un tratamiento de cribado por la malla No. 100 (150um) denominada M1-CV100, referente a ASTM C 618, los resultados se muestran a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4.- Índice de Resistencia para ceniza con tratamiento de cribado por malla No. 100.

	<b>Resistencia a compresión (MPa)</b>		<b>Índice de Resistencia (IR%)</b>	
	7 días	28 días	7 días	28 días
Mezcla				
<b>MREF</b>	43	46	94	100
<b>M1</b>	30	32	66	71
<b>M1-CV100</b>	32	36	71	78

#### 4.2.3. Agua

El agua fue potable, conforme a ASTM C 1609. Esta agua fue utilizada tanto para el curado como agua de reacción en la elaboración de los sustratos y los morteros de reparación, con relaciones agua/ cementantes de 0.70 y 0.55, respectivamente.



#### 4.2.4. Agregados pétreos

Según ASTM C33, se utiliza arena caliza con un Módulo de Finura de 2.66, densidad seca de 2.7 g/cm<sup>3</sup> y absorción de 2.04%. En la *Figura 21* se muestra la granulometría de la arena utilizada para la elaboración de todos los morteros de esta investigación, se aprecia que la fracción de tamaños que se retienen en la malla No. 100 salen de los límites que dicta la normativa.

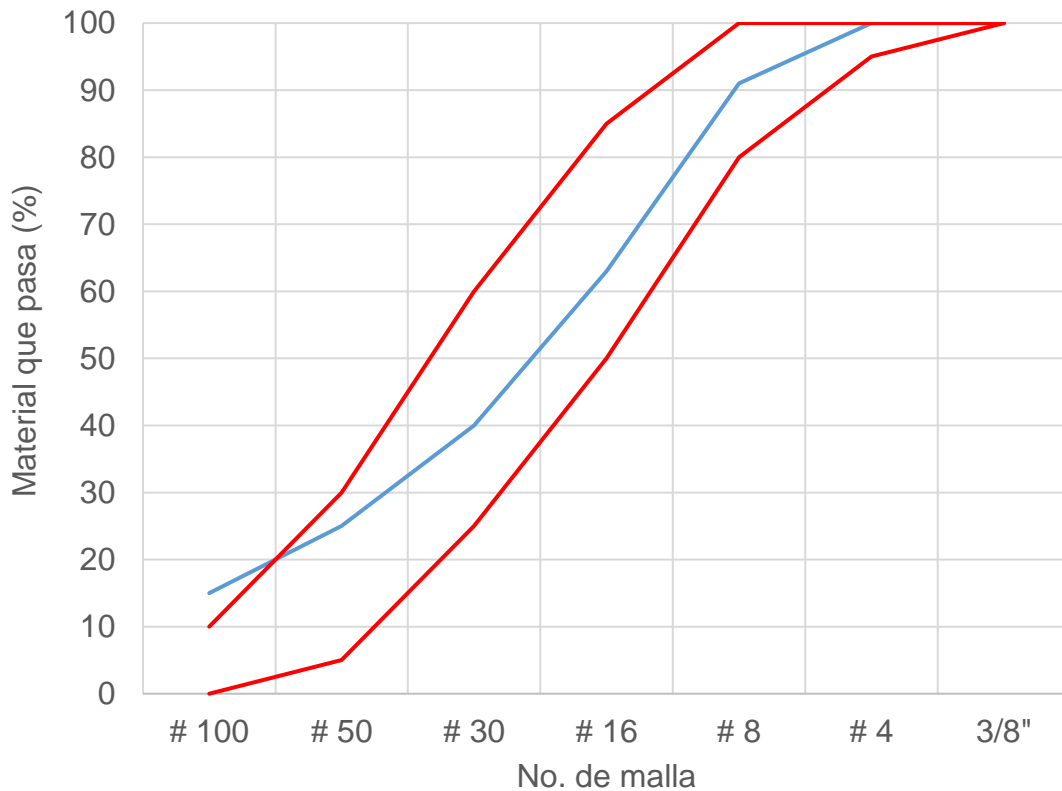


Figura 21.- Granulometría del agregado fino

#### 4.2.5. Superplastificante

El aditivo superplastificante (SP) de la familia de los carboxilatos, se denomina Precast Plus de la marca Eucomex. Se determinó su densidad en 1.09 g/cm<sup>3</sup>, con un porcentaje de sólidos del 43%. Este aditivo fue necesario para proporcionar a los morteros de una fluidez de 110 +/- 5%.

#### 4.2.6. Fibras

Las fibras de poliméricas son de polipropileno virgen con una longitud de 6 mm, de la marca Forte. La densidad relativa es de 0.91 g/cm<sup>3</sup>. La resistencia a la tensión es de entre 571 MPa (Figura 22). La Tabla 5, ilustra los datos técnicos de las microfibras a utilizar, nótese que el fabricante menciona el valor bajo de conductividad eléctrica que posee y no posee absorción alguna.



Figura 22.- Microfibras de la marca Forte.

Tabla 5.- Datos técnicos de la microfibra Fiberforte 400

Datos	
Material:	polipropileno
Corte:	6 mm
Forma:	mono-filamento
Color:	brillante
Aditivos:	dispersante
Resistencia al ácido:	alta
Resistencia a la salinidad:	alta
Conductividad eléctrica:	baja
Absorción	cero
Punto de fusión:	160-170°C
Punto de Ignición:	590°C

### 4.3. Elaboración de especímenes para adherencia.

La Figura 23 muestra parte de la elaboración de las cimbras donde posteriormente se colaron los sustratos de concreto que se repararían con los diversos morteros. La razón de la fabricación de dichas cimbras fue para satisfacer la necesidad de fabricar el número suficiente de sustratos los cuales por motivos de experimentación fueron amasados y colocados con las mismas condiciones de humedad, mezclado, energía de compactación y curado.

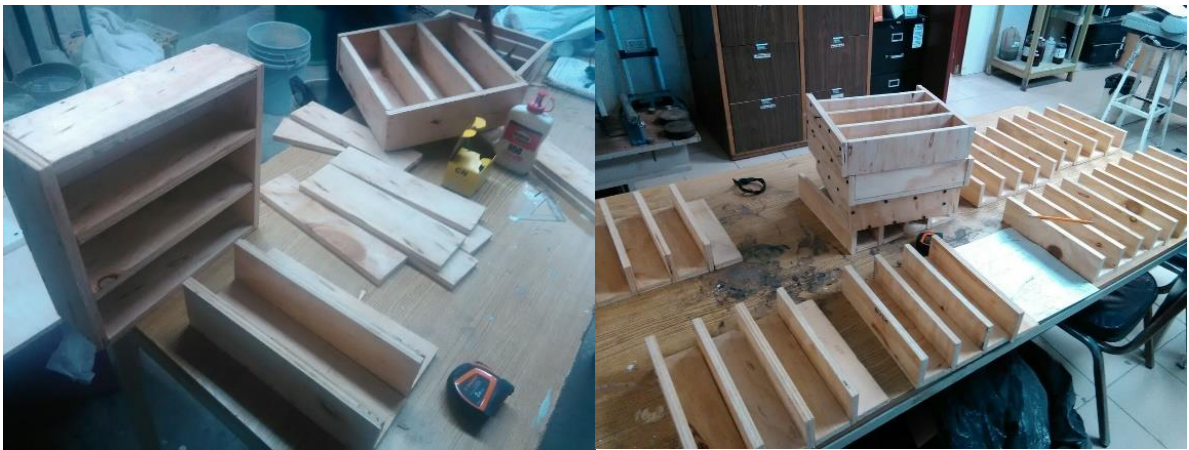


Figura 23.-Proceso de elaboración de cimbras.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se aprecia parte de la elaboración de los sustratos de concreto. El diseño de mezclas fue acorde a ACI 211.1 (ACI, 1997), el muestreo, determinación de revenimiento, densidad y contenido de aire por método de presión, fueron realizadas conforme la normativa ASTM C173, ASTM C138 C231 (ACI, 2017). En cuanto a la colocación de los especímenes en los moldes los cuales fueron previamente sellados en sus juntas con silicón en frío, fueron llenadas en dos capas y compactadas en una mesa vibratoria en periodos de 15 s. La mezcla permaneció en el cuarto de mezclas a 22.0°C, y fue desmoldado a las 24 horas. El curado se efectuó en el cuarto de curado con HR >95% a temperatura controlada.

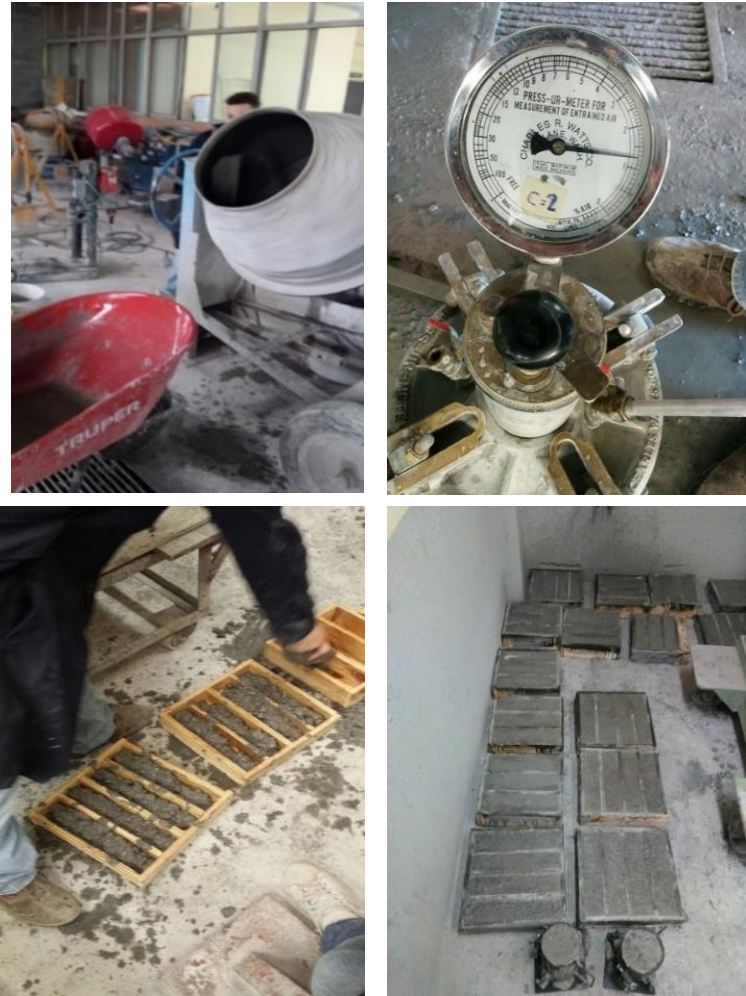


Figura 24.- Elaboración de los sustratos de concreto con a/c 0.70.

Luego de 28 días de curado, se procedió a generar planos de falla, en función de tres ángulos,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  y  $30^\circ$ . En la Figura 25, muestra como la influencia del ángulo  $\alpha$ , que se encuentran dentro del rango de 20 a 30 grados, es de menor orden que aquellos superiores a 30 grados; al momento de encontrar el ángulo de fricción interna del mortero de reparación. Mediante una sierra de corte se realizaron los planos pertinentes. El tratamiento de la superficie se realizó con un cepillo de alambre, la rugosidad solo fue evaluada de forma visual. Los

ángulos provienen de estudios relacionados con la determinación de los parámetros de cohesión y fricción interna los cuales han sugerido que en estos valores del ángulo  $\alpha$ , evitan la influencia en el ángulo de fricción y la cohesión.

La Figura 26 ejemplifica a las muestras usadas en la reparación con los ángulos preferenciales definidos en el párrafo anterior. En primer lugar, el inciso a, representa a los especímenes luego del corte con disco adiamantado. En segunda instancia, el inciso b, hace constancia del tratamiento superficial por medio de un taladro con una escobeta metálica, eso para remover todo material no adherido y, por último, el inciso c, se observa las piezas listas para su posterior reparación mediante la aplicación de los morteros de reparación que esta investigación evalúa. Zanotti y colaboradores (Zanotti et al., 2018), aseveran que superficies finas tienen a disminuir la fricción interna y aislar la cohesión, cuyo parámetro es parte de las metas de esta investigación.

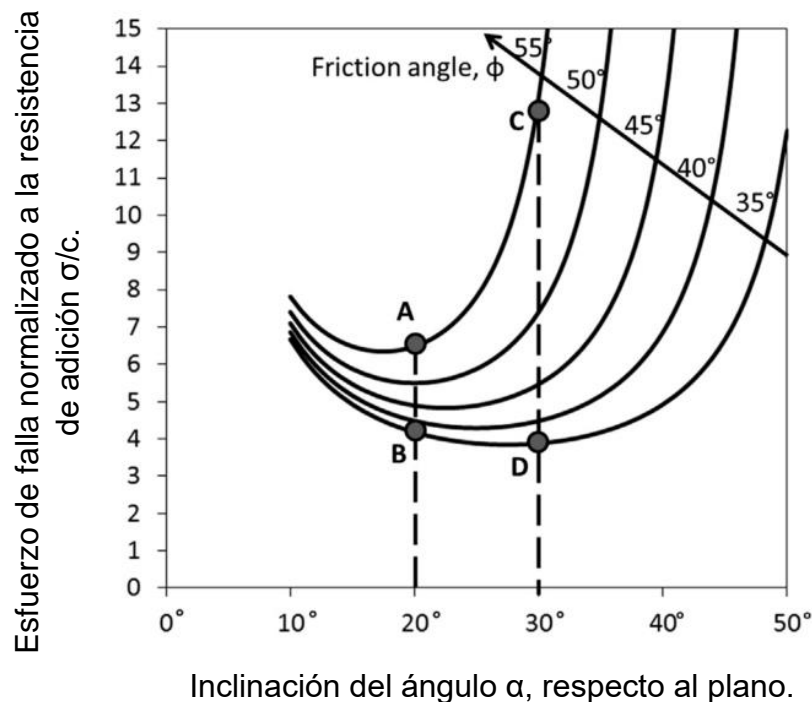


Figura 25.- Predicción de la falla del esfuerzo cortante en función de la inclinación del plano de falla y el ángulo de fricción interfacial (Banthia et al., 2014)

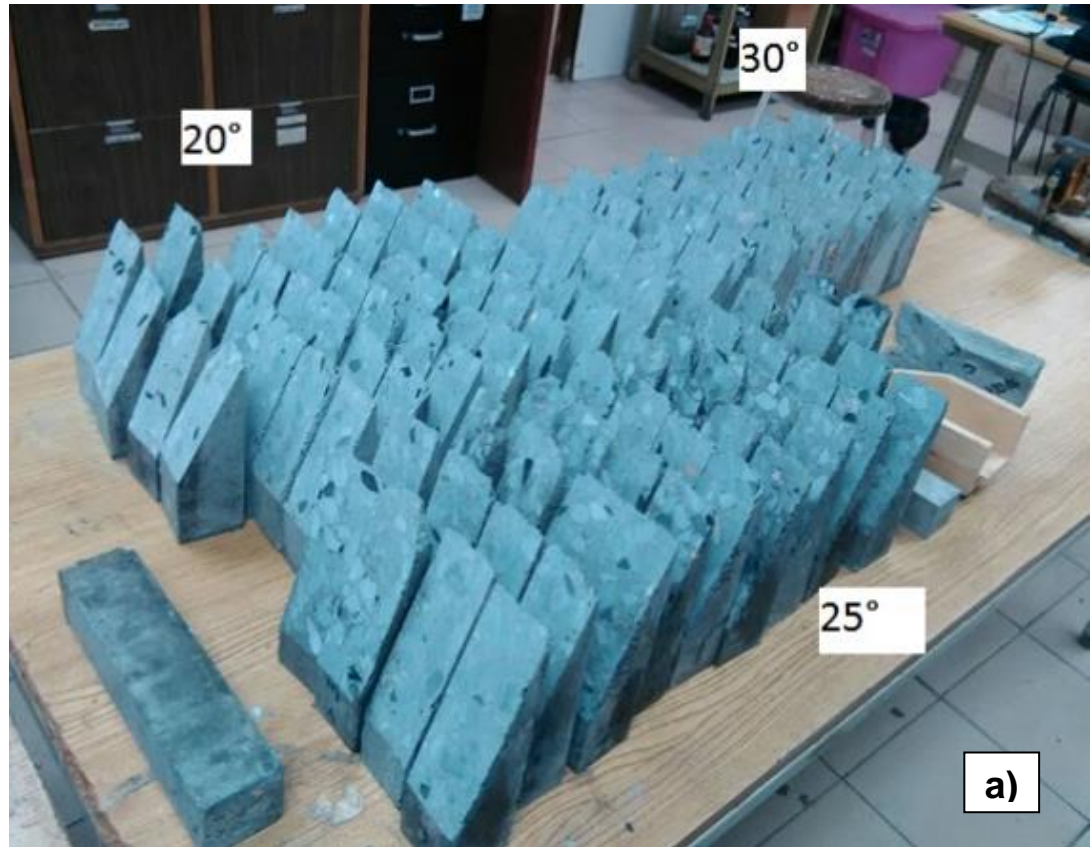


Figura 26.- a) Especímenes con los ángulos preferenciales de 20°, 25° y 30°,  
b) Equipo para limpieza superficial y c) Muestras listas para reparación

#### 4.4. Elaboración de morteros de reparación.

##### 4.4.1. Consistencia

Se determinó la consistencia de los morteros y resistencias a compresión mediante los procedimientos que la ASTM C 305 y ASTM C 109 (ASTM International, 2010) (Figura 27 y 30), esta parte del programa experimental fue necesario para evaluar la dosificación del aditivo plastificante. En este estudio se utiliza el aditivo policarboxilato comercial, con una dosificación de 5.5 c.c./kg de cemento. En la Figura 31 se muestra las resistencias a compresión de los especímenes.



Figura 27.- Moldes para especímenes a compresión.



Figura 28.- Elaboración de especímenes cúbicos para ensayos de compresión y determinación de consistencia de mezclas de mortero.

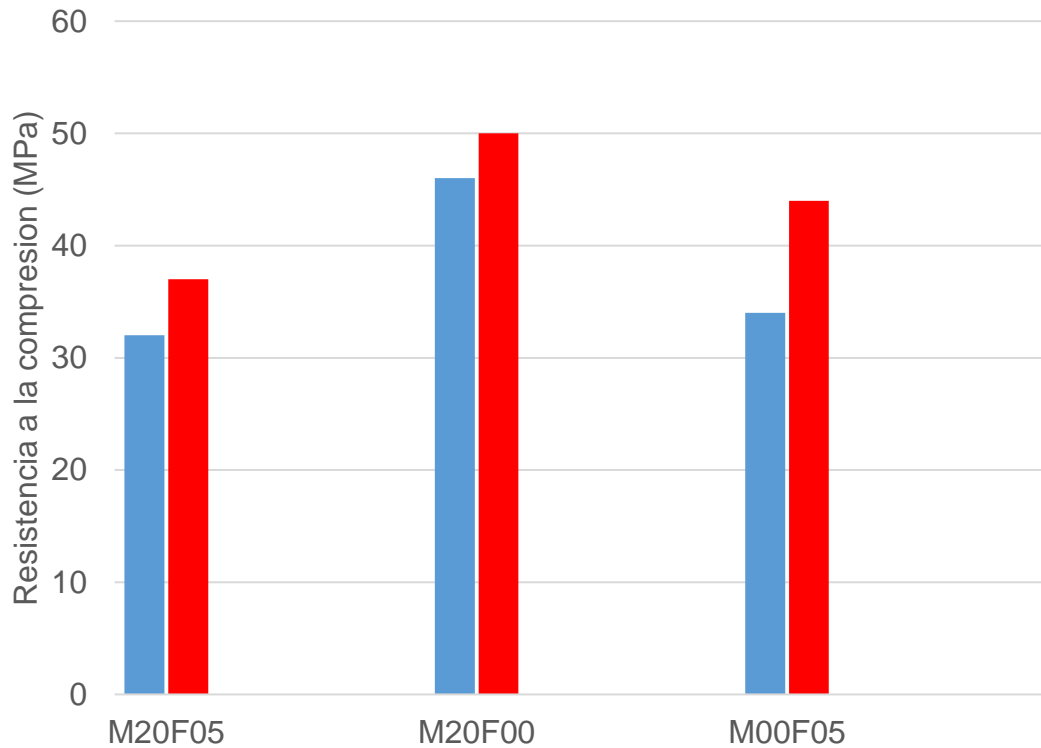


Figura 29.- Resistencias a compresión de cubos de mortero

En la Tabla 6 se presenta las dosificaciones para los distintos morteros, así como la determinación de la masa unitaria y el contenido de aire en porcentaje. La masa unitaria siguió el procedimiento mencionado en ASTM C 138, solo con la modificación de que se llenó en dos capas y fueron consolidadas 10 s por cada capa, debido a que replicaba la forma en que los morteros fueron colocados en los sustratos. El porcentaje de aire fue determinado mediante ASTM C 138 debido a la determinación del rendimiento y el volumen absoluto de sólidos presentes en cada muestra, la diferencia expresada respecto al volumen aparente expresa el contenido de aire teórico. Se fijaron los contenidos los parámetros como lo fueron agregados finos, se fijó la dosificación del aditivo superplastificante de tal manera que fuera la misma relación agua cemento para las muestras, se consideró que la cantidad de cemento debería ser mayor a  $350 \text{ kg/m}^3$ , debido a las recomendaciones de



Tabla 6.- Dosificación de Morteros de reparación con  $a/cm = 0.55$

Identificación	Cemento CPO (kg)	Ceniza volante (kg)	Agua (kg)	Arena (kg)	Fibra (kg)	SP (L)	Masa unitaria (kg/m <sup>3</sup> )	% Aire
M00F00 (MREF)	420.9	-	232.14	1617	-	2.3	2264	5.0
M00F05	420.9	-	232.14	1603	5.5	2.3	2274	7.9
M20F00	336.7	41.3	232.14	1579	-	2.3	2267	7.3
M20F05	336.7	41.3	232.14	1564	5.5	2.3	2269	7.7



Figura 30.-Procedimiento de colocación de morteros de reparación a sustratos.

### 5. Resultados y Discusión

#### 5.1. Resistencia a la compresión.

La Figura 31 ilustra los resultados de compresión de los especímenes cilíndricos de 10 x 20 cm, recordando que dichos especímenes tienen la misma energía de compactación que el resto de los especímenes dirigidos a ensayos mecánicos o indicadores de la durabilidad. Se ensayó a compresión el sustrato o concreto a reparar, el resultado fue de 20.2 MPa. La muestra de mortero, MREF o M00F00, presenta una resistencia a la compresión a edad de 28 días ( $f'_c$ ) de 45.69 MPa. Los morteros con modificaciones en cuanto la cantidad de cemento utilizado o por la implementación de microfibras de polipropileno resultaron para la misma edad, un decremento en esta característica mecánica. Se observa que la resistencia entre M20F00 y M00F05 fueron de la misma magnitud, con 31.77 MPa, es decir, con un decremento respecto a la muestra de mortero de referencia de 30.47%, sin embargo, las desviaciones estándar fueron de 0.78 y 2.85 MPa, respectivamente. La muestra que posee la sustitución del 20% en masa, así como el 0.5% del volumen resultó solo 28.96% menor a la muestra de referencia.

Al utilizarse material suplementario en sustitución en este caso ceniza volante y fibras de polipropileno, se explica el comportamiento observado planteando una redistribución de la estructura de vacíos y a la presencia de una interfaz entre fibras de polipropileno y los granos de cemento y ceniza volante (Karahhan & Atiş, 2011). Adicional al fenómeno previamente descrito, la utilización de la ceniza volante, ralentiza el desarrollo de resistencia mecánica a edades tempranas ya que su contribución se aprecia a edades superiores (>28 días) (Duran-Herrera et al., 2011; Karahan & Atiş, 2011; Nath & Sarker, 2011).

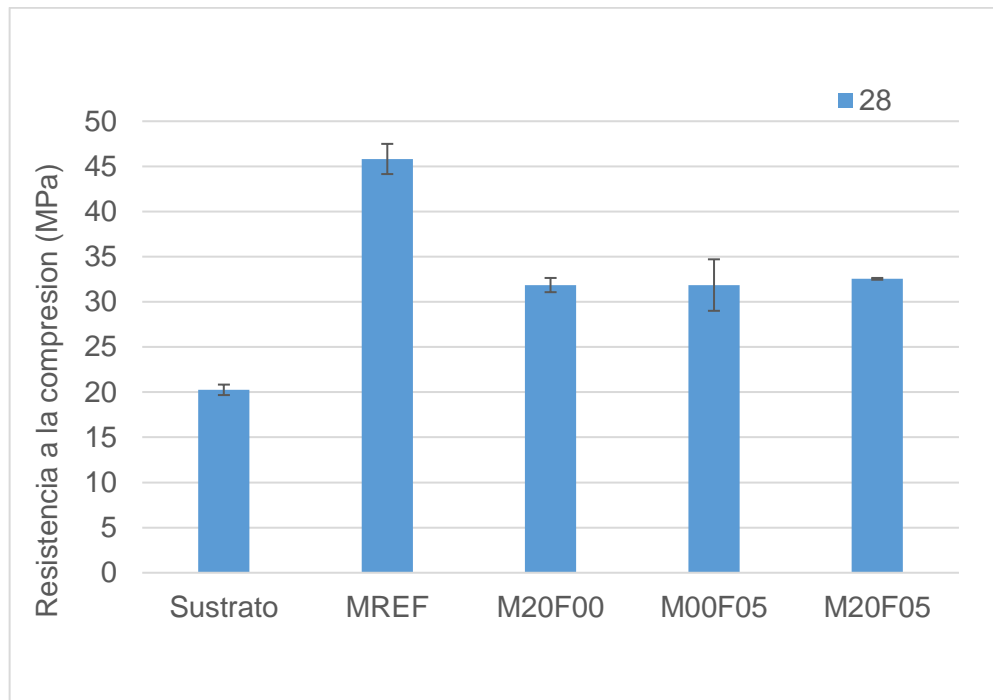


Figura 31.- Resistencia a la compresión de sustrato y morteros (28 días).

## 5.2. Resistencia a la compresión diametral

Se utiliza el ensaye de tensión indirecta denominado ensaye a compresión diametral o ensaye brasileño para determinar la resistencia a tensión de los morteros. La prueba consiste en la aplicación de carga lineal diametral sobre un espécimen, como se muestra en Figura 32 y 33 (a). La carga es aplicada sobre triplay de 3 mm de espesor, el material se considera dentro de la teoría elástica, este sufre un esfuerzo uniforme sobre el plano de carga diametral, sobre todo esfuerzos de tensión en el centro del espécimen (b). La resistencia a compresión diametral se determina mediante la ftb

$$= \frac{2P}{2\pi dL}$$

Ecuación 2.

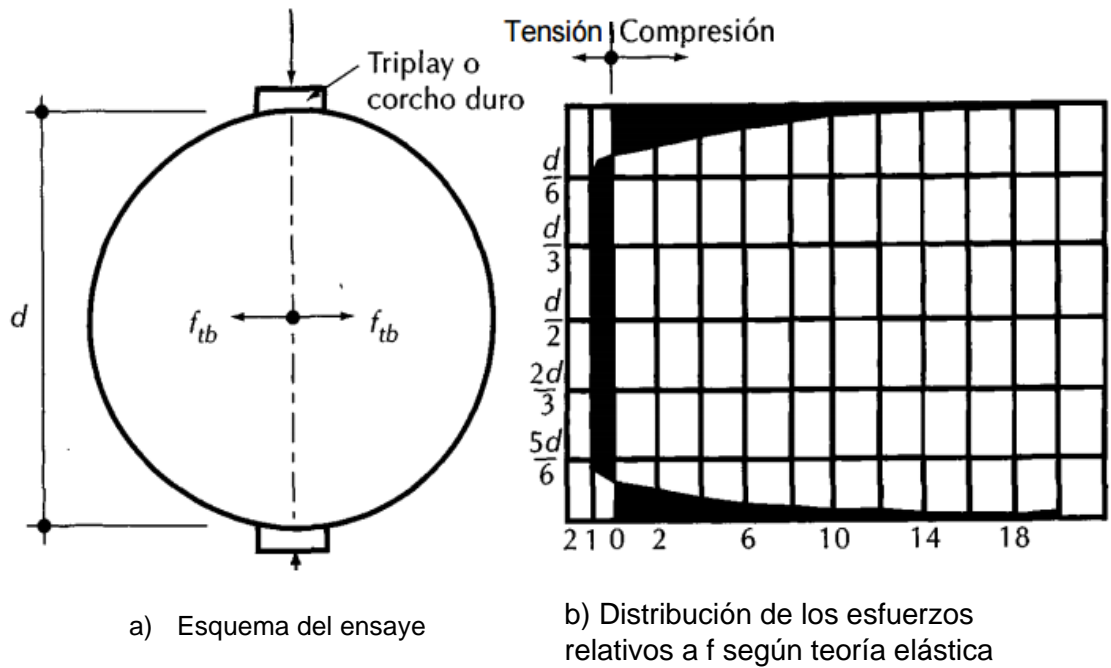


Figura 32.-Distribución de esfuerzos y tipo de carga en tensión indirecta (González Cuevas & Robles, 2005).

$$f_{tb} = \frac{2P}{2\pi dL}$$

Ecuación 2

Donde:

P es igual a la carga máxima de ruptura

d es el diámetro del cilindro

L la longitud de apoyo en el cilindro



Figura 33.- Ensayo a compresión diametral y grieta en zona de tensión máxima.

Se presentan los resultados de la resistencia a tensión indirecta acorde a ASTM C 496 (Figura 33). La información que estos resultados proporcionaron fueron la base para la creación de los círculos de Mohr, del estado de esfuerzos en tensión del concreto. Mehta (Mehta, 1988) asevera que la resistencia tensión/compresión depende del nivel general de la resistencia a la compresión; a resistencia a la compresión más alta, la relación será más baja. Afirma que la resistencia tensión/ compresión es del orden del 10 al 11% para concretos de baja resistencia. En la Figura 35, se aprecia que al aumentar la resistencia a compresión el valor porcentual de la relación entre resistencia a tensión/ compresión era más baja que en los casos donde las resistencias del concreto a compresión eran menores, concordando con la literatura, así como, que el orden de los valores reportados están dentro de los valores reportados.

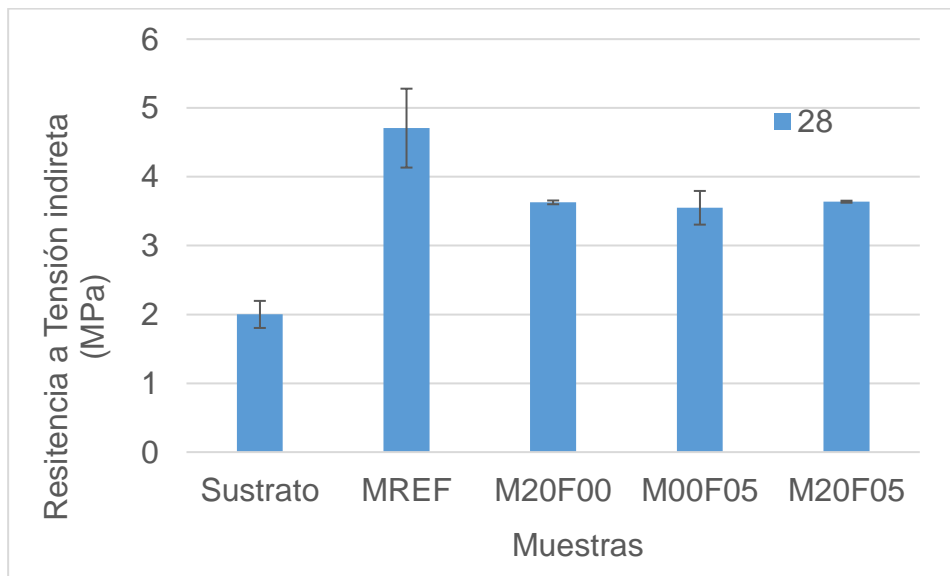


Figura 34.- Resultados de resistencia a compresión diametral a sustrato y morteros a edad de 28 días.

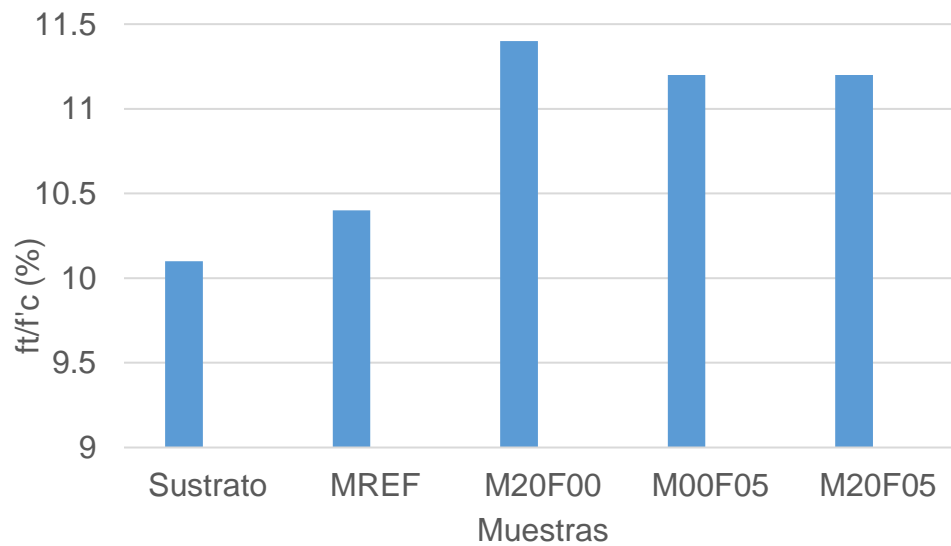


Figura 35.- Relación porcentual entre Resistencia a compresión diametral vs Resistencia a la compresión axial.

### 5.3. Módulo de Elasticidad

El módulo secante fue determinado a partir de ASTM C 494. El módulo de elasticidad fue determinado con aros de deformación, dicho equipo utiliza dos micrómetros de la marca Mutitoyo® con una corrida de ¼" y una precisión de 0.001 mm. La resistencia a la compresión determina el valor de la compresión última  $\sigma_u$ , usando este parámetro para cada muestra. La Figura 36 muestra la instrumentación a las muestras cilíndricas previamente con refrentado de mortero de azufre. En la Figura 36 se observa la curva esfuerzo deformación de todos los morteros. La Ecuación 3, obtiene el módulo elástico secante (E),  $\sigma_{40}$  es el 40% de la resistencia última,  $\sigma_{0.000050}$  es aquel que le corresponde a la resistencia a la compresión para una deformación unitaria de 0.000050 (mm/mm). Por otro lado, las deformaciones unitarias corresponden a  $\varepsilon_{40}$ , siendo la deformación unitaria correspondiente al  $\sigma_{40}$  y  $\varepsilon_{0.000050}$ , es una deformación establecida en la normativa.

$$E = \frac{\sigma_{40} - \sigma_{0.000050}}{\varepsilon_{40} - \varepsilon_{0.000050}} \quad \text{Ecuación 3}$$

La relación de Poisson ( $\nu$ ) se define como la relación entre deformaciones unitarias transversales entre las deformaciones unitarias longitudinales (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2009). La Tabla 7, tanto de módulo secante de elasticidad y relación de Poisson. Se aprecia que los valores son muy uniformes y que la muestra de referencia (MREF) cuenta con menor relación de Poisson, es decir, es menos deformable. Los valores de los módulos de elasticidad están en el orden de los 200000 kg/cm<sup>2</sup>.

$$\nu = \frac{\varepsilon \text{ transversales}}{\varepsilon \text{ longitudinales}} \quad \text{Ecuación 4}$$

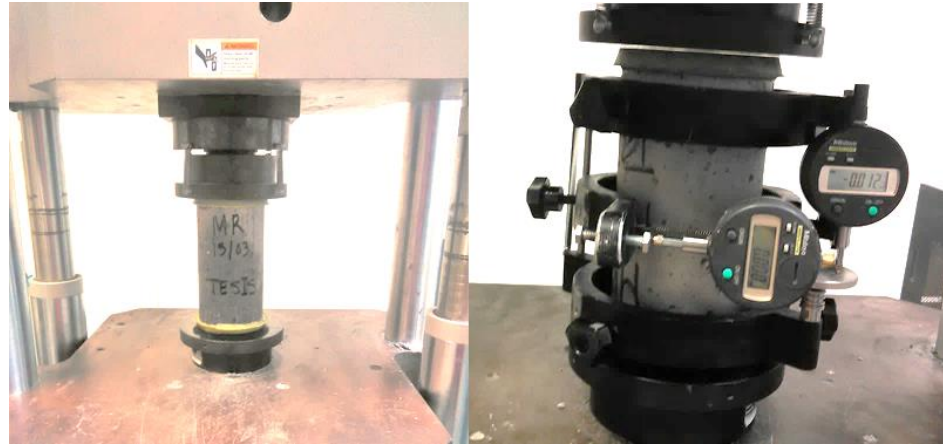


Figura 36.- Ensaye a compresión e instrumentación para determinación de la curva esfuerzo deformación

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** ilustra el valor de  $K_e$ , es decir, la constante que proporciona la igualdad entre el producto de el parámetro de la raíz de la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad secante  $E = K_e \sqrt{\sigma_u}$  (Ecuación 5). Los valores que se obtuvieron experimentalmente difieren con la  $K_e$  comúnmente utilizada en los manuales de diseño es 15000, siendo que los valores están en el orden de 10000 y 12500.

$$E = K_e \sqrt{\sigma_u} \quad \text{Ecuación 5}$$

Karahan y colaboradores (Karahán & Atiş, 2011) han discutido sobre concretos con sustituciones de ceniza volante entre el 15% y 30%, atribuyendo que el módulo elástico secante de muestras control con solo cemento Portland son similares. El efecto de utilizar fibras de polipropileno en valores de 0.05% incrementa ligeramente el módulo elástico, sin embargo, para valores por encima de 0.20%, puede apreciarse una disminución del módulo elástico. Puertas et al (Puertas, Amat, Fernández-Jiménez, & Vázquez, 2003) expresan que respecto, a la resistencia a compresión y al módulo de elasticidad, no hay un aporte positivo significativo aportado por la adición de fibras de polipropileno. Dicha discusión es acorde a los resultados obtenidos y adicional a ello, según la *Tabla 7*, el módulo de Poisson creció en el orden de 5.88%, es



decir, es más deformable al utilizar esta sustitución y la adición de microfibras de polipropileno.

Tabla 7.- Módulos de Elasticidad y Poisson.

Muestra	Módulos Elásticos (GPa)	Módulo de Poisson
Sustrato	19.42	0.17
M00F00	20.95	0.17
M00F05	20.34	0.18
M20F00	20.34	0.18
M20F05	20.49	0.18

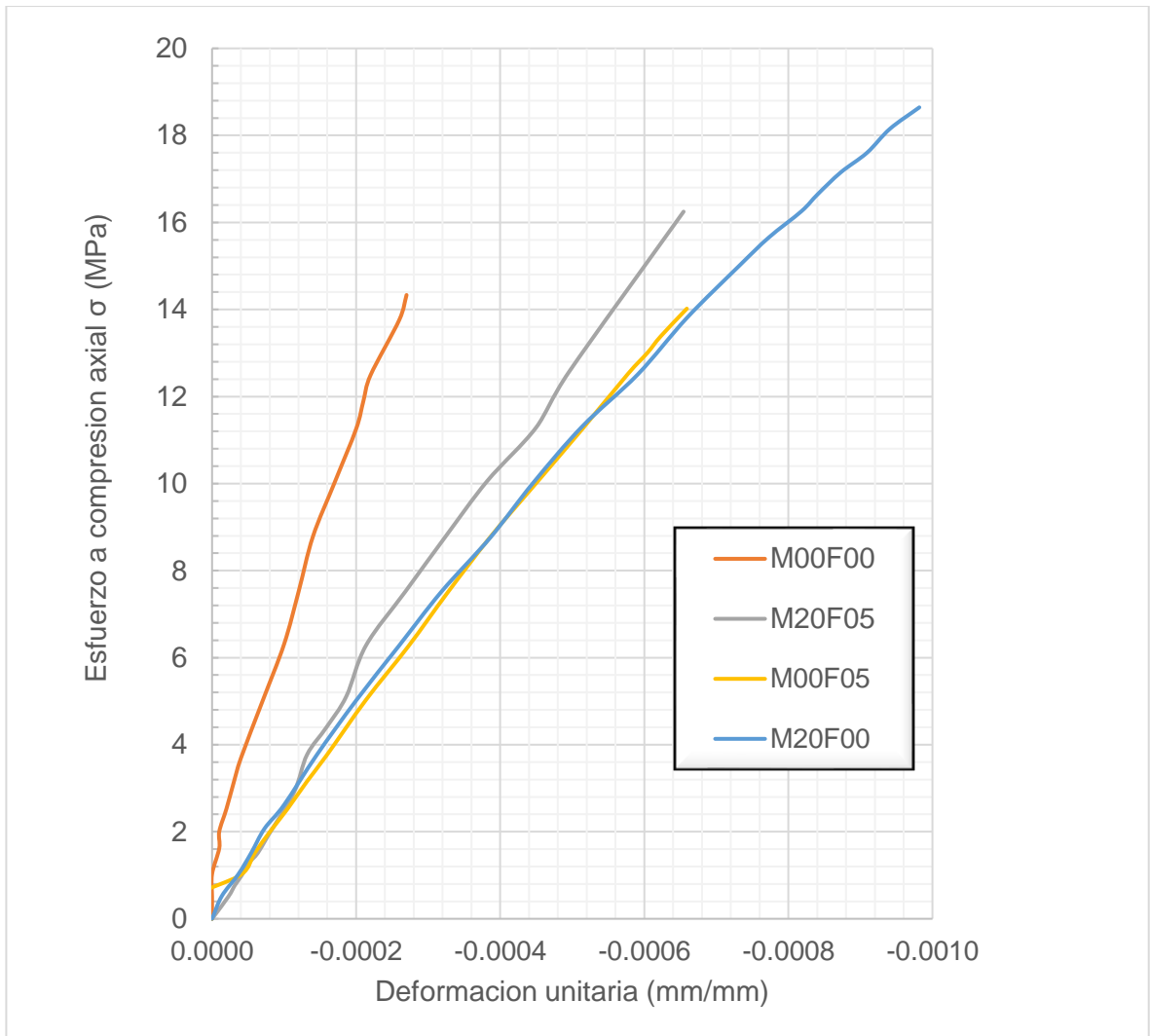


Figura 37.- Curvas Esfuerzo Deformación de los morteros evaluados.

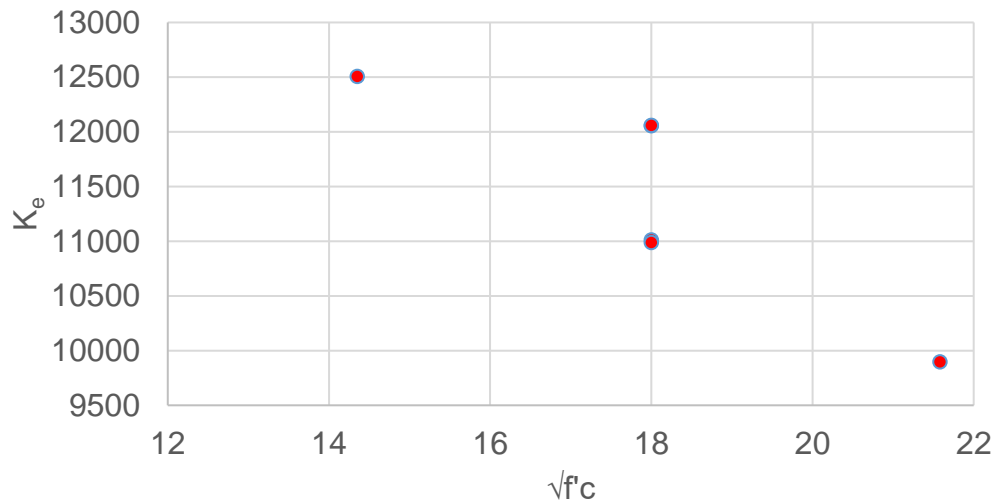


Figura 38.- Relación entre la raíz cuadrada de  $f'c$  vs la constante  $K_e$ .

#### 5.4. Esfuerzo oblicuo: Adherencia, ángulo de fricción interna y cohesión.

##### 5.4.1. Fricción interna de la arena caliza.

La prueba de corte directo es determinada en laboratorio mediante un marco de carga como el que aparece en la Figura 39. El equipo consta de una caja de corte metálica que comúnmente esta empotrada al marco de ensaye. La muestra de suelo se somete a diversos estados de esfuerzos normales y cortantes, controladas por el deslizamiento de las masas de suelo tal como se observa en la Figura 40.

Se determina el ángulo de fricción interna del agregado fino utilizado en los morteros y el sustrato. Se evaluaron tres esfuerzos normales y se registró la respuesta del suelo, sujeto a corte directo. Se observa un incremento en la carga vertical para alcanzar similares niveles de desplazamiento. En este caso se seleccionó el esfuerzo cortante que corresponde a un desplazamiento de 400um, para cada nivel de esfuerzo vertical. La Figura 41 muestra que por

medio de regresión lineal el ángulo de fricción interna de la arena caliza utilizada en los morteros y sustrato es de  $38.05^\circ$ . El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) esta regresión lineal es del orden de 0.9671, indicando poca dispersión de los datos obtenidos experimentalmente.

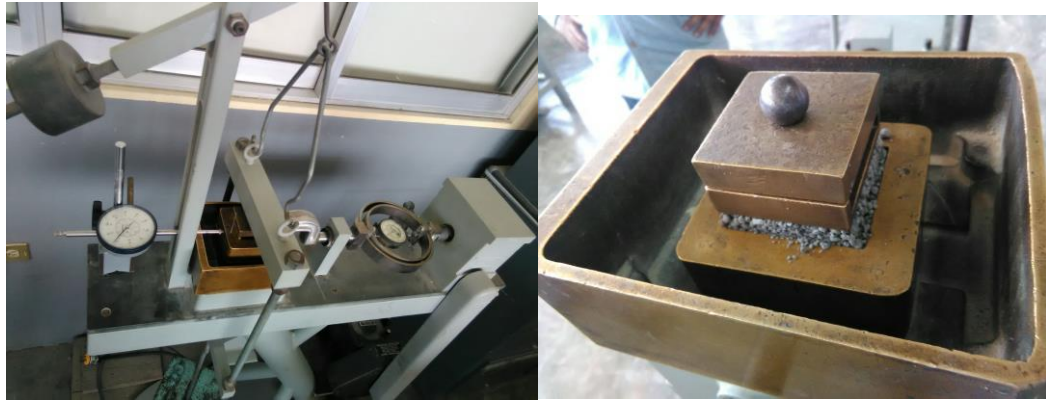


Figura 39.- Marco de corte directo y muestra después del ensayo.

El resultado del ángulo de fricción interna para esta muestra es del orden que la literatura reporta, siendo utilizado el peso volumétrico compacto de la arena como parámetro. Braja (Das, 1985) reporta que para arenas angulares compactas el valor del ángulo de fricción interna es de  $35 - 40^\circ$ . Se obtiene un valor de 0.017 MPa de cohesión, es decir, al ser un suelo puramente friccionaste y al ser una muestra reconstituida el valor de la cohesión es del orden de cero, satisfaciendo lo establecido en la literatura referente a la mecánica de suelos (Crespo, 1969; Das, 1985; Juarez Badillo, Eulalio; Rico Rodriguez, 1969).

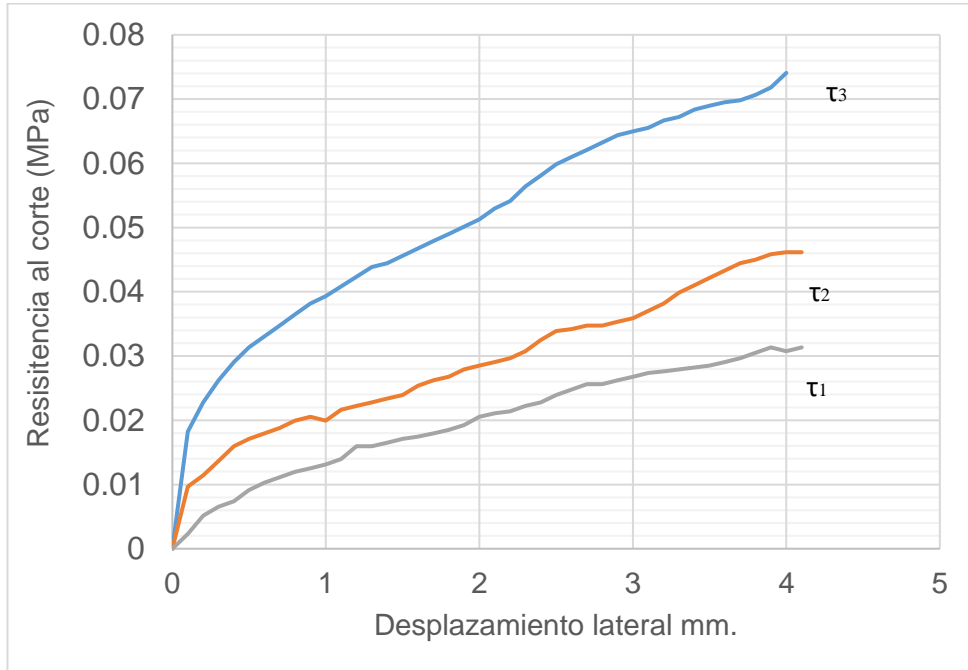


Figura 40.- Ensayes de corte vs desplazamiento lateral.

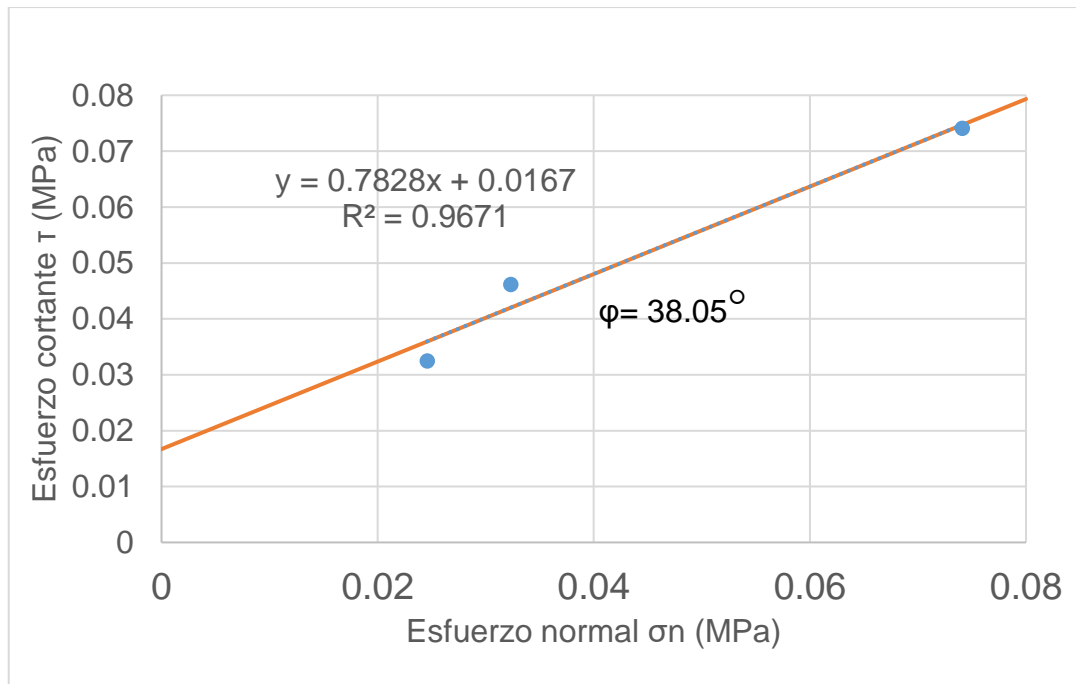


Figura 41.- Determinación de ángulo de fricción interna de la arena usando los criterios de Mohr-Coulomb

#### 5.4.2. Cohesión y ángulo de fricción interna en zona de interfaz, mortero-sustrato

A través de ensayos a compresión de especímenes cuyo ángulo de falla fue inducido en un ángulo  $\alpha$  a partir, de la vertical en sentido horario, se logró tener diversos estados de esfuerzos (Figura 45). Los esfuerzos que se generan en la zona de interfaz básicamente son un esfuerzo normal ( $\sigma_n$ ) y un esfuerzo cortante ( $\tau$ ) sobre el plano de falla. Algunos investigadores han propuesto fórmulas matemáticas que determinan los esfuerzos antes mencionados, sin embargo, al obtener dichos valores no es posible determinar si la característica principal de la teoría de Mohr-Coulomb se cumple, si y solo si, la línea de falla es tangente a la envolvente de los estados de esfuerzos (círculos de Mohr) (Juarez Badillo, Eulalio; Rico Rodriguez, 1969). Se generaron tablas donde el dato principal fue la carga aplicada a cada probeta. Determinado el esfuerzo a compresión es asignado a  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$  y  $\tau_{xy}$  son igual a cero debido a que inicialmente no se le aplica a los especímenes esfuerzos confinantes ni distorsiones. La Figura 45 muestra los círculos de Mohr generados a partir de los esfuerzos iniciales, se identifica los puntos iniciales de esfuerzos y simplemente considerando que  $\alpha$  es  $2\theta$  y rotándolo en sentido horario se obtiene el esfuerzo cortante y normal en el plano de falla de interés, dato que se obtendrá analíticamente a partir del valor experimental del esfuerzo a compresión aplicado. Para el caso de la zona a tensión, se utilizó la prueba brasileña considerando la resistencia a tensión del concreto, quedando en la zona positiva, debido a la convención de Mecánica de Materiales, al no tener esfuerzos confinantes  $\sigma_1 = \sigma_t$  y el  $\sigma_3 = 0$ , usando la Ecuación 7 y 8.

Para graficar la envolvente se utilizó la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos(2\theta) - \tau_{xy} \cdot \sin(2\theta) \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\tau = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin(2\theta) + \tau_{xy} \cdot \cos(2\theta) \quad \text{Ecuación 7}$$



Figura 42.- Especímenes con planos de falla inducidos, para determinación de Esfuerzo normal y cortante (al plano de falla correspondiente).



Figura 43.- Ensayo de corte inclinado a espécimen evaluando al mortero de referencia, M00F00. LLa falla fue inducida en un ángulo preferencial.

Para la representación en las gráficas esfuerzo normal y esfuerzo cortante, se tomaron de referencia la convención de Mecánica de Suelos, recordando que para esta área de la ingeniería los esfuerzos a tensión son negativos y los de compresión positivos, esto se empleó debido a que los artículos más recientes acordes al tema tienen esta convención. La Figura 44, ejemplifica la cantidad de especímenes necesaria para realizar el análisis de cohesión y Angulo de fricción interna para las mezclas de mortero de reparación sobre el sustrato de interés. En el caso particular de las muestra M00F05 se observa en la misma imagen que la superficie de falla de los cilindros ensayados a compresión diametral cuentan con mayor integridad en su superficie, ya que su superficie luego de presentarse la falla se mantuvo en su posición y no se presentaron desprendimientos de mortero o agregados.



Figura 44.-Especímenes necesarios para análisis de cohesión y ángulo de fricción interna (Mohr- Coulomb).



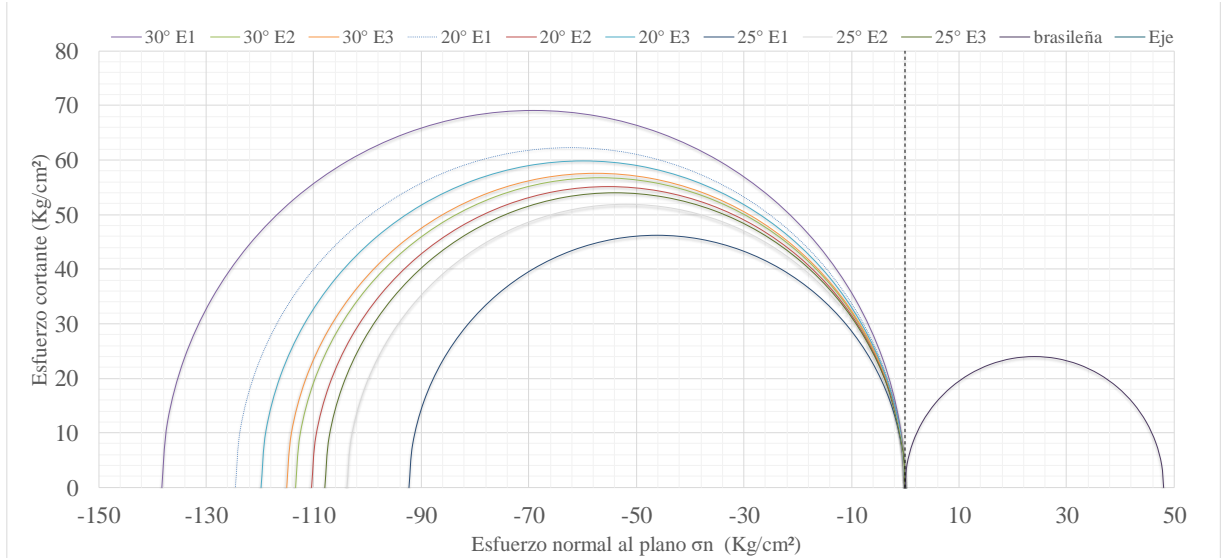


Figura 45.- Envoltentes conforme a la convención de Mecánica de Materiales (Beer et al., 2009)

En la Figura 46 se muestra los resultados para el ensayo de adherencia, a edad de 28 días. La convención utilizada fue la de Mecánica de Suelos. Se ha adicionado a cada resultado su coeficiente de correlación, la regresión lineal empleada recordando que el esfuerzo cortante es  $\tau = \sigma \tan\phi + c$ . Se aprecia que el ángulo de fricción interna entre la MREF/M00F00, M20F00 y M00F05 se mantienen en el mismo orden, con diferencias no mayores a  $1^\circ$  en el ángulo de fricción interna. Sin embargo, la muestra M20F05 ha tenido un incremento en la fricción interna y aunque su cohesión es mayor que la muestra con solo fibras se debe recordar que se compara contra una muestra que tiene como material ligante solo cemento.

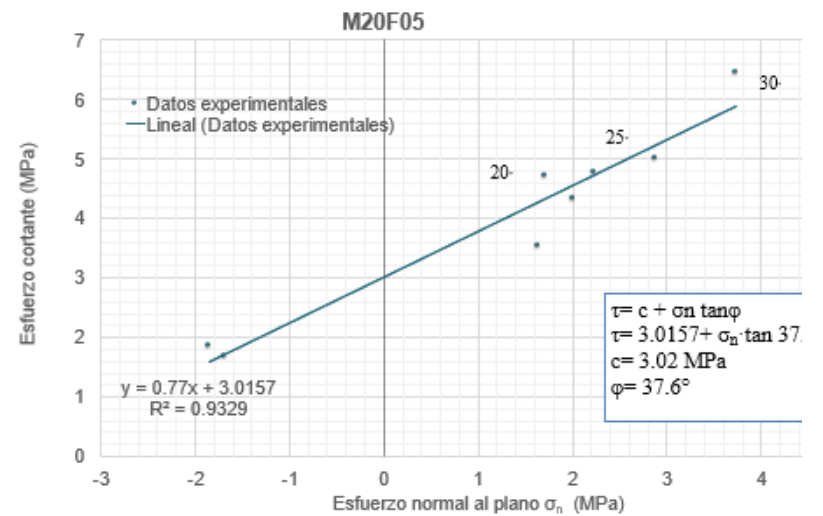
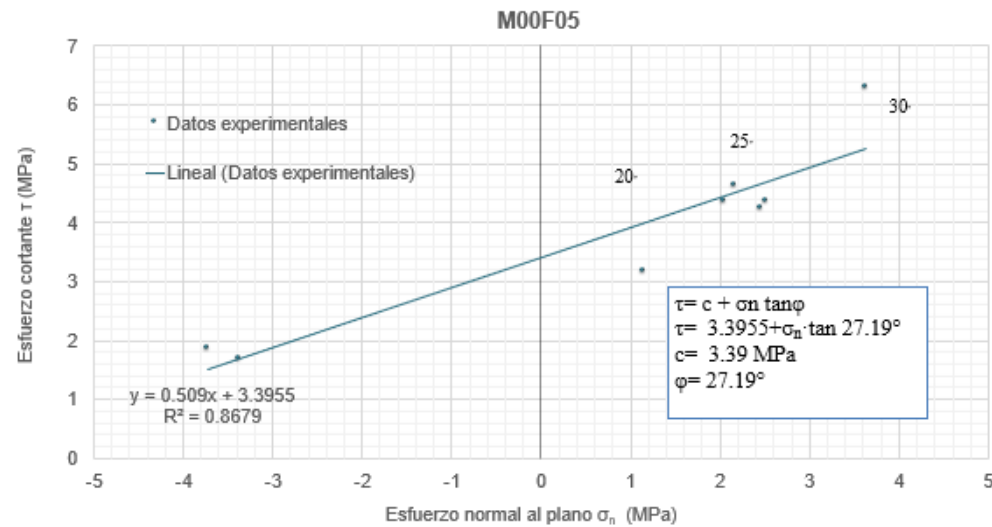
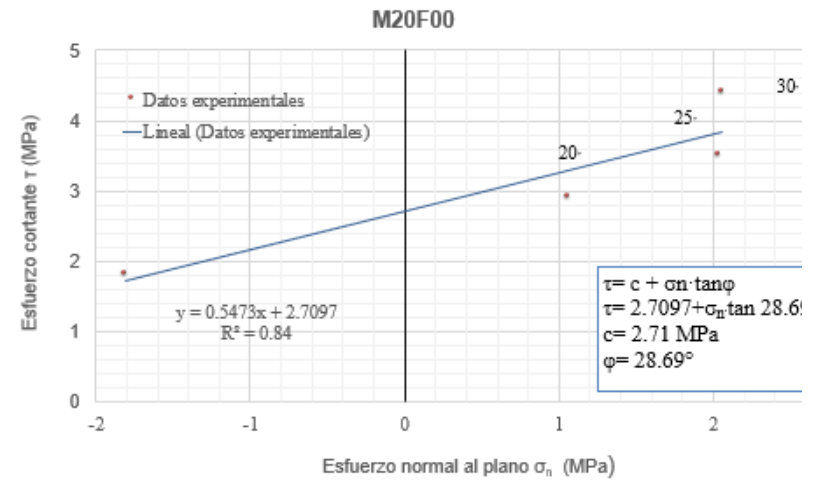
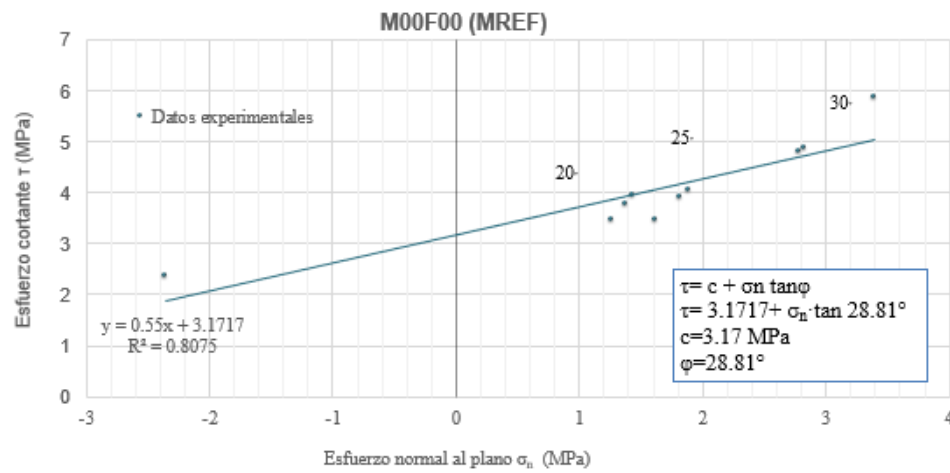


Figura 46.- Resultados de ensayos de adherencia a 28 días, ángulos de fricción interna y cohesión, conforme la convención de Mecánica de Suelos (Das, 1985; Juárez Badillo, Eulalio; Rico Rodríguez, 1969).

Las figuras 47 y 48 muestran dos tipos de fallas diferentes, donde la primera muestra como la falla final en el ensaye se produce sobre el plano de falla con una falla súbita, caso opuesto a la Figura 48 donde la pieza se agrieta en la zona de transición mortero de reparación- sustrato.



*Figura 47.- Falla en el plano preferencial para M20F0*



*Figura 48.- Falla de M00F05, nótese el agrietamiento en la zona de interfaz sustrato-mortero de reparación.*

## 5.5. Retracción

Se considera para este trabajo la realización de pruebas de retracción, la elaboración de los especímenes y métodos de curado inicial es acorde a ASTM C 157. La Figura 49 muestra parte del procedimiento de toma de lecturas, en esta investigación se presentan los resultados en  $\mu\epsilon$ . Se observa que, dentro de los morteros en estudio, los morteros M00F05 y M20F00, presentaron valores menores de contracción que la muestra de referencia M00F00. Nótese en la Figura 50, que la muestra con M20F05, fue la que menos contracción obtuvo, comportándose mejor que las muestras separadas de fibras y ceniza volante, con ello se habla de que entre estos dos materiales se produjo una sinergia.



Figura 49.- Determinación de contracción por secado.

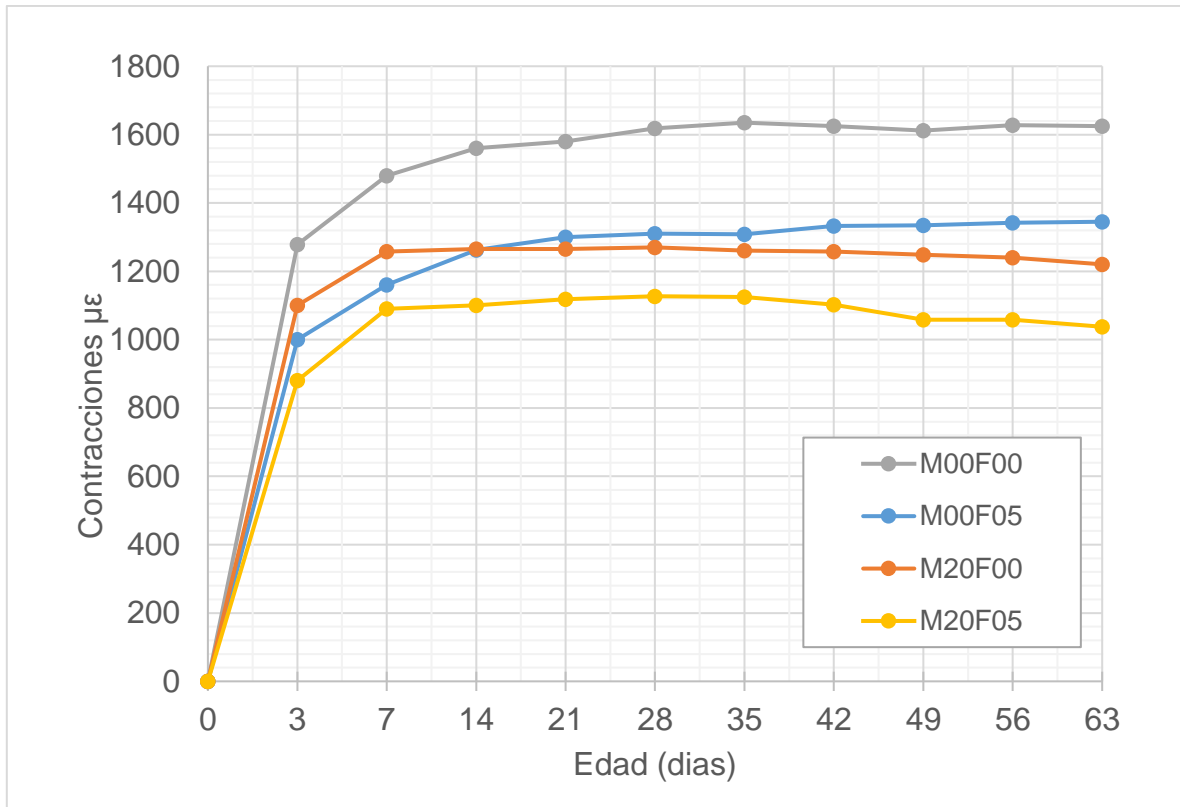


Figura 50.- Retracciones por secado de las muestras de mortero

## 5.6. Porosidad

La porosidad abierta al agua es la relación entre los poros interconectados al exterior y su volumen total. La porosidad es considerada como un indicador de la durabilidad debido a que está relacionado con la resistencia a la compresión y a su vez, de la absorción del material. La Figura 51 expone los resultados de la porosidad de las muestras a 28 y 90 días, bajo la norma ASTM C 642, se aprecia que conforme la edad de los especímenes que contienen ceniza volante, la porosidad disminuye después de los 28 días, debido a la reacción puzolánica de la ceniza volante en la matriz cementada y la formación adicional de silicatos de calcio hidratados.

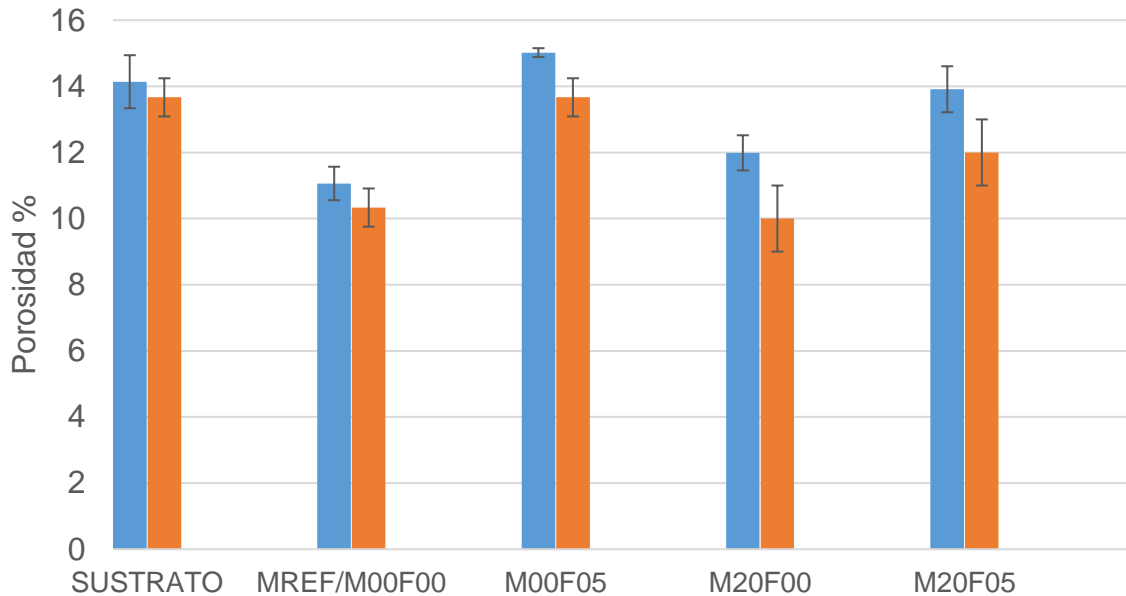


Figura 51.- Porosidad de las muestras a edad de 28 (azul) y 90 (rojo) días

### 5.7. Resistividad

Los numerosos costos que provoca la corrosión del acero presente en elementos de concreto reforzado, han motivado a un alto interés en la evaluación del fenómeno como en la fase de diseño de nuevas estructuras. La resistividad del concreto es uno de los más importantes parámetros que puede promover la corrosión del acero de refuerzo, la resistividad eléctrica  $\rho$  ( $k\Omega \cdot cm$ ) de un material describe su capacidad para soportar la transferencia de carga. Es la relación entre la tensión aplicada y la corriente resultante multiplicada por una constante de la celda y es, por lo tanto, una propiedad independiente de la geometría. Según Hornbostel y colaboradores, esta propiedad se relaciona a propiedades de la microestructura tales como: la porosidad y las características de la solución de poro (Hornbostel, Larsen, & Geiker, 2013).



Figura 52.- Equipo Resipod (Método de Wenner).



Figura 53.- Determinación de la Resistividad superficial de especimen dentro del cuarto humedo del IIC UANL.

Las Figura 53, hacen alusión al procedimiento de toma de lecturas dentro utilizando un equipo Resipod de la marca Proceq, que funciona bajo el principio de las 4 puntas de Wenner. Las lecturas fueron tomadas dentro del cuarto húmedo del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL, donde las condiciones de humedad estuvieron fueron controladas asegurando una HR > 95% en todo momento.

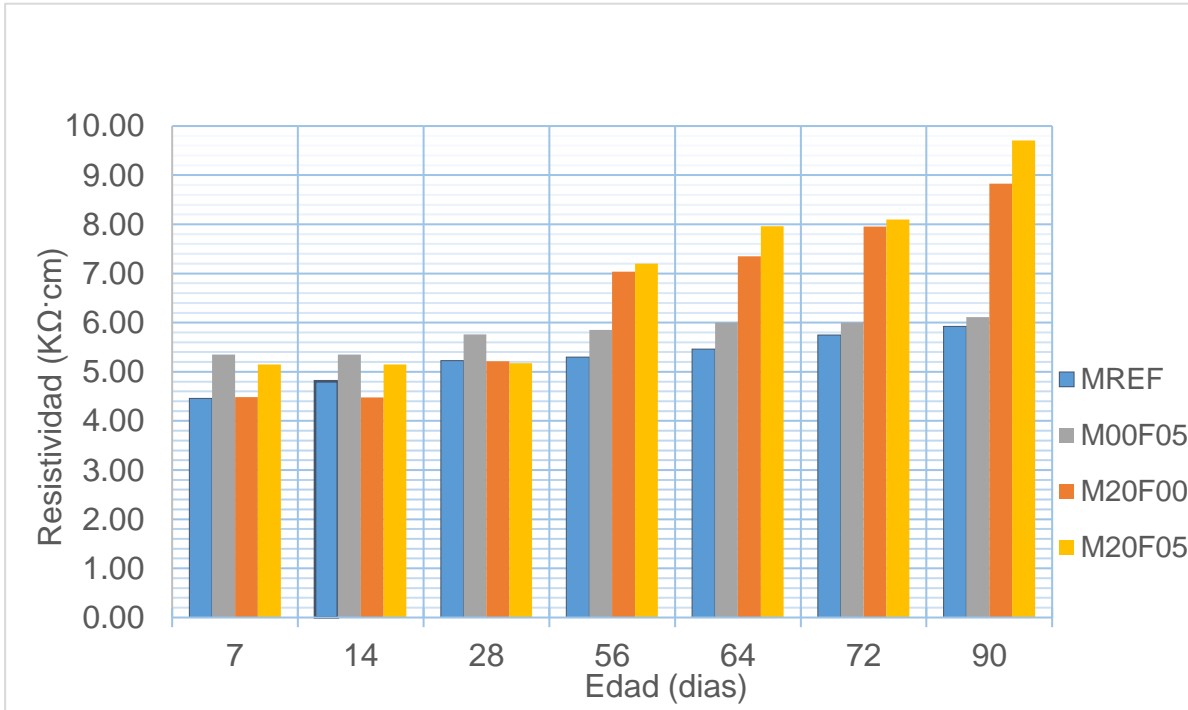


Figura 54.- Resistividad eléctrica superficial de los morteros de reparación para diferentes edades

El seguimiento de las muestras cilíndricas de mortero se dieron por 90 días, en donde según la Figura 54, la resistividad eléctrica de las muestras de morteros a una edad temprana de 7 días fue mayor para los especímenes con fibras de polipropileno las cuales por ser materiales naturalmente aislantes, incrementaron la resistencia eléctrica superficial de las muestras M00F05 y M20F05. A la edad de 28 días tanto las muestras que contenían ceniza volante como las muestra de referencia estuvieron en el mismo orden, siendo la muestra M00F05 la mayor en ese momento. Para edades superiores a los 28 días, el efecto puzolánico de la ceniza volante se hace constar, incrementado para las muestras donde se encontraba presente el valor de este parámetro de durabilidad. Para la edad de 90



días, las muestras M20F05 y M20F00, se mostraron más altas, como era de esperarse, sin embargo, la muestra M20F05 que contiene fibras de polipropileno al .5% de volumen, se mantiene mayor que la que solo contiene una sustitución de ceniza volante como material cementante en la misma magnitud.

## 5.8. Carbonatación.

La carbonatación es el proceso químico donde el hidróxido de calcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Presente en la solución de poro y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) del aire reaccionan. Primero el dióxido de carbono es diluido en la solución de poro formando ácido carbónico y luego este reacciona con el hidróxido de calcio para formar carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). El carbonato de calcio es un muy eficaz agente densificador, reduce la permeabilidad e incrementa la resistencia a la compresión. Se utiliza una cámara de carbonatación con una concentración del 4% con una humedad relativa (HR%) de 60 +/- 5%.

Se obtienen de la profundidad de carbonatación se presentan en la Figura 55, al tomar 5 lecturas por lado de los especímenes. Dichos especímenes provienen de cortes frescos a piezas en el interior de la cámara de carbonatación, rociados con una solución de fenolftaleína al 1%. Se procede a sacar la media aritmética de los 25 valores y registrarlos en función del tiempo. Al tener los puntos en función de la raíz cuadrada del tiempo, y considerando el tiempo (t) en años, se procede a calcular la razón de cambio, es decir  $K_a$ . El valor antes mencionado está en función de las propiedades físicas de los especímenes, tal como, su porosidad, la relación a/c. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa los valores de  $K_a$  obtenidos a una concentración de 400 ppm de  $\text{CO}_2$  y  $K_a$  en función de la concentración media reportada en la ciudad de Mauna Loa (Houghton, J; Ding, Y.; Griggs, 2001)

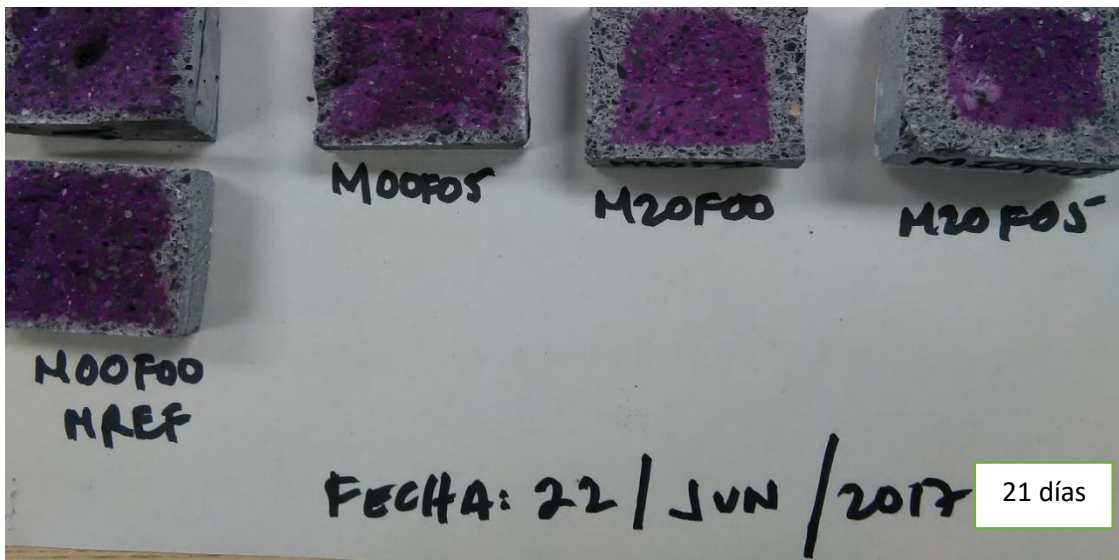


Figura 55.- Ejemplos de determinación de Profundidades de carbonatación

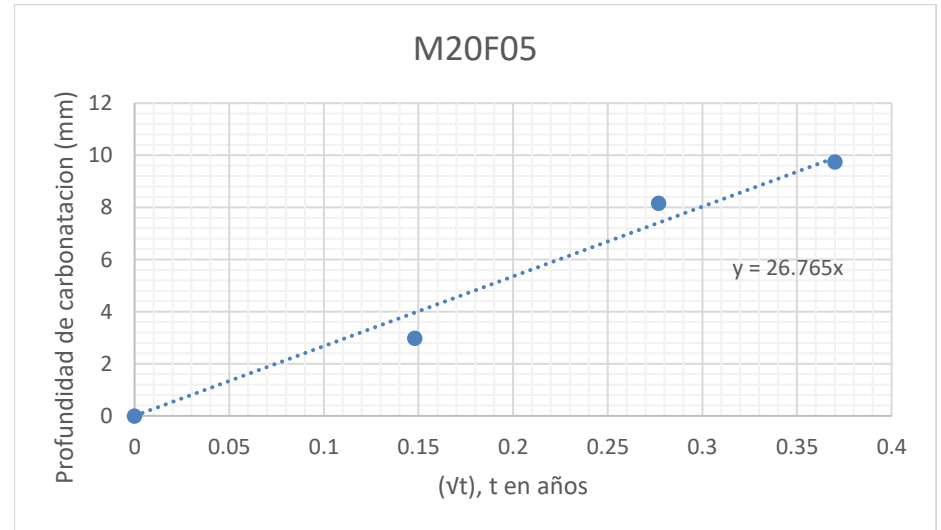
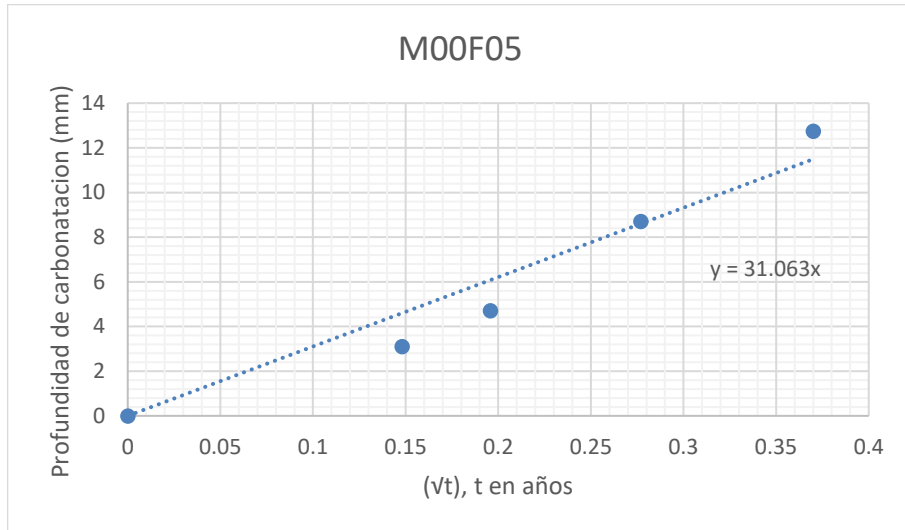
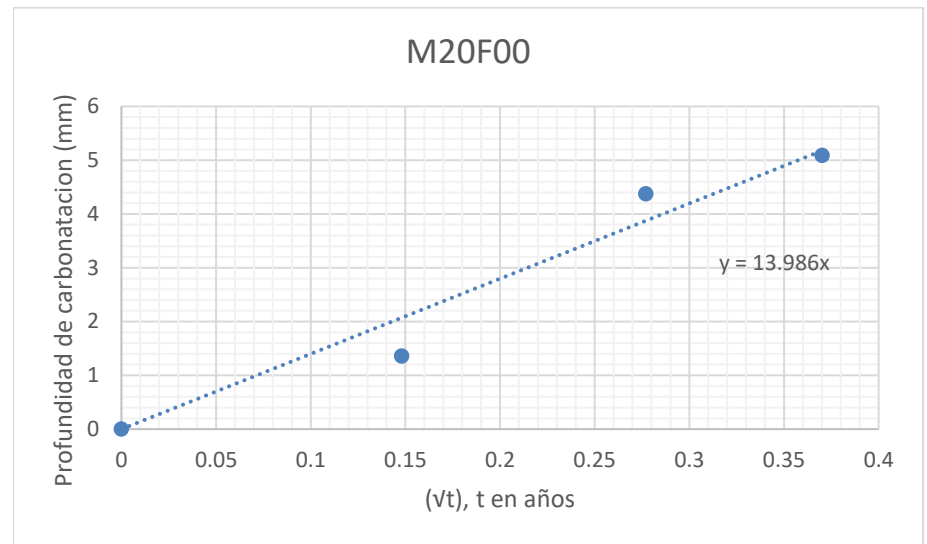
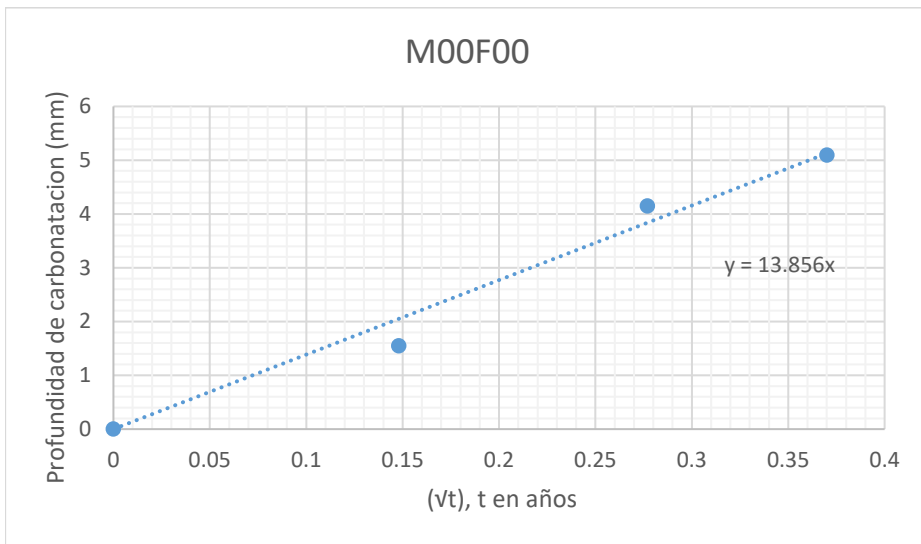


Figura 56.- Determinación de K en ambiente acelerado de CO<sub>2</sub> (4%)

### 5.8.1. Profundidad de carbonatación

A pesar de los efectos positivos de la utilización de la ceniza volante en concreto, también existen inconvenientes, como la profundidad de carbonatación. Las muestras de concreto que contengan cantidades de ceniza volante se muestran superiores en contraste de aquellas con concretos base cemento portland ordinario. Como recomendación se ha sugerido la implementación de molienda para incrementar la actividad puzolánica adicional al efecto filler como una revisión en la composición química y mineralógica de las cenizas volantes (Chousidis, Ioannou, Rakanta, Koutsodontis, & Batis, 2016).

Algunos investigadores han evaluado la relación que existe entre la prueba de carbonatación acelerada y su conversión a una profundidad de carbonatación en condiciones de concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico (Campos Silva, Fajardo, & Mendoza Rangel, 2016). El Dr. Erick Moreno utiliza en su tesis Doctoral y en posteriores investigaciones, las Ecuación 9 y 10 (Moreno, Eric I.; Domínguez, L.; Gerardo, 2004; Moreno, 1999), a partir de ellas se establece una relación entre pruebas aceleradas en cámaras de carbonatación a ambientes de interés, en este caso el  $k_{atm}$  (con una concentración de CO<sub>2</sub> de 0.04% o 400 ppm) que le corresponde a la ciudad de Mauna Loa, Hawái, EUA. Para fines de esta investigación, se empleará  $k_{atm} = k_{avg} \sqrt{\frac{c_{atm}}{c\%}}$  Ecuación 9 y 10, utilizando los datos de la profundidad de carbonatación y  $k_{avg}$ .

$$\frac{k_1}{k_2} = \sqrt{\frac{c_1}{c_2}} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$k_{atm} = k_{avg} \sqrt{\frac{c_{atm}}{c\%}} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

$k_{atm}$ , el valor de k para las condiciones atmosféricas

$k_{avg}$ , el valor promedio a partir de las profundidades de carbonatación, en condiciones aceleradas (Figura 55)

$c_{atm}$ , concentración de interés, que se desea evaluar, en este caso, 0.04%

$c\%$ , concentración a la que se efectúa la prueba de carbonatación acelerada, 4%

Los resultados se muestran en la Tabla 8, se observa que todos los valores obtenidos de  $k_{atm}$  son menores a  $4.5 \text{ mm/año}^{0.5}$ . La Tabla 9, especifica los límites que deben de cumplir y la clasificación en cuanto a su calidad. Debido a lo anterior se tiene que M00F00 y M20F00 son considerados de buena calidad. En contraste, las muestras M20F05 y M00F05, son consideradas como de mediana calidad.

Tabla 8.- Resultados de carbonatación acelerada a  $k_{atm}$

Muestras	$k_{avg}$ (mm/año <sup>0.5</sup> )	$k_{atm}$ (mm/año <sup>0.5</sup> )
M00F00	13.856	1.38
M20F00	13.986	1.40
M00F05	31.063	3.11
M20F05	26.756	2.68

Tabla 9.- Calidad del Concreto de acuerdo con su coeficiente de carbonatación  $k$  (mm/año<sup>0.5</sup>) (ONNCCE, 2018)

$k < 3$	Concreto de buena calidad
$3 < k < 6$	Concreto de mediana calidad
$k > 3$	Concreto de mala calidad

## 5.9. Discusión

La utilización de fibras de polipropileno y el aditivo hiperfluidizante tuvieron como efecto que los porcentajes de aire incluido en los morteros comparados con el de referencia se incrementará considerando a la mezcla M00F00 contrastadas con M00F05, M20F00 y M20F05 un incrementa del 158%, 92.4 % y 105.5 %, respectivamente. Como se aprecia en la Figura 57, la porosidad abierta al agua a la edad de 28 días siguió un patrón, que corresponde con los valores iniciales de contenido de aire expresado en porcentaje.

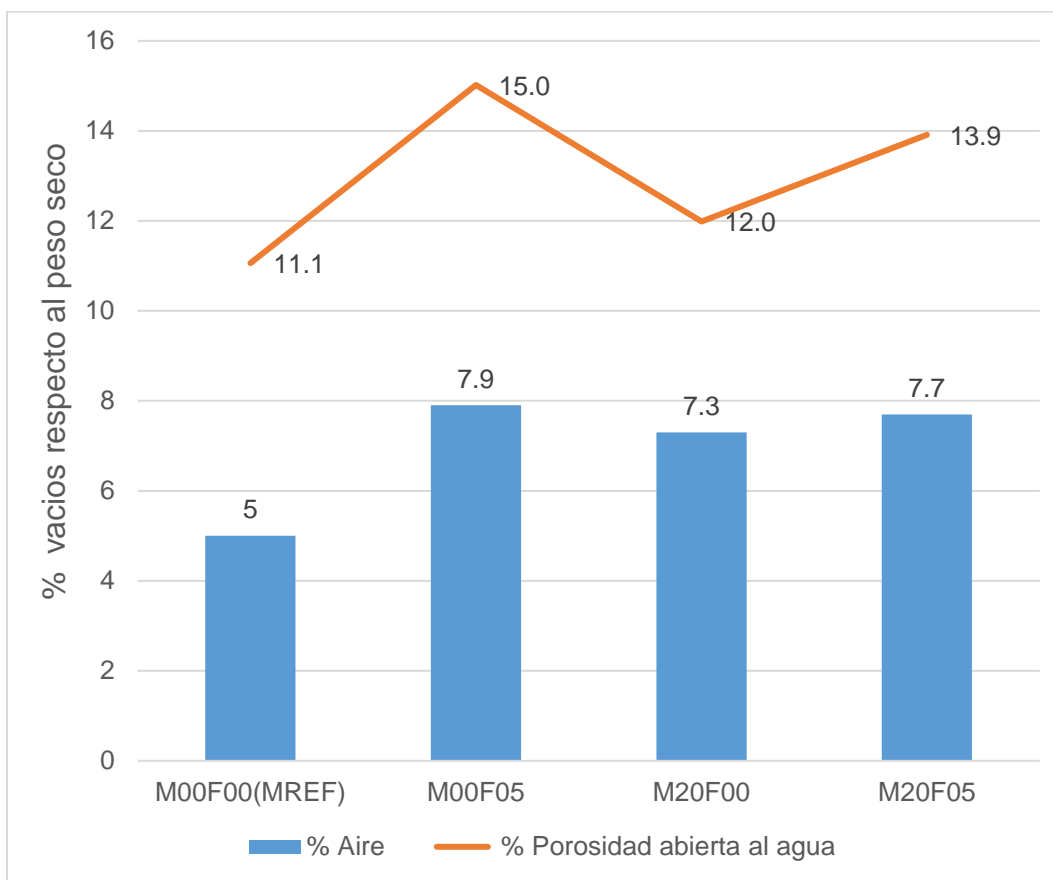


Figura 57.- Comparativa entre porcentaje de aire vs la porosidad abierta al agua.

La relación entre la porosidad abierta al agua con la resistencia a la compresión es evidente ya que al incrementarse dicho parámetro la resistencia a la compresión se vio diezmada que si bien los morteros no contenían las misma dosificaciones, el efecto de la adición de microfibras y de las sustituciones de ceniza volante para una

edad de 28 días concuerdan con la literatura clásica. La adición de microfibras de polipropileno para los casos anteriores ha incrementado la porosidad de las mezclas ya que se propuso fijar cantidades similares de aditivos, agregados y cementantes, tanto base cemento como en su aplicación binaria.

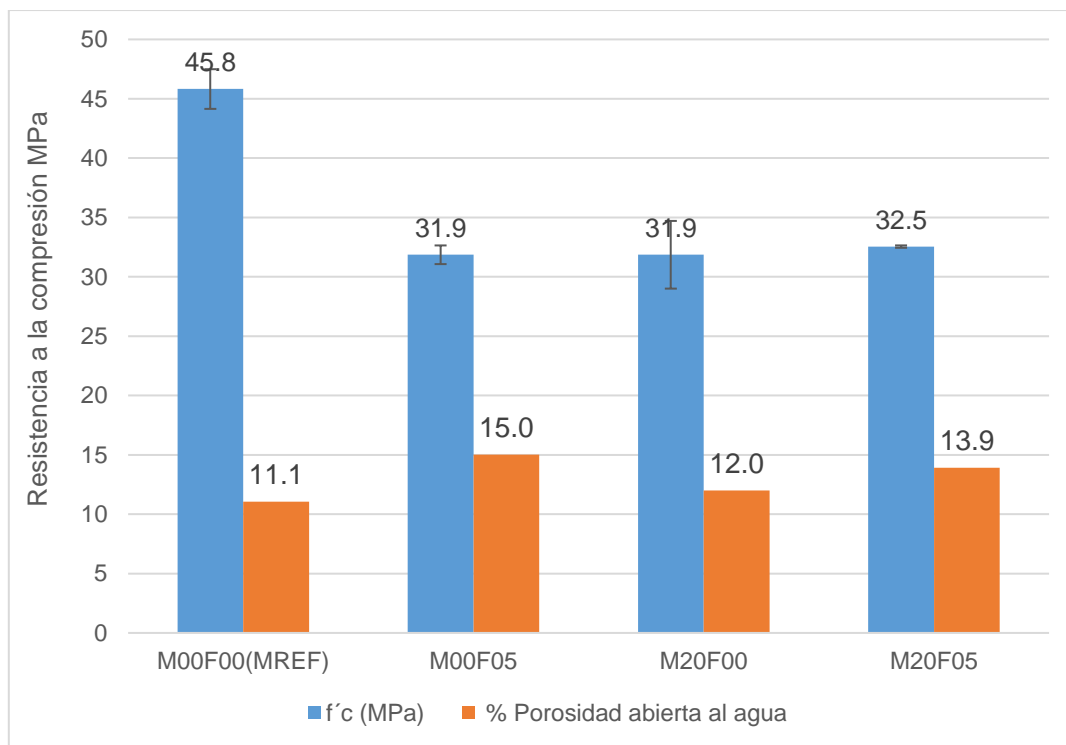


Figura 58.- Comparativa de la resistencia a la compresión a 28 días vs porosidad abierta al agua

Como se discutió en su momento los parámetros de durabilidad en este caso la resistividad eléctrica superficial está ligada a la relación agua cementante y a la red porosa, debido a que una mayor red porosa propiciada por un aumento en la relación agua cemento o un incremento en la porosidad total favorecerá la conducción de los iones y disminuirá el valor de la resistividad eléctrica (Picos, 2014). Por otra parte, al formar un material compuesto donde la matriz cementada se le ha añadido fibras de polipropileno que dada su naturaleza es aislante, se observa a la edad de 28 días, entre la M00F00 y M00F05, ambas base cemento portland, la resistividad fue 110.3% mayor para aquella que contiene microfibras de

polipropileno. Para la misma edad y en conocimiento que a los 28 días no se han generado completamente las reacciones puzolánicas, comparando la referencia con las muestras M20F00 y M20F05, son del 90.5 y 99.2 %, respectivamente. Obsérvese que la muestra M20F05 respecto a M20F00, el uso de las microfibras aumento 9.2% el parámetro de la resistividad.

La porosidad abierta al agua va disminuyendo conforme la resistividad eléctrica se incrementa, conforme el concreto va adquiriendo más resistencia mecánica al formarse más compuestos hidratados y en los casos de utilizar materiales suplementarios, los cuales, mediante la reacción puzolánica y el consumo de los iones presentes en la solución de poro, van precipitando compuestos no solubles quienes densifican a la matriz. Esta densificación se traduce en un material menos poroso menos conductivo a falta de iones y por ende más resistivo.

Por lo antes mencionado, en la Figura 59, observe como al llegar a los 90 días, evaluando la resistividad eléctrica superficial, las mezclas que contienen ceniza volante comparadas con la M00F05, M20F05 y M20F00, cuentan con un valor mayor de 149% y 163%, respectivamente. La muestra M20F00 inclusive para la edad de 90 días logro una porosidad menor a la de la muestra de referencia.



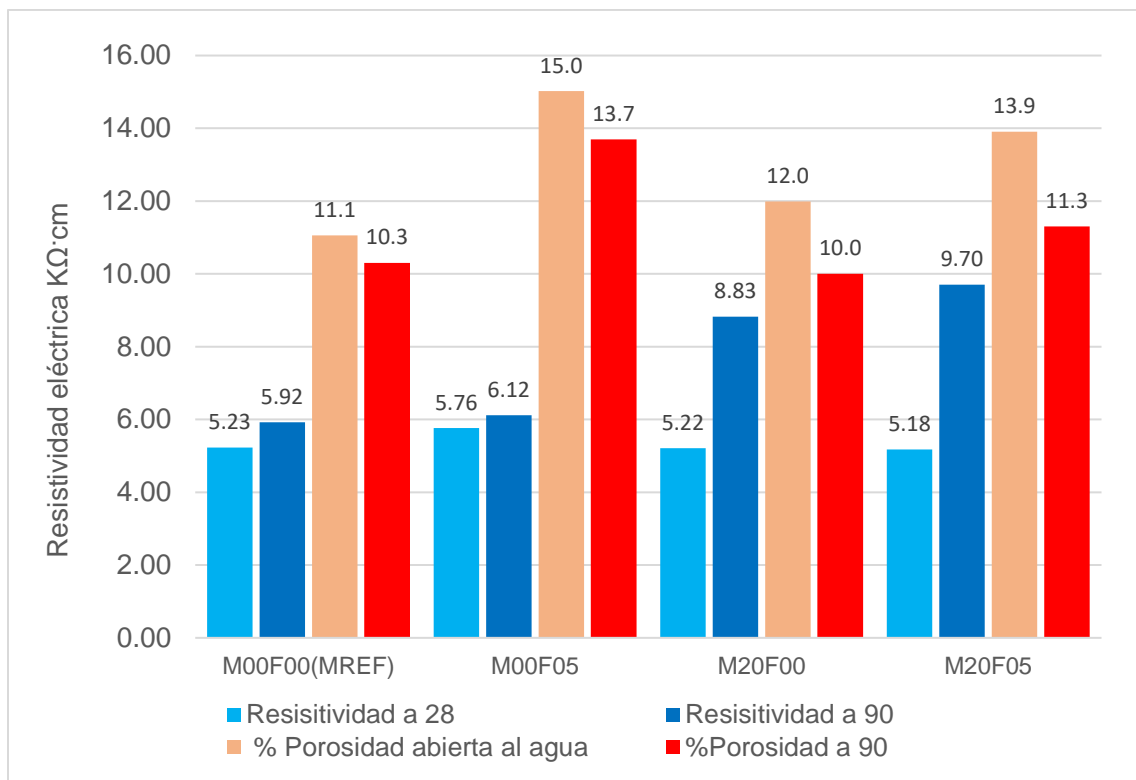


Figura 59.- Porosidad abierta al agua vs resistividad eléctrica

### 5.9.1. Carbonatación

La Figura 60, muestra los valores de  $K_{atm}$  los cuales según la Tabla 9, clasifica a las muestras M00F00, M20F00 y M20F05, como aquellas de buena calidad y tanto a M00F05, como de mediana calidad. Obsérvese que para los casos que contienen una sustitución del 20% de ceniza volante como material suplementario, los valores de resistividad eléctrica fueron superiores a aquella solo con la adición de fibras de polipropileno, se infiere que para esta relación agua cemento (0.55), el beneficio directo se debe a la reacción puzolánica contrastada con la muestra de referencia. Si bien las muestra M00F05 que contiene fibras poliméricas fue clasificada como de mediana calidad, la muestra M20F05 cumple con la clasificación de buena calidad ( $K_{atm}$ , 1-3 mm/año<sup>0.5</sup>). Para las muestras de referencia como para M20F00 y M20F05, según la Figura 59 contienen una porosidad abierta al agua menor que M00F05 lo que explica la mayor profundidad de carbonatación y, por lo tanto, una

katm mayor. Para las muestras M20F00 y M20F05, la presencia de material puzolánico suplementario y microfibras de polipropileno (con baja conductividad por su naturaleza polimérica) presentan una resistividad eléctrica mayor a la edad de 90 días, que las muestras de M00F00 y M00F05.

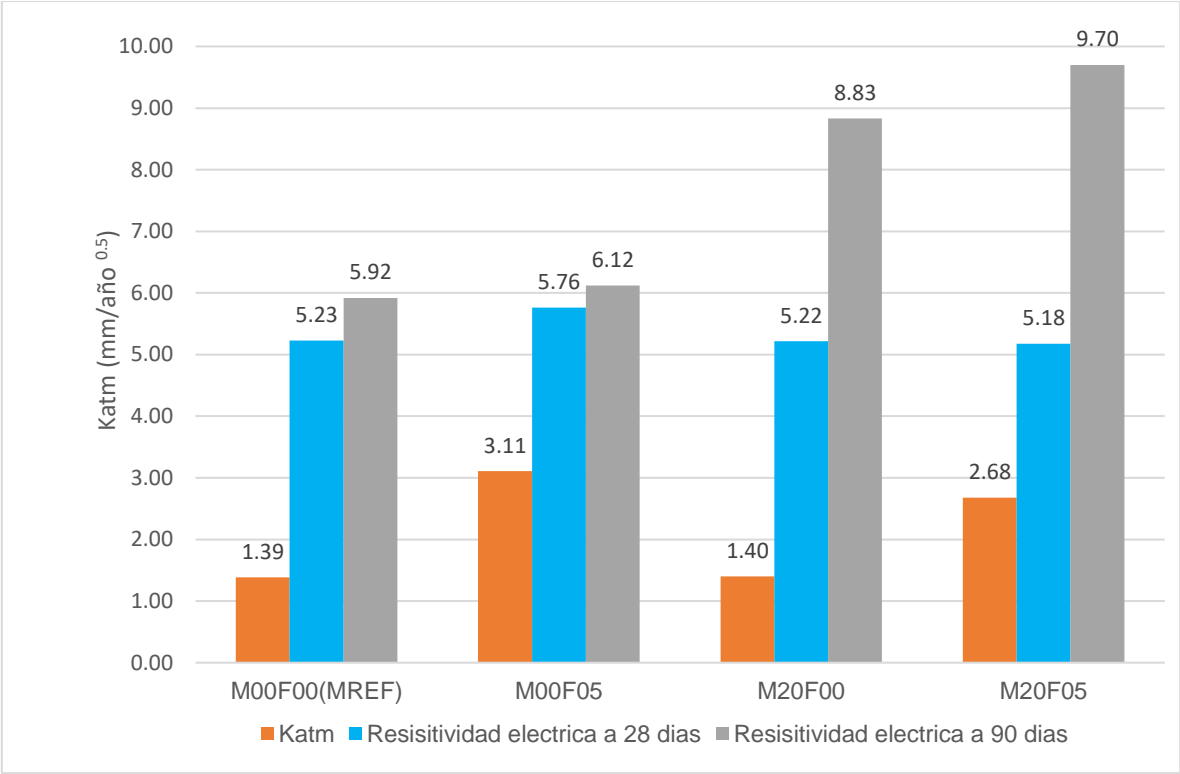


Figura 60.- Resistividad eléctrica vs k atm

### 5.9.2. Adherencia

En esta sección, la adherencia será discutida a partir de los resultados obtenidos. A continuación, solo se analiza a la unión sustrato-mortero de reparación, en aquellos mecanismos en donde el esfuerzo normal es considerado cero, para los estados de esfuerzos inducidos por las características geométricas y ángulos  $\alpha$  preferenciales.

Si bien la textura de la superficie es crítica para mejorar la adherencia, según la literatura (Feng, Xiao, Zhang, & Yang, 2020; Zanotti et al., 2018), al tener superficies más finas como las que se emplearon en esta investigación, aíslan la cohesión,

debido a que a los resultados no se le suman los efectos de la resistencia al cortante debido a la fricción entre mortero y sustrato, siendo estas despreciables.

En 2018, Zanotti et al, discuten que en la zona diversos mecanismos de falla local, tanto el entrelazado como el de deslizamiento y fractura. Los primeros se producen en condiciones donde prevalece la rugosidad de las superficies, y que, al disminuir la rugosidad de la zona de interfaz, se producen aplastamientos locales despreciables, como fue el caso de esta investigación. La Figura 61, resume la relevancia de la interacción entre el ángulo de inclinación, las concavidades producidas del tratamiento superficial y en su caso la dirección del flujo. En la misma imagen, se observa los espacios donde el esfuerzo cortante producido incide en el sustrato, el material de reparación y la zona de interfaz. Si bien la referencia de esta imagen considera fibras metálicas, proporciona un esquema apropiado para esta discusión.

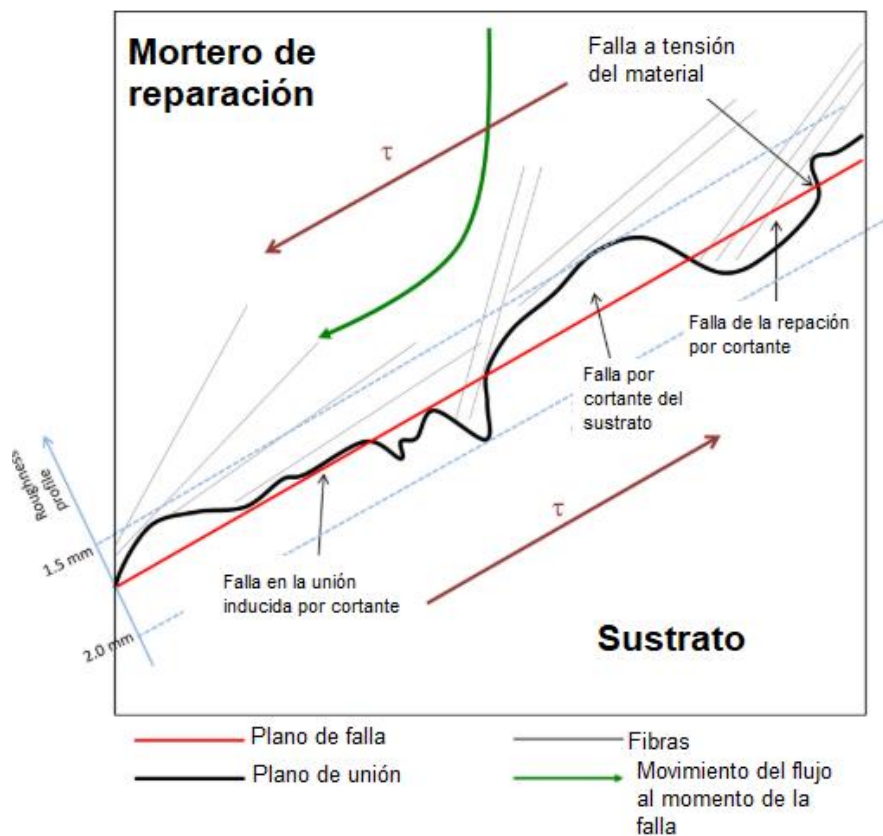


Figura 61.- Mecanismo de la falla en la Zona de Interfaz para materiales de reparación fibroreforzados (Zanotti et al., 2018).

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa que las reparaciones las cuales tienen en su interfaz una textura suave o fina presentan despreciables aplastamientos locales, coincidiendo con los criterios de falla mencionados en el párrafo anterior. Dentro de los ensayos se observa que los elementos que contienen microfibras presentan agrietamientos y deslizamiento, considerando las discusiones sobre materiales de reparación con fibras este fenómeno está ligado a la presencia de estas, un mejoramiento en la zona de interfaz y a la orientación de las fibras, que están función de las concavidades de la superficie (sustrato-material de reparación); materiales y tamaños de las fibras. Es de esperarse que el ángulo de fricción interna se muestre incrementada debido a que el mecanismo de deslizamiento se manifiesta.



Figura 62.- Ejemplos de fallas presentadas, la inspección visual no encontró aplastamientos relevantes en los morteros ni en el sustrato.

En las Figuras 63 y 64 se aprecian los resultados de las pruebas efectuadas por la teoría de Mohr-Coulomb, en la Figura 64 se expresan los resultados normalizados en función del valor de referencia (M00F00). Considerando a la referencia se tiene que en cuanto a cohesión la muestra con M00F05 obtuvo un 107%, M20F05 con 95% y para la muestra con M20F00 un 85%. La calidad de la matriz cementada a la edad de 28 días, utilizando material suplementario en sustitución del 20% presenta una disminución de la cohesión, explicada por una disminución de silicatos de calcio hidratados. Ahora bien se tiene que la muestras que contenían microfibras de

polipropileno tuvieron mayor cohesión en comparativa a el mortero binario sin fibroreforzar, sin embargo, considerando el aporte que las fibras proporcionaron para la estabilidad dimensional en la prueba de contracción por secado (Leong, Mo, Loh, & Ibrahim, 2020; Zhang & Li, 2013) (Figura 50), se aprecia que la sinergia entre las fibras y el efecto de filler de la ceniza volante mejoran la estabilidad volumétrica de la reparación así como el refinamiento en la zona de transición de la reparación.

Por medio de una inspección visual, de la falla de todas las muestras, los especímenes que contenían microfibras no presentaron fallas súbitas, si no que desarrollaban una grieta en la zona de interfaz, pero no se desarrollaba un deslizamiento ni tampoco aplastamientos ni en el sustrato como en dichos morteros. La muestra M20F05 alcanzo el valor normalizado de 140% del valor de referencia en cuanto a la fricción interna, mostrados en las Figuras 63 y 64, como la  $\tan(\varphi)$ . El uso de la ceniza volante en sustitución disminuyo la cohesión y el uso de aislado de las fibras incremento la cohesión y disminuyó el efecto de la fricción interna. El trabajo sinérgico de la fibra con la sustitución si bien no incrementa la cohesión si modifica la interacción en la zona de interfaz generando una zona con menores contracciones, mas refinado y por lo tanto la fricción se muestra más relevante.

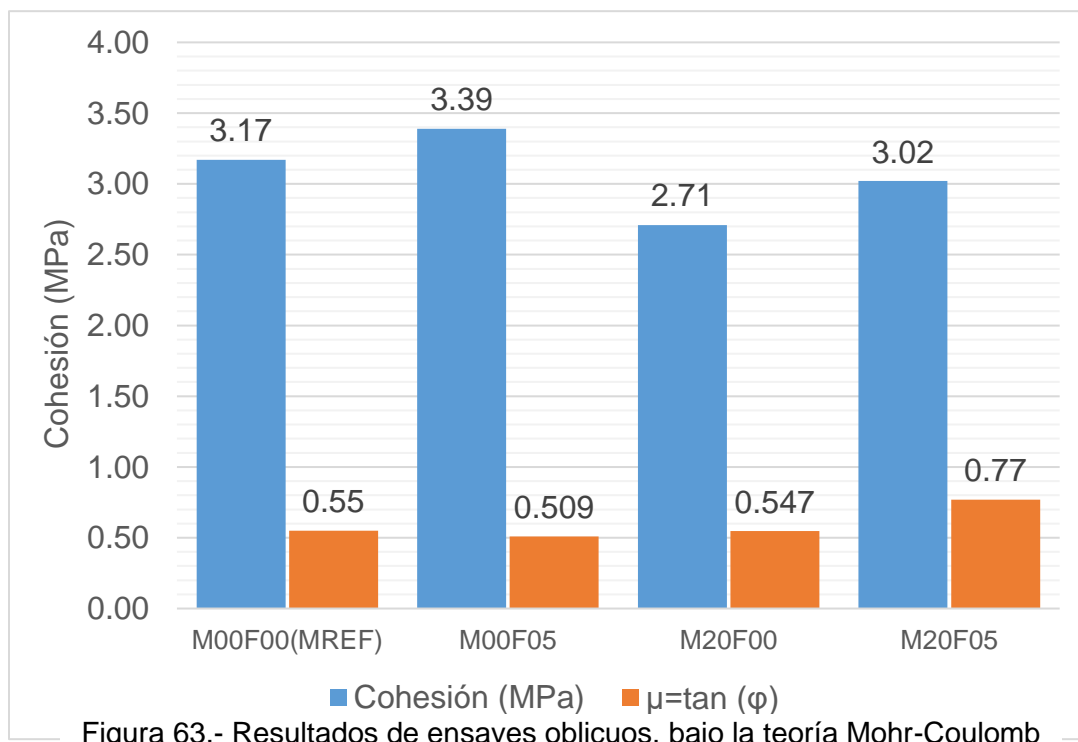


Figura 63.- Resultados de ensayos oblicuos, bajo la teoría Mohr-Coulomb

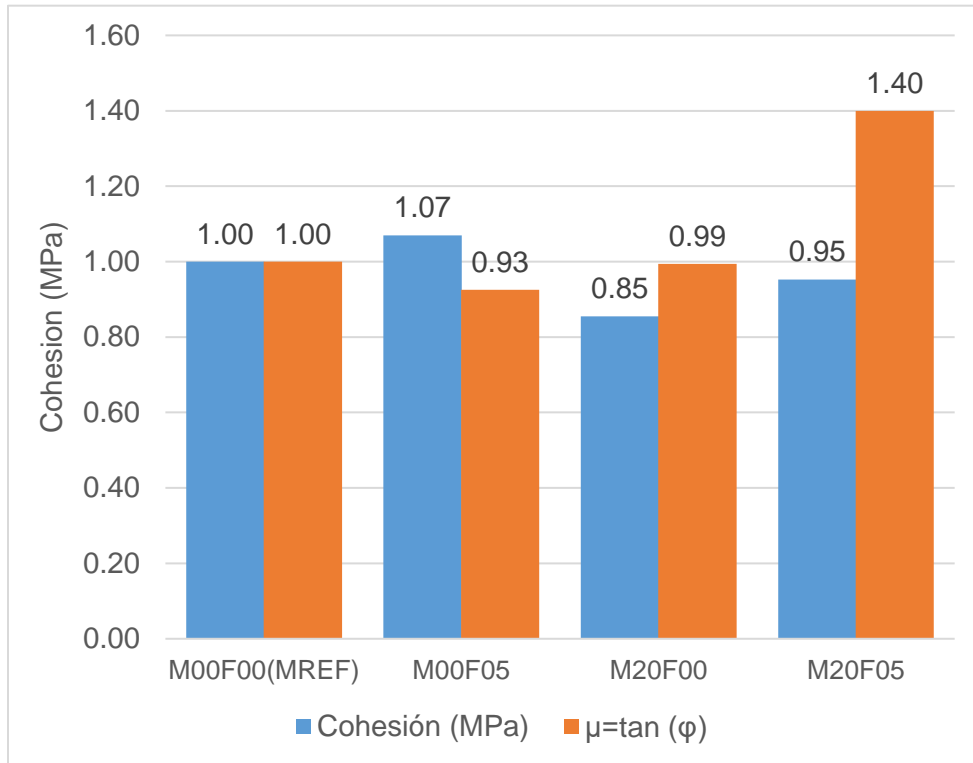


Figura 64.- Resultados de ensayos oblicuos normalizados a la referencia (M00F00)

### 6. Conclusiones y recomendaciones

#### 6.1. Conclusiones

En este capítulo se brindarán las conclusiones de este proyecto, la fase experimental permitió recabar información acerca del comportamiento mecánico y de los parámetros de durabilidad asociados con la carbonatación de los morteros de reparación tipo parcheo en estudio.

El uso de fibras de polipropileno incrementa el aire incluido en los morteros de reparación dicho parámetro afecta directamente a la porosidad de los morteros. Este fenómeno fue potenciado por el uso del aditivo hiperfluidizante, policarboxilato.

La resistencia a la compresión a 28 días mantuvo una relación directa al proceso de la reacción puzolánica y de la porosidad abierta al agua. Donde M00F00 tuvo la menor porosidad abierta al agua y también la mayor resistencia a compresión a 28 días. Los ensayos a 90 días mostraron el incremento de la resistencia a la compresión de los morteros, así como la disminución de la porosidad abierta al agua, esto debida al refinamiento de poro a la mayor tortuosidad producida por la formación de compuestos hidratados adiciones atribuidos a la reacción puzolánica de la ceniza volante.

La adición de microfibras de polipropileno generó un cambio en los módulos elásticos de los morteros ensayados a 28 días, se aprecia que los módulos elásticos de M20F00 y M00F05 tuvieron prácticamente el mismo módulo elástico. Se aprecia que existe sinergia en este parámetro ya que la muestra M20F05 presenta un módulo elástico mayor a los menciones, sin embargo, menor al de la referencia. El valor del módulo de Poisson fue menor que la referencia para todos los casos.

Ante la contracción por secado se aprecia que, respecto al mortero de referencia, los morteros M00F05, M20F00 y M20F05, presentaron una contracción menor, esto se traduce a un mejor comportamiento volumétrico. La muestra M20F05 presenta menores cambios volumétricos, beneficiados por la lenta reacción de productos de

hidratación, así como microfibras de polipropileno que soportan las fuerzas de tensión generadas al momento de la formación de dichos productos hidratados.

El efecto de la cohesión fue avalado por las inspecciones visuales y los trabajos recientes de Zanotti y Feng, donde se precisa que para analizar la cohesión mediante los criterios de la Teoría de Mohr-Coulomb, la superficie de la zona de interfaz debe ser fina. Debido a que los mecanismos de falla no generaron aplastamiento se le atribuye la falla a la cohesión, sin embargo, la muestra M20F05 presento un ángulo de fricción ( $37.6^\circ$ ) interna 40% mayor que el de referencia, traducido en una fricción en la zona de transición. Dicho valor es menor que el ángulo de fricción interna determinada a la arena caliza no consolidada, mediante la prueba de corte ( $38.07^\circ$ ).

Mediante la prueba de carbonatación acelerada (4%) se recaban valores de profundidad de carbonatación con los cuales, mediante las ecuaciones del Dr. Moreno, se obtienen valores para una  $K_{atm}$  (0.04%). El estándar NMX-C-547-ONNCCE-2018, es utilizado para clasificar a los morteros en cuanto al parámetro de carbonatación encontrando que para M00F00, M20F00 y M20F05, la clasificación los considera de buena calidad y para M00F0, de mediana calidad. Se concluye que para condiciones normales de exposición los morteros son apropiados.

La muestra M20F05, presento mejor comportamiento volumétrico, mayor resistividad eléctrica, apropiado  $K_{atm}$ , clasificándolo como de buena calidad, mejor modulo elástico y según las pruebas de adherencia un comportamiento que incrementa la fricción interna con el sustrato. Se concluye que el uso de estas microfibras poliméricas en sinergia con sustituciones con ceniza volante, para los parámetros de durabilidad mencionados anteriormente se aprecia un beneficio notorio.



## 6.2. Recomendaciones

En base a los resultados obtenidos con esta investigación, se ha comprobado la sensibilidad de la teoría de Mohr-Coulomb, se debe considerar que en otras latitudes los investigadores están optando por evaluaciones de compatibilidad donde las reparaciones son sometidas a estados de esfuerzos similares a los solicitados en las estructuras.

Se recomienda seguir profundizando en esta metodología y recabar información científica que permita generar materiales de reparación sostenibles.

Poner a prueba los materiales de reparación elaborados en elementos que sean sujetos a protocolos de cargas ciclicoreversibles, para evaluar el beneficio de estos morteros de reparación alternativos y sostenibles en aplicaciones de rehabilitación sísmica.

También se recomienda realizar pruebas electroquímicas a elementos dañados y posteriormente rehabilitados con morteros tipo parcheo fibroreforzados con la finalidad de extender el conocimiento de estos ante diversos agentes de deterioro.

## 7. Bibliografía

- ACI. (1997). *Standard Practice for selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete*.
- ACI. (2017). *Concrete air content Test, Pressure method*.
- ACI 546.3. (2014). *Guide to Materials Selection for Concrete Repair*.
- Andrade, C., & Feliu, S. (1989). *Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España*. Madrid, España.
- Askeland, Donald ; Wright, W. (2017). *Ciencia e Ingeniería de materiales*. (Cenagage Learning, Ed.) (7 Ed.).
- ASTM. (1985). *ASTM C 188 Método de Ensayo Estándar para Densidad del Cemento Hidráulico*.
- ASTM International. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars ( Using 2-in . or [ 50-mm ] Cube Specimens ) 1, Chemical Analysis § (2010). <https://doi.org/10.1520/C0109>
- Banthia, N., Zanotti, C., & Sappakittipakorn, M. (2014). Sustainable fiber reinforced concrete for repair applications. *Construction and Building Materials*, 67, 405–412. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.073>
- Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2009). *Mecánica De Materiales 5 Edición*.
- Campos Silva, A., Fajardo, G., & Mendoza Rangel, J. (2016). Estudio del comportamiento del avance de la carbonatación del concreto reforzado en ambiente natural y acelerado. *Concreto y Cemento: Investigación y Desarrollo*, 8(1), 14–34.
- Carol, I.; Pratt, P. (1997). Normal/shear craking model: application to discrete crack analysis. *Engineering Mechanic*.
- Castro-Borges, P., & Mendoza-Rangel, J. M. (2010). Influence of climate change on concrete durability in Yucatan peninsula. *Corrosion Engineering Science and Technology*, 45(1), 61–69. <https://doi.org/10.1179/147842209X12489567719662>
- Castro, P. (2012). *Infraestructura de concreto armado, deterioro y opciones de preservación*. (IMCyC,

Ed.).

- Chousidis, N., Ioannou, I., Rakanta, E., Koutsodontis, C., & Batis, G. (2016). Effect of fly ash chemical composition on the reinforcement corrosion, thermal diffusion and strength of blended cement concretes. *Construction and Building Materials*, 126, 86–97. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.024>
- Courard, L., Piotrowski, T., & Garbacz, A. (2014). Near-to-surface properties affecting bond strength in concrete repair. *Cement and Concrete Composites*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.005>
- Crespo, C. (1969). *Mecánica de Suelos y cimentaciones* (6 ed). Limusa.
- Das, B. M. (1985). *Fundamentos de Ingeniería geotécnica*. Thomson Learning. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Diab, A. M., Abd Elmoaty, A. E. M., & Tag Eldin, M. R. (2017). Slant shear bond strength between self compacting concrete and old concrete. *Construction and Building Materials*, 130, 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.023>
- Duran-Herrera, A., Juarez, C. A., Valdez, P., & Bentz, D. P. (2011). Evaluation of sustainable high-volume fly ash concretes. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.020>
- Emmons, P. H. (2013). *Manual ilustrado de reparación y mantenimiento del concreto*. (IMCYC, Ed.).
- Espeche, A. D., & León, J. (2011). Estimation of bond strength envelopes for old-to-new concrete interfaces based on a cylinder splitting test. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1222–1235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.032>
- Fajardo-San Miguel, F. (2009). Influencia de la carbonatación en morteros de cemento Pórtland y ceniza volante Carbonatation Influence on Fly Ash and Portland Cement Mortars, (1), 39–49.
- Feliu, S; Andrade, C. (1989). *Inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras*.
- Feng, S., Xiao, H., Zhang, R., & Yang, C. (2020). Bond performance between substrate concrete and repair mortar: Effect of carbon fibre and expansive agent. *Construction and Building Materials*, 250, 118830. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118830>
- Flores- Jarquin, J. (2014). *Efecto de la ceniza volante en las propiedades mecánicas y de durabilidad de morteros de reparación expuestos a ambiente industrial y a condiciones de controladas de*

*laboratorio*. Universidad Autonoma de Nuevo Leon.

Flores, J. M. (2014). *Efecto de la ceniza volante en las propiedades mecanicas y de durabilidad de morteros de reparacion expuestos a ambiente industrial y a condiciones controladas de laboratorio*. Universidad Autonoma de Nuevo Leon.

Garcia, F. de J. (2003). *Evaluación de estructuras, técnicas y materiales para su reparación*. (Imcyc, Ed.). Retrieved from <http://www.imcyc.com/revistacyt/oct11/artingenieria.html>

González Cuevas, Ó. M., & Robles, F. (2005). *Aspectos fundamentales del Concreto Reforzado*.

Hornbostel, K., Larsen, C. K., & Geiker, M. R. (2013). Relationship between concrete resistivity and corrosion rate - A literature review. *Cement and Concrete Composites*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019>

Houghton, J; Ding, Y.; Griggs, D. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge, U.K.

Juarez Badillo, Eulalio; Rico Rodriguez, A. (1969). *Mecanica de Suelos Tomo I (Segunda)*. Mexico, D.F.: Limusa-Wiley.

Karahan, O., & Atiş, C. D. (2011). The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Materials & Design*, 32(2), 1044–1049. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.07.011>

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tenesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas*.

Leong, G. W., Mo, K. H., Loh, Z. P., & Ibrahim, Z. (2020). Mechanical properties and drying shrinkage of lightweight cementitious composite incorporating perlite microspheres and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 246, 118410. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118410>

Mays, G. C. (2001). Performance requirements for structural adhesives in relation to concrete strengthening. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 21, 423–429.

Mehta, P. K. y M. P. (1988). *Concreto Estructura, propiedades y materiales*.

Mendoza-Rangel, J.M. , Flores-Jarquín, J. M. (2016). Durabilidad de morteros de reparación sustentables expuestos a ambiente industrial. *Revista ALCONPAT*, 41–51.

Mendoza-Rangel, J. M., & Castro-Borges, P. (2009). Validez de los conceptos y modelos vigentes de vida de servicio de estructuras de hormigón ante los efectos del cambio climático global. situación actual. *Materiales de Construcción*, 59(296), 117–124. <https://doi.org/10.3989/mc.2009.46608>

Moreno, Eric I.; Domínguez, L.; Gerardo, G. (2004). Ingeniería revista académica. *Ingeniería*, 8(2). Retrieved from <http://www.redalyc.org/html/467/46780210/>

- Moreno, E. (1999). *Carbonation of Blended-Cement Concretes*. University of South Florida.
- Morgan, D. R. (1996). Compatibility of concrete repair materials and systems. *Construction and Building Materials*, 10(1 SPEC. ISS.), 57–67. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00060-7](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00060-7)
- Nath, P., & Sarker, P. (2011). Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete. *Procedia Engineering*, 14, 1149–1156. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.144>
- ONNCCE. (2017). *NMX-C- 414-ONNCCE Cementantes Hidraulicos*.
- ONNCCE. (2018). *NMX-C-547-ONNCCE-2018- Industria de la Construccion-Durabilidad -Prediccion de la Despasivación del Acero de Refuerzo en Estructuras de Concreto Expuestas a un Ambiente Urbano-Industrial*.
- Picos, M. (2014). *Durabilidad en el hormigón armado*. Universidad Da Coruña.
- Portland Cement Associaton. (2004). *EB201 –Diseño y Control de Mezclas de Concreto*.
- Puertas, F., Amat, T., Fernández-Jiménez, A., & Vázquez, T. (2003). Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres. *Cement and Concrete Research*, 33(12), 2031–2036. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00222-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00222-9)
- Qian, J., You, C., Wang, Q., Wang, H., & Jia, X. (2014). A method for assessing bond performance of cement-based repair materials. *Construction and Building Materials*, 68. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.048>
- Red DURAR. (2000). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*.
- Sanjuan-Barbudo, Miguel; Castro, P. (2001). *Acción de los agentes quimicos y fisicos sobre el concreto*.
- Wang, J.-Y., Banthia, N., & Zhang, M.-H. (2012). Effect of shrinkage reducing admixture on flexural behaviors of fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 443–450. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.12.004>
- Xie, H. C., Li, G. Y., & Xiong, G. J. (2002). Microstructure model of the interfacial zone between fresh and old concrete. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 17(4), 64–68. <https://doi.org/10.1007/bf02838421>
- Zanotti, C., Banthia, N., & Plizzari, G. (2014). A study of some factors affecting bond in cementitious fiber reinforced repairs. *Cement and Concrete Research*, 63, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.05.008>
- Zanotti, C., & Randl, N. (2019). Are concrete-concrete bond tests comparable? *Cement and Concrete*

*Composites*, 99(February), 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.02.012>

Zanotti, C., Rostagno, G., & Tingley, B. (2018). Further evidence of interfacial adhesive bond strength enhancement through fiber reinforcement in repairs. *Construction and Building Materials*, 160, 775–785. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.140>

Zhang, P., & Li, Q. F. (2013). Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1587–1594. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.10.006>