



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría En Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

ANÁLISIS DEL DESGASTE DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO  
EXPUESTAS A CLORURO DE SODIO

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Ing. José Eduardo Reyes Oloño

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza  
Presidente

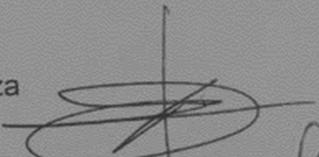
Dra. Teresa López Lara  
Secretario

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca  
Vocal

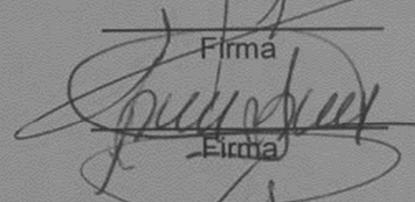
Dr. Francisco Javier García Rodríguez  
Suplente

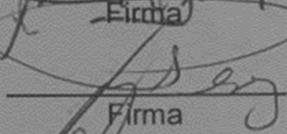
Dra. María de la Luz Pérez Rea  
Suplente

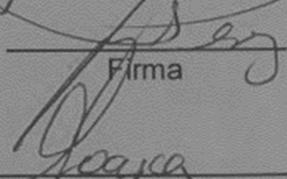
Dr. Manuel Toledano Ayala  
Director de la Facultad

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Firma

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Junio de 2018

## **RESUMEN**

Las estructuras de concreto en las zonas costeras son afectadas por el ataque de sulfatos y debido a su ubicación geográfica son más susceptibles de recibir fenómenos naturales adversos como huracanes y ciclones, los cuales provocan que el concreto se vea afectado por ciclos de humedecimiento y secado, que, sumado a la presencia de cloruro de sodio, originan que el ataque ocasionado por sulfatos sea mayor y con más rapidez. El ataque de sulfato afecta las propiedades mecánicas del concreto, como la pérdida de resistencia y durabilidad de la estructura. Con el uso de un recubrimiento hecho con poliestireno en un estado líquido se reduce el desgaste del concreto causado por el ataque de sulfatos y por lo tanto prolonga la vida útil de la estructura.

(PALABRAS CLAVE: concreto, sulfatos, cloruro de sodio, recubrimiento, ciclos humedecimiento-secado, resistencia, durabilidad).

## **SUMMARY**

**The concrete structures in coastal areas, affected by the attack of sulfates and due to its geographical location are likely to receive adverse natural phenomena such as hurricanes, cyclones, storm surges, which cause the concrete is affected by cycles of wetting and drying, which added to the presence of sodium chloride, cause the external attack by sulfates is greater and more quickly. The sulfate attack affects the mechanical properties of the concrete as the loss of strength and durability of the structure. With the use of a coating made with polystyrene in a liquid state reduces the wear of the concrete caused by the attack of sulfates and therefore extends the life of the structure.**

(Key words: concrete, sulfates, sodium chloride, coating, wetting-drying cycles, resistance, durability).

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico y la oportunidad que me brindó de cumplir una meta más en mi vida.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, y sus profesores por brindarme sus conocimientos y forjarme como un mejor profesionista.

A mi director de tesis, el Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza, por el invaluable apoyo que me brindó a lo largo de esta investigación.

De igual manera agradezco a mi familia por todo su cariño apoyo, consejos y enseñanzas que me han motivado a superarme día a día.

Agradezco a Rocío Adriana Hernández Rubio por todo el apoyo brindado, el cariño y enseñanzas aportadas a mi vida.

# TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	2
SUMMARY .....	3
AGRADECIMIENTOS .....	4
1 INTRODUCCIÓN .....	8
1.1 Antecedentes.....	9
1.2 Descripción del problema.....	11
1.3 Justificación .....	12
1.4 Hipótesis y Objetivos .....	13
2 REVISIÓN DE LITERATURA.....	15
2.1 Ataque de sulfatos .....	15
2.1.1 Ataque físico de sulfatos.....	16
2.2 El mecanismo del ataque de sulfatos.....	16
2.3 Prevención del ataque de sulfatos .....	17
3 METODOLOGÍA .....	23
3.1 Poliestireno en estado líquido .....	23
3.2 Evaluación de la cantidad de poliestireno a utilizar. ....	23
3.3 Evaluación del desgaste ocasionado por cloruro de sodio. ....	23
3.3.1 Prueba número 1 .....	27
3.3.2 Prueba número 2.....	28
3.3.3 Prueba número 3.....	29
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
5 CONCLUSIONES .....	50
6 REFERENCIAS .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Sistema de ciclos de humedecimiento – secado.....	20
Tabla 2.2 Programa experimental de ataque de sulfatos y carga dinámica.....	21
Tabla 3.1 Procedimiento de ciclos de humedecimiento y secado.....	26
Tabla 4.1 Proporciones de recubrimiento.....	31
Tabla 4.2 Resultados prueba número uno.....	33
Tabla 4.3 Comparativa de resistencia a la compresión prueba número uno.....	34
Tabla 4.4 Resultados prueba número dos.....	36
Tabla 4.5 Comparativa de resistencia a la compresión prueba número dos.....	38
Tabla 4.6 Resultados prueba número tres.....	41
Tabla 4.7 Comparativa prueba número tres.....	41

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Contribución media de los ciclones a la media anual de precipitaciones (1988-2013) .....	10
Figura 1.2 Tipos de ataques de cloruro de sodio.....	12
Figura 2.1 Enfoque del experimento.....	18
Figura 2.2 Membrana a prueba de agua colocada en las caras del concreto.....	18
Figura 3.1 Diagrama de flujo prueba número 1.....	28
Figura 3.2 Diagrama de flujo prueba número 2.....	29
Figura 3.3 Diagrama de flujo prueba número 3 .....	30
Figura 4.1 Obtención de recubrimiento .....	31
Figura 4.2 Aplicación de recubrimiento .....	32
Figura 4.3 Comparativa de resistencia a la compresión 28 días.....	33
Figura 4.4 Ciclos de humedecimiento y secado.....	35
Figura 4.5 Evaluación de resistencia a la compresión.....	35
Figura 4.6 Comparativa de resistencia a la compresión 80 días.....	37
Figura 4.7 Falla de especímenes expuestos a ciclos de humedecimiento y secado.....	39
Figura 4.8 Falla de especímenes que no fueron expuestos a ciclos de humedecimiento y secado.....	39
Figura 4.9 Pérdida de recubrimiento.....	40
Figura 4.10 Comparativa de pérdida de resistencia a la compresión prueba número tres.....	42
Figura 4.11 Ataque de sulfatos en especímenes de concreto.....	43
Figura 4.12 Pérdida de recubrimiento en especímenes.....	44
Figura 4.13 Comportamiento del impermeabilizante a través del tiempo.....	45
Figura 4.14 Espécimen a 20 días de ciclos de humedecimiento y secado.....	46
Figura 4.15 Espécimen a 40 días de ciclos de humedecimiento y secado.....	47
Figura 4.16 Espécimen a 60 días de ciclos de humedecimiento y secado.....	48
Figura 4.17 Espécimen a 80 días de ciclos de humedecimiento y secado.....	49

## 1 INTRODUCCIÓN

La historia nos ha demostrado que los huracanes pueden causar una destrucción catastrófica (Bertinelli *et al.*, 2016), pero lo que más se ve afectado son las zonas costeras ya que en estas zonas los huracanes llegan a ser altamente destructivos para las estructuras, los hábitats y las comunidades (Pielke *et al.*, 2008), debido a que en estas zonas el viento de los huracanes no solo causan daño directo sino que además ocasiona marejada la cual produce olas que inundan la zona de tierra y estas producen daños en la estructura relacionados con el agua (Resio y Westerink, 2008), el ataque de sulfatos sumado con otros factores ambientales tales como ataques de sulfatos con ciclos de humedecimiento y secado (Gao *et al.*, 2013), ciclos de congelamiento y descongelamiento (Hooton, 1993), cambios de temperatura y cargas de flexión estática (Bassuoni *et al.*, 2009), estos estudios demuestran que las condiciones del ambiente promueven el ataque de sulfatos y las fallas en la estructura. Para los concretos en ambientes marinos o de costa, los ciclos de humedecimiento y secado pueden acelerar el deterioro del concreto, tal y como ocurre en las zonas de chapoteo y marea. (Gao *et al.*, 2013). Existen muchos factores relacionados con la corrosión del concreto y la mayoría de ellos se benefician de las condiciones ambientales. Para evitar el desgaste causado por el ataque de sulfato es necesario que el concreto sea completamente impermeable (Baltazar *et al.* 2014), es decir, que las partículas de agua no puedan penetrar en la estructura, para conseguirlo es necesario proteger o cubrir el concreto a través del uso de diferentes materiales. Utilizando poliestireno un estado líquido y aplicándolo a la superficie del concreto se puede lograr el impermeable y reducir el desgaste causado por el cloruro de sodio y el desgaste por ciclos de humectación y secado. La corrosión de sulfatos ocasionado por reacción química comparado con la corrosión del concreto ocasionado por la cristalización física tiene gran efecto sobre el deterioro de la durabilidad de las estructuras de concreto, especialmente cuando se da el ataque de sulfatos y ciclos de humedecimiento y secado (Cai *et al.*, 1998; Gross *et al.*, 2008). El ataque de sulfatos es causado por los iones de sulfatos y los productos de hidratación del concreto. El mecanismo de ataque involucra reacciones químicas que producen otros productos secundarios tales como yeso, etringita y taumasita (Oliveira *et al.* 2013; Chinchó *et al.* 1995; Ayora *et al.* 1998; Neville, 2004; Chinchon-Payá *et al.* 2012)

y como mencionan Neville, Skalny *et al.* (2002) y Mehta (2006) estos productos secundarios producen una expansión la cual puede causar agrietamiento y en casos extremos puede conducir a la desintegración del concreto.

## 1.1 Antecedentes

En el Caribe se han registrado grandes pérdidas de vidas humanas y a la propiedad como consecuencia de los huracanes, estos han desempeñado un papel importante en la falta de desarrollo de la región (Mulcahy, 2006), debido a los múltiples daños que ocasiona tanto a las propiedades como a la red carretera.

Las condiciones ambientales afectan el rendimiento mecánico y la durabilidad del concreto en las estructuras (Yu *et al.*, 2016), así mismo los fenómenos naturales pueden hacer que un tramo de la carretera resulte impasable, por lo tanto, hay puntos en la red carretera que algunas veces tienen que ser cerrados, debido a situaciones climáticas adversas (nevadas, tormentas o chubascos), averías físicas en la infraestructura (deslizamiento de taludes e inundaciones) (Jenelius, 2009). Existen varios estudios en la investigación de transporte que se enfocan en la vulnerabilidad de la red carretera ante condiciones climáticas adversas (Koetse y Rietveld, 2009).

Debido a su ubicación geográfica, México es propenso a ser atacado por huracanes que tocan tierra al largo de la costa del Océano Pacífico y el Atlántico, y estos contribuyen a una gran cantidad de la precipitación ciclónica (Figura 1.1), por lo tanto no es sorprendente que la inundación es el principal y el desastre natural más costoso. Esto ha sido observado recientemente durante la incidencia de tormentas tropicales, tales como Manuel en 2013 y Odile en 2014 en la costa del Pacífico y Arlene en 2011 e Ingrid en 2013 en el Golfo de México, las cuales produjeron graves inundaciones que causaron grandes trastornos sociales y pérdidas económicas (Pedrozo-Acuña *et al.*, 2014).

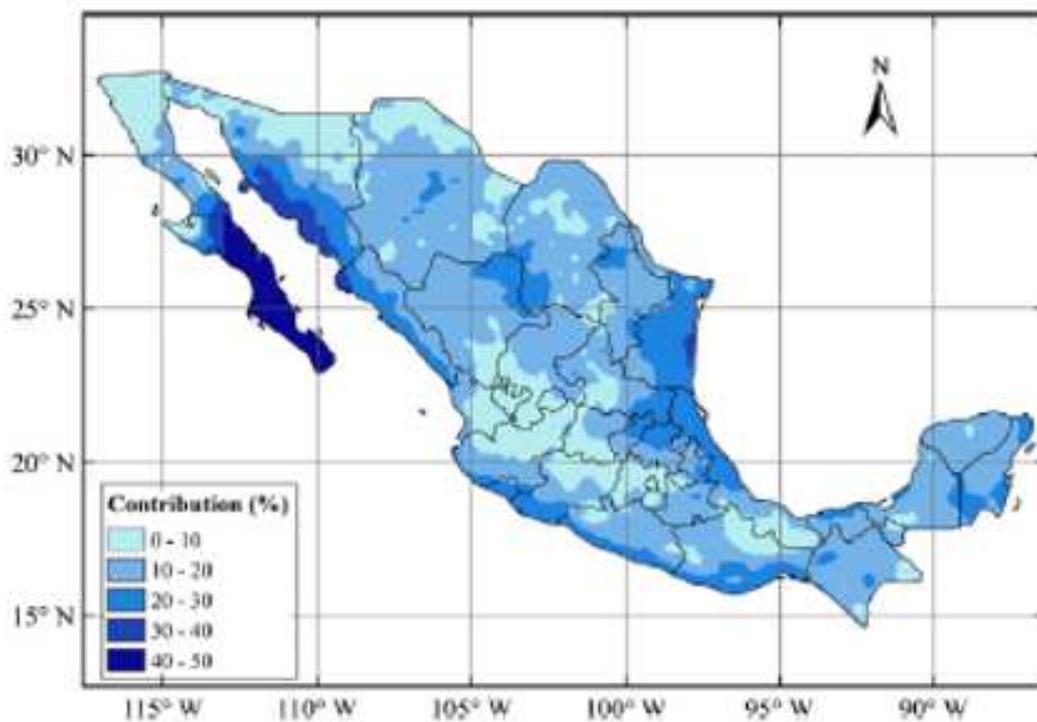


Figura 1.1. Contribución media de los ciclones a la media anual de precipitaciones (1988-2013).  
Fuente Breña Naranjo *et al.* (2015)

Un claro ejemplo es el Huracán Odile el cual el día 15 de septiembre de 2014 toco tierra en Baja California Sur y ocasiono múltiples daños. Mediante oficio número B00.05.05.-666 girado por la Comisión Nacional del Agua, se declaró al estado Baja California Sur como zona de desastre natural ocasionado por el huracán Odile, el cual toco tierra en el estado los días 14 y 15 de septiembre del año 2014, el cual ocasiono daños a la infraestructura terrestres por un monto de \$1,017,854,284.00 (Un mil diecisiete millones ochocientos cincuenta y cuatro mil doscientos ochenta y cuatro pesos 00/100 M.N.). Por lo que es importante considerar que el humedecimiento y secado en ciclos son una de las condiciones más desfavorables en que las estructuras de concreto pueden estar expuestas, estas condiciones son aún más relevantes cuando están presentes sulfatos ya sea en el medio ambiente o en el agua (Neville, 2004). El mejorar la durabilidad de los materiales utilizados en el concreto se ha convertido en una cuestión de suma importancia (Stefan *et al.*, 1995; Marzouk *et al.*, 1994; Detwiler *et al.*, 1989). También es de suma importancia contemplar el análisis de la estructura para de esta manera determinar el estado de la misma.

La degradación del concreto debido a la presencia de sulfuros de hierro en los agregados ha sido ampliamente estudiada en los últimos años, estos sulfatos con presencia de oxígeno y agua son oxidados y pueden causar un ataque interno de sulfatos en el concreto (Schmidt *et al.* 2011; Rodrigues *et al.*, Fernandes *et al.* 2012; Casanova *et al.* 1996; Casanova *et al.* 1997; Wakizaka *et al.* 2003; Espinos *et al.* 2010; Oliveira *et al.* 2013).

Existen muchos factores relacionados con la corrosión del concreto y la mayoría de ellos se ven beneficiados por las condiciones ambientales tales como los diferentes tipos de ataques de sulfatos.

## 1.2 Descripción del problema

Al-Amoudi (1995) señala que las estructuras de concreto se ven afectadas ante la presencia de sales, ya que como menciona Zhou, *et al.*, (2016), el cloruro de sodio es uno de los factores más importantes que influyen en la durabilidad del concreto y al ser un material empleado en puntos vulnerables de la red carretera resulta de suma importancia encontrar la manera de contrarrestar o evitar el deterioro que producen el cloruro de sodio en las estructuras.

Un gran número de estructura ingenieriles, especialmente edificios en las regiones de costas han presenciado severos deterioros estructurales debido al ataque de sulfatos (Bickley *et al.*, 1994; Thomas *et al.*, 2003; Xu, 2004).

El deterioro del concreto debido a la presencia de cloruro de sodio se puede presentar en tres formas como se ilustra en la Figura 1.2

- a) El primer tipo de deterioro es cuando se va comiendo la pasta de cemento hidratado y progresivamente reduciéndolo a masa granular sin cohesión dejando los agregados expuestos. Este tipo de deterioro puede conducir a la reducción del área de sección transversal (pérdida de peso) y disminución de la resistencia.
- b) El segundo tipo de deterioro normalmente se caracteriza por la expansión y agrietamiento.

- c) El tercer tipo de deterioro se caracteriza por el bombardeo de la estructura en capas sucesivas en forma de delaminación.

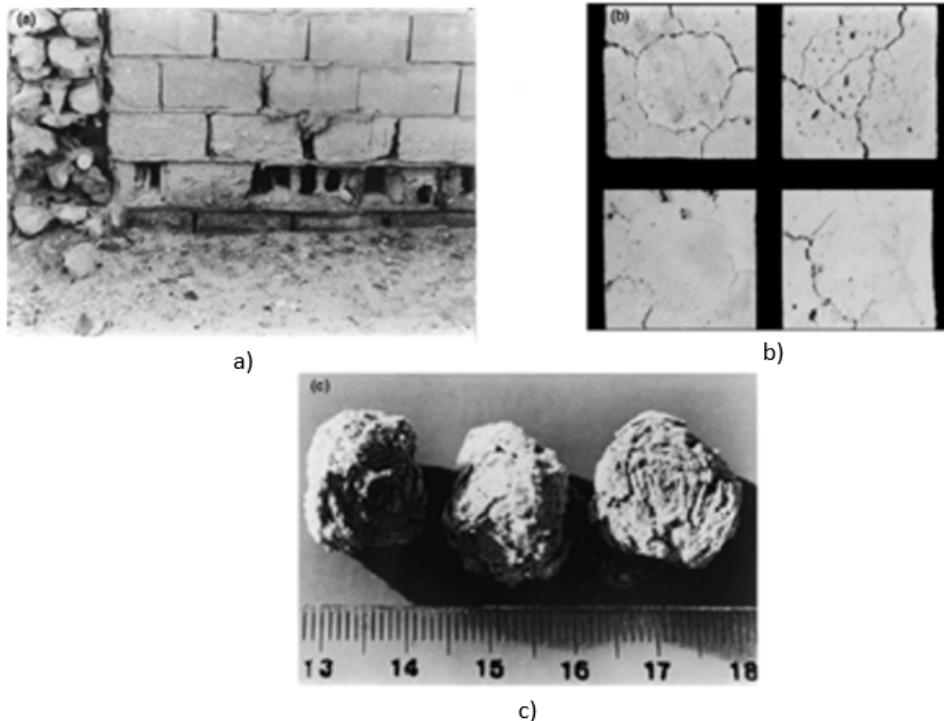


Figura 1.2. Tipos de ataques de cloruro de sodio  
Fuente: Al-Amoudi, (2002).

En las zonas de costas el ataque por cloruro de sodio es común ya que como menciona Collepardi (2003), el ataque tiene tres requisitos para poderse producir, el concreto es altamente permeable, el medio ambiente es rico en sulfatos, y el agua está presente.

### 1.3 Justificación

La Península de Baja California, es la región de México que recibe la mayor cantidad de precipitaciones ciclónicas, con respecto a la precipitación media anual recibe un porcentaje que oscila entre el 55% y 60%. (Jiang y Zipser, 2010; Prat y Nelson, 2013). Por lo tanto, es una de las zonas que más se ve afectada por inundaciones, y debido a su ubicación también se ve afectada por la presencia de agua de mar en las estructuras y esta provoca desgaste en la estructura y afecta sus propiedades mecánicas, disminuyendo su resistencia y su durabilidad.

En septiembre de 2015, el huracán Odile impactó la península de Baja California Sur, el cual ocasionó múltiples daños en el estado y la red carretera se vio severamente afectada

ya que la infraestructura por su ubicación geográfica se ve afectada por la presencia de cloruro de sodio, el cual sumado a ciclos de humedecimiento y secado debilitan la estructura y reducen su durabilidad.

En la red carretera existen puntos vulnerables en los cuales la durabilidad y resistencia de las estructuras de concreto se ven afectadas por el la presencia de cloruro de sodio y ciclos de humedecimiento - secado. Bickley *et al.* (1994) sostienen que las estructuras carreteras ubicadas en regiones de costa han presentado serios problemas de deterioro debido a la presencia de cloruro de sodio. Por lo anterior, Taylor *et al.*, (2006), opinan que es necesario determinar los puntos críticos en la red carretera, donde la ruptura seria particularmente severa (considerando el desgaste de la estructura debido al cloruro de sodio), en específico en zonas costeras tal como sostienen (Resio y Westerink, 2008).

#### 1.4 Hipótesis y Objetivos

##### Hipótesis

Al utilizar membranas de recubrimiento realizadas con material polimérico, se reduce el desgaste ocasionado en las estructuras de concreto por el cloruro de sodio y por lo tanto se minimiza la perdida de resistencia y se aumenta su durabilidad.

##### Objetivo general

Verificar el comportamiento del concreto ante la presencia de cloruro de sodio. Realizar un recubrimiento con material de desperdicio industrial, el cual pueda minimizar el daño ocasionado por el cloruro de sodio al concreto y evaluar la resistencia del mismo después de haber sido sometidos ante este.

##### Objetivos específicos

Evaluar la perdida de resistencia del concreto, ante la presencia de cloruro de sodio.

Verificar si al utilizar un recubrimiento realizado con material de desperdicio industrial, se puede minimizar el daño ocasionado por el cloruro de sodio.

Realizar una comparativa de la pérdida de resistencia del concreto sin recubrimiento y del concreto con recubrimiento, para determinar la factibilidad de utilizar recubrimientos en las estructuras de concreto empleadas en la red carretera.

## 2 REVISIÓN DE LITERATURA

El presente capítulo aborda una reseña referente al ataque de sulfatos, haciendo énfasis en el concepto de ataque de sulfatos y cómo se origina, describiendo los factores que intervienen y el cómo afectan al concreto, también menciona el proceso que lleva a cabo el ataque de sulfatos, así como algunos estudios para evitar dicho ataque en el concreto.

### 2.1 Ataque de sulfatos

El ataque de sulfatos ocurre solo si el concreto experimenta deterioro o daño (Neville, 2004). Para la definición de ataque de sulfatos existen dos pensamientos, el primero nos dice que el ataque de sulfatos existe si hay sulfatos involucrados sin importar la manera en la que se presenten y el segundo imita el concepto de ataque de sulfatos a las consecuencias de las reacciones químicas entre los iones de sulfatos y la pasta de cemento. Si los sulfatos interactúan con el cemento y causan deterioro, este deterioro es considerado como ataque físico o ataque físico de sulfatos, y este puede ocurrir con sales y otros sulfatos (Neville, 2004).

La durabilidad del concreto se define como la habilidad de resistir las acciones del clima, ataques químicos, abrasión, y otros procesos de deterioro. Un concreto durable deberá mantener su forma original, calidad y funcionamiento cuando se exponga a su entorno sin embargo existen varios elementos que afectan la durabilidad del concreto como el agua, ya que puede ejercer como un agente de deterioro, ya sea el agua de mar, agua subterránea, ríos, lagos, lluvia, nieve y vapor. Debido a su tamaño, las moléculas del agua son capaces de penetrar dentro de poros o cavidades extremadamente pequeños (Ortiz, 2013), por lo tanto, la degradación del concreto debido a la entrada de iones de sulfato del ambiente en la estructura es llamada ataque de sulfatos y juega un papel importante en la durabilidad de las estructuras (Schmidt *et al.*, 2009). Biczók (1967) y Figg (1999) mencionan que el ataque por sulfatos externos se puede definir como una reacción entre iones de sulfato y los productos de hidratación del cemento, es una amenaza real para la durabilidad del concreto en un ambiente agresivo. Los iones de sulfato están presentes en el agua potable, agua de mar, suelos y aguas residuales.

Mehta (2000) menciona que el ataque de sulfatos es un fenómeno puramente físico el cual ocurre bajo ciertas condiciones ambientales y una estructura porosa está expuesta a sulfatos y el deterioro se debe a la cristalización de la sal en los poros.

### 2.1.1 Ataque físico de sulfatos

La cristalización de sales se da en los poros cerca de la superficie del concreto, debido a esta cristalización empieza a generarse presión y el deterioro empieza a mostrarse (Mather, 1999). Estudios realizados por Bonnell y Nottage (1939) muestran que cuando la hidratación se da dentro de los poros, las tensiones generadas por la cristalización son suficientemente altas para superar la resistencia del concreto y la sal puede ejercer una fuerza suficiente para provocar la desintegración del material.

De acuerdo con Flatt (2002), el desarrollo de la presión por cristalización requiere una sobresaturación entre los cristales y la pared de los poros. El sulfato de sodio puede causar más daño que cualquier otra sal.

El ingreso de agua y agentes solubles agresivos (iones de cloruro, dióxido de carbono, dióxido de azufre y sulfatos) dentro del concreto, resulta en corrosión y consecuentemente la deterioración de las estructuras de concreto reforzado. (Swamy, 1993; Barbucci, *et al.*, 1997; Diamanti *et al.*, 2013; Brenna *et al.*, 2013; Seneviratne *et al.*, 2000; Delucchi *et al.*, 1997), considerables recursos son requeridos para reparar y rehabilitar la deterioración de las estructuras, y el costo de reparación es algunas veces mayor que la inversión original (Baltazar *et al.*, 2014; Medeiros *et al.*, 2008; Ibrahim *et al.*, 1997; Franzoni *et al.*, 2013).

## 2.2 El mecanismo del ataque de sulfatos

Neville (2004) menciona que el ataque de sulfatos inicia cuando el sulfato de sodio entra en contacto con el hidróxido de calcio (se encuentra en la mezcla de concreto) y estos producen sulfato de calcio, esta reacción puede continuar dependiendo de las condiciones del ambiente. El sulfato de calcio formado reacciona posteriormente con C3A (Aluminato tricalcico) dando como resultado etringita (mineral de sulfato que se forma como un sistema cristalino), es importante señalar que los sulfatos de sodio solo reaccionan con el concreto cuando se encuentran en una solución es decir con presencia

de agua. Por lo tanto, cuando el concreto se encuentra en contacto constante con una solución que contiene sulfatos la formación de etringita va en aumento cristalizándose en los poros del concreto y expandiéndose hasta formar grietas y fracturar el concreto.

Taylor (1997) nos dice que los daños ocasionados por el ataque de sulfatos son la pérdida de resistencia, expansión, grietas y desintegración del concreto.

### 2.3 Prevención del ataque de sulfatos

El agua es la responsable por el proceso de degradación de las estructuras de concreto (Barbucci, *et al.*, 1997; Delucchi *et al.*, 1997; Franzoni *et al.*, 2013), en los años recientes se han utilizado diferentes tratamientos de la protección de la superficie de concreto, para prevenir la penetración de agua dentro de las estructuras, por lo cual la durabilidad de las estructuras de concreto puede ser extendida (Baltazar *et al.*, 2014).

Uno de los tratamientos más comunes para la superficie de concreto son los selladores de concreto basados en silicato de sodio, debido a que estos reaccionan con la mezcla de concreto formando hidratos de calcio-silicato, y por lo tanto prolongan la durabilidad de la estructura, Jian *et al.* (2015) realizaron una investigación acerca del desempeño del sellador de concreto a base de silicato de sodio utilizando especímenes de concreto para medir su viscosidad, tensión superficial, densidad e impermeabilidad. Como resultado obtuvieron que cuando el sellador a base de silicato de sodio penetra en la estructura de concreto reacciona y forma hidratos de silicato de calcio el cual produce un bloqueo en los poros de concreto. La impermeabilidad aumenta considerablemente. Los investigadores concluyeron que utilizar un buen diseño de sellador a base de silicato de sodio es muy efectivo para reducir la permeabilidad de las estructuras de concreto y extender la durabilidad de las mismas.

Mazzotta *et al.* (2017) realizaron un experimento en el cual combinaban distintos materiales para realizar una membrana impermeable la cual se aplicaría a los especímenes de concreto para evaluar sus propiedades, tal y como lo muestra la Figura 2.1.

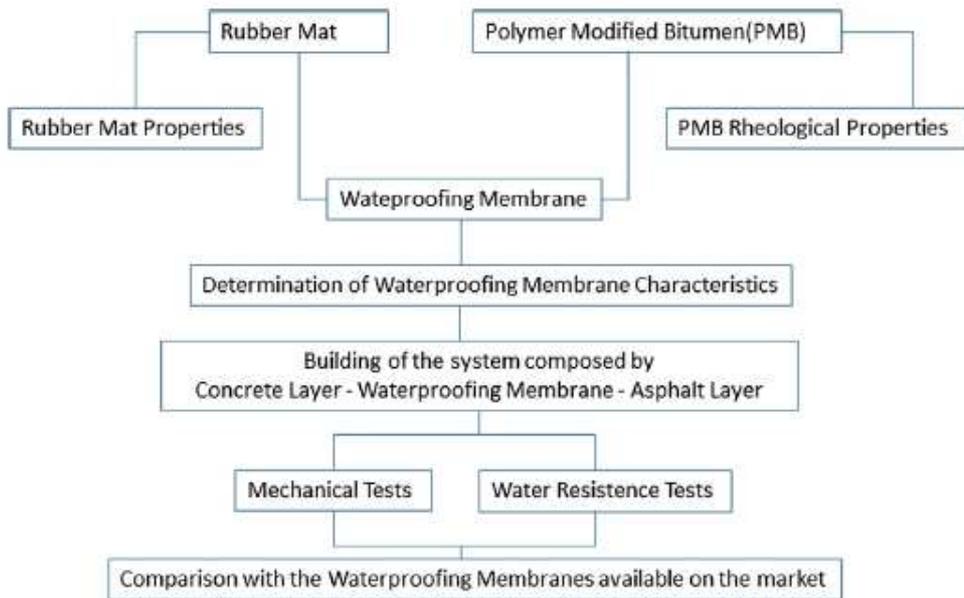


Figura 2.1. Enfoque del experimento,  
Fuente Mazzotta *et al.*, 2017.

Para la experimentación se realizaron cubos de concreto de 15 cm x 15 cm, fue necesario calentar el asfalto para fomentar la impregnación con las caras del concreto, se aplicó con un espesor de 3 mm, se combinaron el caucho y el material bituminoso para realizar la membrana impermeable tal y como lo muestra la Figura 2.2.



Fig. 2.2 Membrana a prueba de agua colocada en las caras del concreto,  
Fuente: Mazzotta *et al.* (2017)

Las estructuras de concreto empleadas en la red carretera se ven afectadas ante la presencia de sales, ciclos de humedecimiento y secado, los cuales afectan la durabilidad de la estructura, reduciendo su resistencia y periodo de vida útil.

Como resultado del experimento determinaron que la membrana realizada con una mezcla de materiales elastómeros sintéticos y naturales, funciona adecuadamente para la impermeabilización de estructuras de concreto, la cual, en comparación con otros materiales existentes, dio resultados similares a los productos existentes en el mercado.

Existen varias investigaciones acerca de cómo se ve afectado el concreto ante la presencia de cloruro de sodio, por ejemplo Bassuoni *et al.* (2015), realizó una investigación llamada Respuesta del concreto ante el ataque físico acelerado de sal, la cual se realizó mediante cilindros de concreto, los cuales después de su procedimiento de curado se dejaron en el laboratorio a 20°C por 48 horas para eliminar el exceso de humedad, se determinaron sus propiedades iniciales (masa y fuerza) antes de ser sometidos a cloruro de sodio, después las muestras se sumergieron parcialmente hasta un tercio de la altura total en recipientes de plástico con tapas herméticas de aire el cual contiene una solución de sulfato de sodio de alta concentración. La alta concentración de sodio utilizada fue para acelerar el procedimiento, la exposición continua por 120 días, en los que cada ciclo (24 horas) se componía de dos etapas consecutivas: una fase de secado de 8 horas ( $40 \pm 2^\circ \text{C}$  y  $35 \pm 5\%$  Humedad relativa), seguido por una etapa de humedecimiento de 16 horas ( $20 \pm 2^\circ \text{C}$  y  $90 \pm 5\%$  de humedad relativa). Como resultado de dicha investigación se observó que la sal penetraba la estructura del concreto dejando los agregados expuestos, reducción de sección transversal y resistencia. La pérdida de masa fue determinada a diferentes edades del concreto.

Así mismo Gao *et al.* (2013) realizaron una investigación acerca de la durabilidad del concreto expuesto a cloruro de sodio sometido a cargas de flexión y ciclos de humedecimiento-secado. Para simular el ataque de sulfatos utilizaron una solución de sulfato de sodio (5% en peso). Primero los especímenes de concreto fueron secados a una temperatura de 60°C durante 45 horas, después fueron puestos a enfriar a temperatura ambiente durante tres horas. Posteriormente para simular el ciclo de humedecimiento-secado fueron sumergidos en la solución de sulfato de sodio por 21

horas y después fueron secados a temperatura ambiente durante 3 horas, ya que el objetivo de este estudio era el de analizar el módulo de elasticidad del concreto en diferentes casos:

- Sulfato de sodio.
- Sulfato de sodio + 40% de la carga máxima a flexión.
- Sulfato de sodio + ciclos de humedecimiento-secado.
- Sulfato de sodio + diferentes porcentajes de la carga máxima a flexión.
- Sulfato de sodio + 40% de la carga máxima a flexión + ciclos de humedecimiento y secado.

Las conclusiones obtenidas de este estudio fueron que los ciclos de humedecimiento-secado y las cargas a flexión pueden acelerar la acumulación de sodio en el concreto y agravar el grado de daño en el concreto debido al cloruro de sodio. La adición de minerales puede aumentar la resistencia química del concreto ante el cloruro de sodio y cargas a flexión, lo cual se debe debido a la reducción del tamaño de poro ya que hace más densa la microestructura.

Zhou *et al.* (2016) realizaron una investigación acerca de los efectos del cloruro de sodio en concretos confinados con polímeros de fibras reforzadas (PFR). Para la cual utilizaron 30 cilindros de concreto de 150 mm de diámetro y una altura de 300 mm, los cuales estaban diseñados para alcanzar una fuerza a la compresión a los 28 días de 41.6 MPa. Para el proceso de corrosión acelerada fue diseñado un procedimiento que simulara las condiciones de las regiones de costa. La temperatura alta se definió como 40°C y la duración de los ciclos de humedecimiento y secado fueron establecidos de 12 horas. Los parámetros específicos de la prueba se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Sistema de ciclos de humedecimiento - secado

<b>Proceso del Ciclo</b>	<b>Parámetros específicos</b>
Humedecimiento	Humedecer en una solución de sulfato de sodio por 9 horas a 25°C
Secado en cuarto de temperatura ambiente	Secado por 1 hora
Secado a temperatura alta	Secado por 1 hora a 40°C
Enfriamiento natural	Enfriado natural por 1 hora

Fuente: Zhou *et al.* (2016)

Los cilindros de concreto se dividieron en dos grupos, el primer grupo fue utilizado para evaluar el cambio en las propiedades mecánicas después de 30, 60, 90 y 120 días de estar sometidos al proceso de corrosión acelerada. El segundo grupo fue envuelto con dos capas de PFR, para evaluar el efecto del confinamiento con PFR de las propiedades mecánicas de columnas de concreto corroídas por cloruro de sodio, al aplicar la carga axial se observó que al inicio la fuerza de los cilindros aumento, esto debido a la cristalización del sulfato del cloruro de sodio en los poros del concreto, pero con el paso del tiempo esta cristalización aumento la tensión en los poros y produjo fracturas por lo que la resistencia a la compresión bajo significativamente, los cilindros de concreto confinados con PFR, aumentaron la resistencia a la compresión y el confinamiento originó que el desgaste por cloruro de sodio fuera minimizado.

Yu *et al.* (2016) realizó una investigación con el objetivo de ampliar el conocimiento del comportamiento del cemento y el concreto bajo la presencia de cloruro de sodio y cargas dinámicas. Para llevar a cabo su investigación se realizaron muestras de concreto de 300 x 100 x 100 mm, las cuales se sumergieron en un recipiente de acero inoxidable el cual estaba lleno de solución de sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). El programa de carga detallada fue controlado por un sistema central, la carga se mantuvo durante dos minutos y el proceso de reducción de carga se realizó en 2 minutos, por lo tanto son cuatro minutos por ciclos y 360 ciclos al día. Con el fin de evitar los efectos por temperatura, la temperatura ambiente ( $20^\circ \pm 3^\circ\text{C}$ ) fue controlada por aire acondicionado los porcentajes de carga a emplear y el porcentaje de solución de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , se realizaron como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Programa experimental de ataque de sulfatos y carga dinámica

Número de muestra	Relación agua-cemento	Condiciones experimentales		Tiempo (días)
		Concentración $\text{Na}_2\text{SO}_4$ (%)	Carga dinámica $S_{\min}$ y $S_{\max}$	
1	0.38	5	0, 0	30-180
2	0.38	10	0, 0	30-180
3	0.38	5	10, 60	30-180
4	0.38	10	10, 60	30-180
5	0.38	10	10, 20	30-180
6	0.38	10	10, 40	30-180

Fuente: Yu *et al.* (2016)

Se observó que la muestra uno mantuvo constante su resistencia en los 180 días, mientras que la muestra dos aumentó su fuerza hasta llegar a un punto máximo a los 120 días y después bajo drásticamente esto debido a que como menciona Irassar (1990) existe un parámetro llamado tiempo de fractura el cual llega aproximadamente a los 120 días. Para las muestras que sí estuvieron sometidas a cargas dinámicas se observó que mientras mayor era la carga, mayor era la pérdida de resistencia, y a partir de los 30 días se observó cómo van perdiendo resistencia por lo tanto el parámetro llamado tiempo de fractura llega de manera más temprana.

Se puede concluir que la carga dinámica promueve la velocidad del daño ocasionado por cloruro de sodio aumentando la profundidad de estos y elevando el daño que ocasionan. Ya que la carga dinámica hace que las fracturas se presenten de manera más temprana en el concreto.

### 3 METODOLOGÍA

En el presente capítulo se describe el proceso metodológico que se realizó para probar la hipótesis, y cumplir con los objetivos planteados con anterioridad.

#### 3.1 Poliestireno en estado líquido

La obtención del poliestireno en estado líquido se realizó utilizando dos reactivos, acetona y acetato de etilo. Se colocó en un vaso de precipitados 200 ml de acetato y 200 ml de acetona y utilizando un agitador magnético se procedió a colocar el poliestireno en pequeñas partes para disolver y obtenerlo en estado líquido.

#### 3.2 Evaluación de la cantidad de poliestireno a utilizar.

Para la realización del impermeabilizante con poliestireno en estado líquido, se buscó la dosificación adecuada y la cantidad de poliestireno necesaria para obtener el mejor desempeño, utilizando 50, 75, 100 y 125 gramos para la elaboración del impermeabilizante y se utilizaron cilindros de 10 x 20 cm para evaluar su desempeño, a los cuales se le colocó el impermeabilizante elaborado con diferentes cantidades de poliestireno y se evaluó el nivel de absorción de agua con y sin impermeabilizante, la metodología consistió en pesar el espécimen seco sin recubrimiento, después humedecer por 24 horas y pesar el espécimen húmedo, se dejó secar el espécimen para posteriormente colocar el recubrimiento y se pesó en seco con recubrimiento y para finalizar se dejará saturando durante 24 horas para posteriormente pesarlo húmedo y así obtener su porcentaje de absorción.

#### 3.3 Evaluación del desgaste ocasionado por cloruro de sodio.

Para el envejecimiento prematuro se utilizaron ciclos de humedecimiento y secado de 24 horas cada uno, el ciclo de humedecimiento fue con agua con una solución de 10% de cloruro de sodio, con el objetivo de simular las condiciones de intemperismo a las que son sometidas las estructuras de concreto en las zonas de costa.

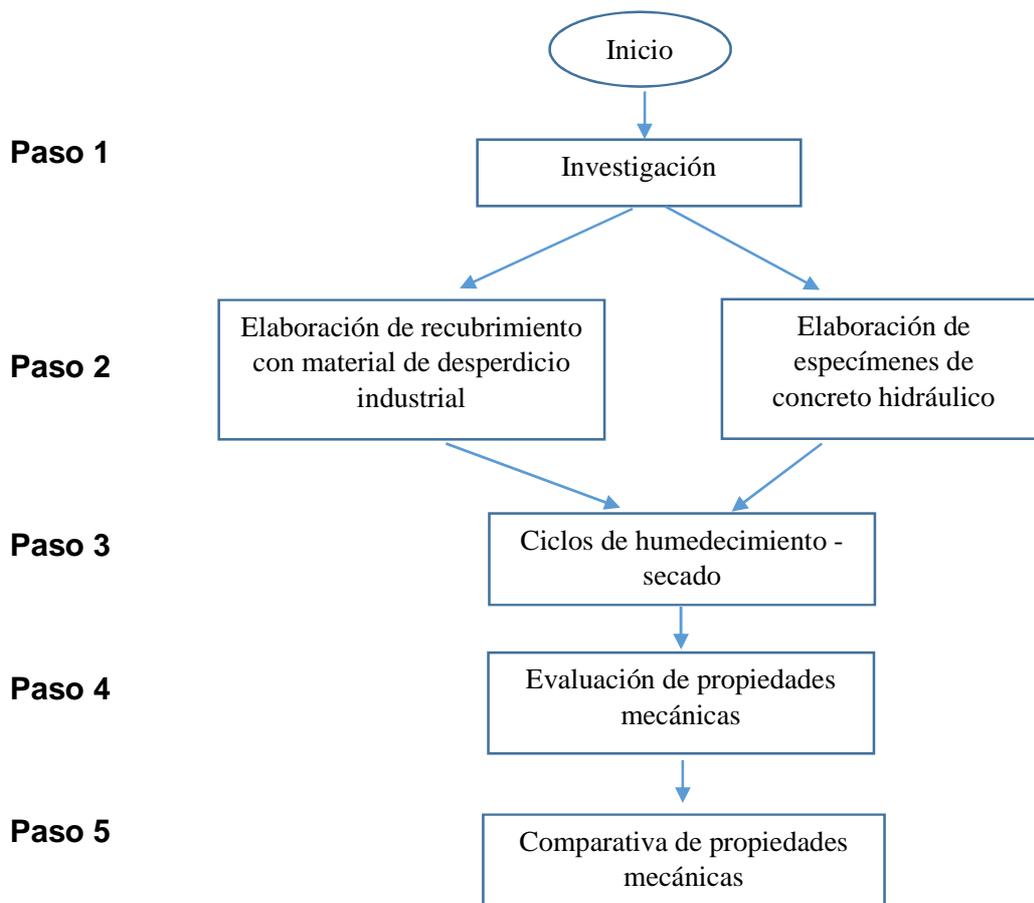
Se utilizaron especímenes de concreto de 15 x 30 cm, los cuales se dividieron en tres grupos:

- N71: Especímenes de concreto a los cuales se les evaluó la resistencia a la compresión al cumplir los días de curado, sin ser sometidos a sometidos ciclos.

Este grupo se tomó como la resistencia base que debe tener un concreto sin ser expuesto a condiciones de intemperismo.

- R71: Especímenes de concreto a los cuales les fue colocado impermeabilizante y es fue evaluada su resistencia a la compresión después de haber sido sometidos a ciclos de humedecimiento y secado. En este grupo sirvió para conocer si el impermeabilizante minimiza el daño ocasionado por cloruro de sodio.
- S71: Especímenes de concreto los cuales se les evaluó la resistencia a la compresión después de ser sometidos a ciclos de humedecimiento y secado. Los datos obtenidos de este grupo sirvieron para conocer el cómo el cloruro de sodio afecta la resistencia y durabilidad del concreto expuesto a condiciones de intemperismo.

. La normativa por utilizar será la vigente por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes.



## Paso 6

Análisis de resultados

## Paso 1

Se realizó investigación para conocer acerca del estado del arte de las estructuras de concreto expuestas a cloruro de sodio.

## Paso 2

Para la elaboración de muestras de concreto hidráulico se buscó que los agregados y el agua cumplan con la normativa establecida por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT):

- Calidad de Agregados Pétreos para Concreto Hidráulico: N-CMT-2-02-002/02.
- Calidad del Agua para Concreto Hidráulico: N-CMT-2-02-003/02

Los especímenes de concreto se realizaron en cilindros de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, tal y como lo indica la normativa utilizada por la SCT:

- Muestreo de Concreto hidráulico: M-MMP-2-02-055/06

Para realizar el recubrimiento se utilizó poliestireno, el cual será producto de desperdicio industrial. El poliestireno será sometido a un proceso en el que obtendremos poliestireno líquido, el cual será aplicado en capas utilizando brochas para realizar una buena distribución del mismo.

## Paso 3

Para simular las condiciones ambientales a las que se encuentran sometidas las estructuras de concreto en la red carretera y el envejecimiento de manera prematura, se realizaron ciclos de humedecimiento con una solución de cloruro de sodio y el secado se realizará en cuarto con temperatura controlada, tal y como se describe en la Tabla 3.1

Tabla 3.1.- Procedimiento de ciclos de humedecimiento y secado

Proceso	Descripción
Humedecimiento	Humedecer en una solución de cloruro de sodio por 24 horas
Secado en cuarto de temperatura ambiente	Secado por 24 horas

Fuente: Elaboración propia

#### **Paso 4**

La evaluación de la resistencia a compresión se realizó en una prensa universal, y el procedimiento será como el que indica la norma utilizada por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes M-MMP-2-02-058-04:

1. Se realizó el cabeceo de los cilindros con azufre con la finalidad de eliminar irregularidades en las bases del cilindro.
2. Se limpiaron las superficies de la capa superior e inferior de la prensa, así como los extremos de los especímenes de concreto se colocará el espécimen en la capa inferior de la prensa alineando el eje del espécimen con la capa superior.
3. Se aplicó la carga con una velocidad uniforme y continua sin producir impacto ni pérdida de carga. La velocidad deberá estar dentro del intervalo de 84 a 210 kg/cm<sup>2</sup> aproximadamente.

Para determinar la resistencia a la compresión simple se utilizará la siguiente ecuación:

$$R = \frac{10P}{A}$$

Dónde:

$R$ = Resistencia a la compresión simple (MPa).

$P$ = Carga máxima (kN).

$A$ = Área promedio de la sección transversal del espécimen (cm<sup>2</sup>).

#### **Paso 5**

Para el análisis de resultados las muestras de concreto se agruparán en 3 grupos:

- 1) N71: Resistencia base.
- 2) R71: Resistencia del espécimen con impermeabilizante expuesto a ciclos de humedecimiento y secado.
- 3) S71: Resistencia del espécimen sin impermeabilizante expuesto a ciclos de humedecimiento y secado.

Se realizó una comparativa utilizando un gráfico donde en el eje de las abscisas se registró la Resistencia a la compresión (MPa) obtenida y en el eje de las ordenadas el número de días a los que fue realizado el ensaye.

### **Paso 6**

Se analizaron las propiedades mecánicas de los especímenes de concretos para evaluar cómo afecta el cloruro de sodio a la estructura y determinar si es factible utilizar recubrimientos para minimizar el daño ocasionado.

#### 3.3.1 Prueba número 1

La prueba 1 consistió en realizar especímenes de concreto y someterlos a un periodo corto de tiempo de ciclos de humedecimiento y secado, para observar el comportamiento del desgaste ocasionado por cloruro y analizar si el poliestireno en estado líquido funciona de manera correcta como impermeabilizante y ayuda a minimizar el daño ocasionado por sulfatos.

- Cilindros de concreto de una resistencia de 150 kg/cm<sup>2</sup>.
- Días de curado 7, 14, 21 y 28 días.
- Ciclos de humedecimiento y secado de 24 horas cada uno.
- 28 días de ciclos de humedecimiento y secado.

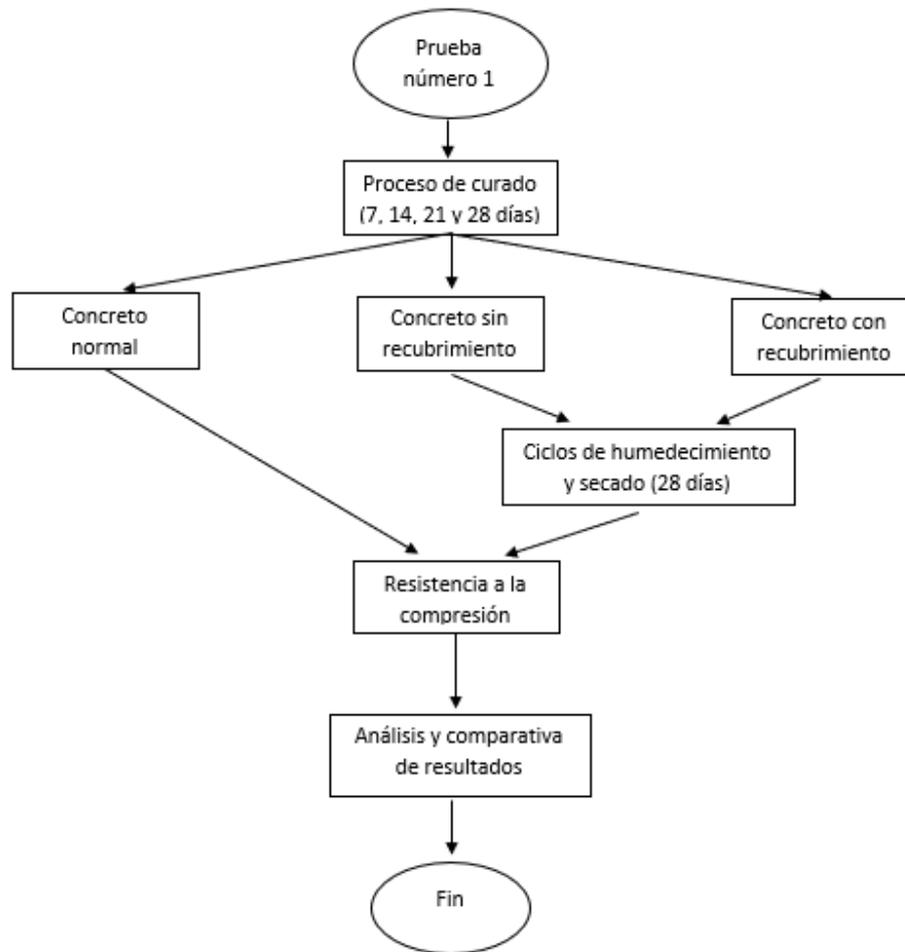


Figura 3.1 Diagrama de flujo prueba número 1

### 3.3.2 Prueba número 2

La prueba 2 consistió en realizar especímenes de concreto y someterlos a un periodo largo de tiempo de ciclos de humedecimiento y secado, para observar el comportamiento del desgaste ocasionado por cloruro y analizar si el poliestireno en estado líquido funciona de manera correcta como impermeabilizante en un periodo de tiempo mayor y ayuda a minimizar el daño ocasionado por sulfatos.

- Cilindros de concreto de una resistencia de 200 kg/cm<sup>2</sup>.
- Días de curado 7, 14, 21 y 28 días.
- Ciclos de humedecimiento y secado de 24 horas cada uno.
- 80 días de ciclos de humedecimiento y secado.

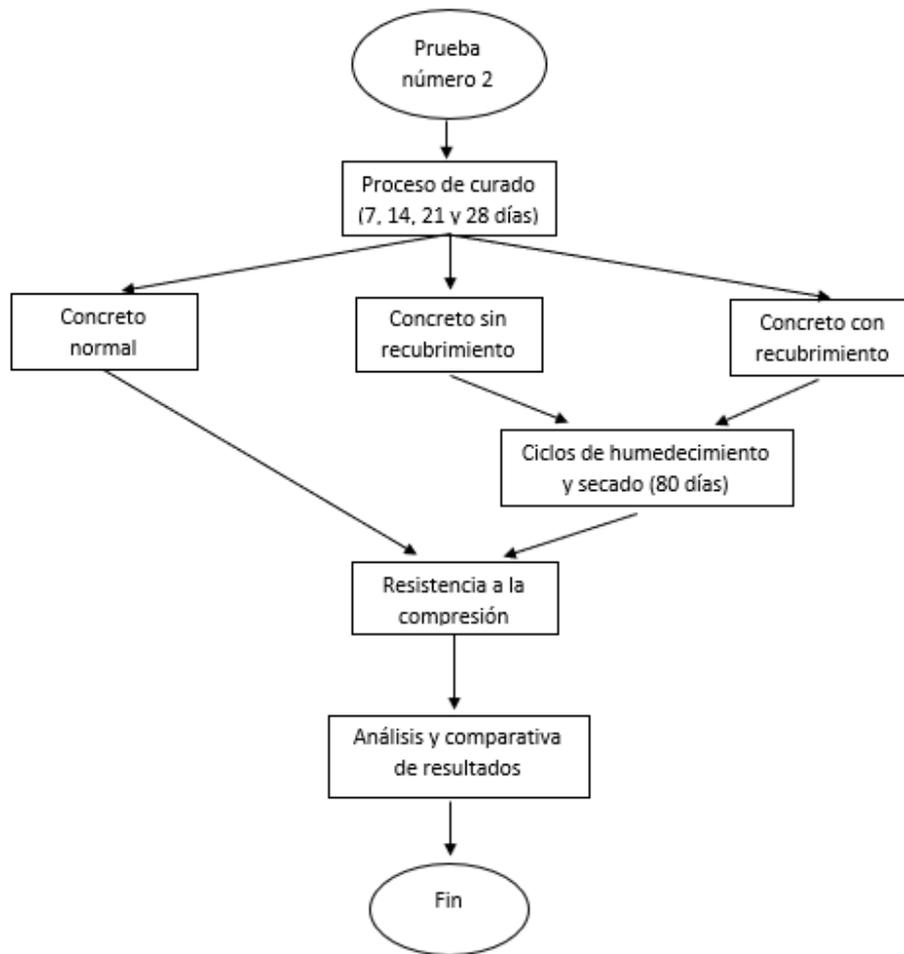


Figura 3.2 Diagrama de flujo prueba número 2

### 3.3.3 Prueba número 3.

Para la prueba número tres se analizó el desempeño del impermeabilizante buscando encontrar el tiempo en el que el poliestireno se desprende y deja de funcionar como barrera protectora para el desgaste de cloruro de sodio.

Para la prueba se tomaron en cuenta las siguientes características:

- Cilindros de 10 x 20 cm
- Resistencia base de 150 kg/cm<sup>2</sup>.
- Tres grupos: normal, con impermeabilizante y sin impermeabilizante.
- 7 días de curado.
- Los días de ciclos fueron: 20, 40, 60, 80 y 100 días.

Se anotó la resistencia a la compresión de cada uno de los especímenes y para la interpretación de los resultados se utilizó un gráfico, en el cual en el eje de las abscisas se anotaron los días de los ciclos y en de las ordenadas la resistencia, se dividieron los especímenes en dos grupos con la finalidad de comparar el comportamiento de los especímenes con impermeabilizante y sin impermeabilizante.

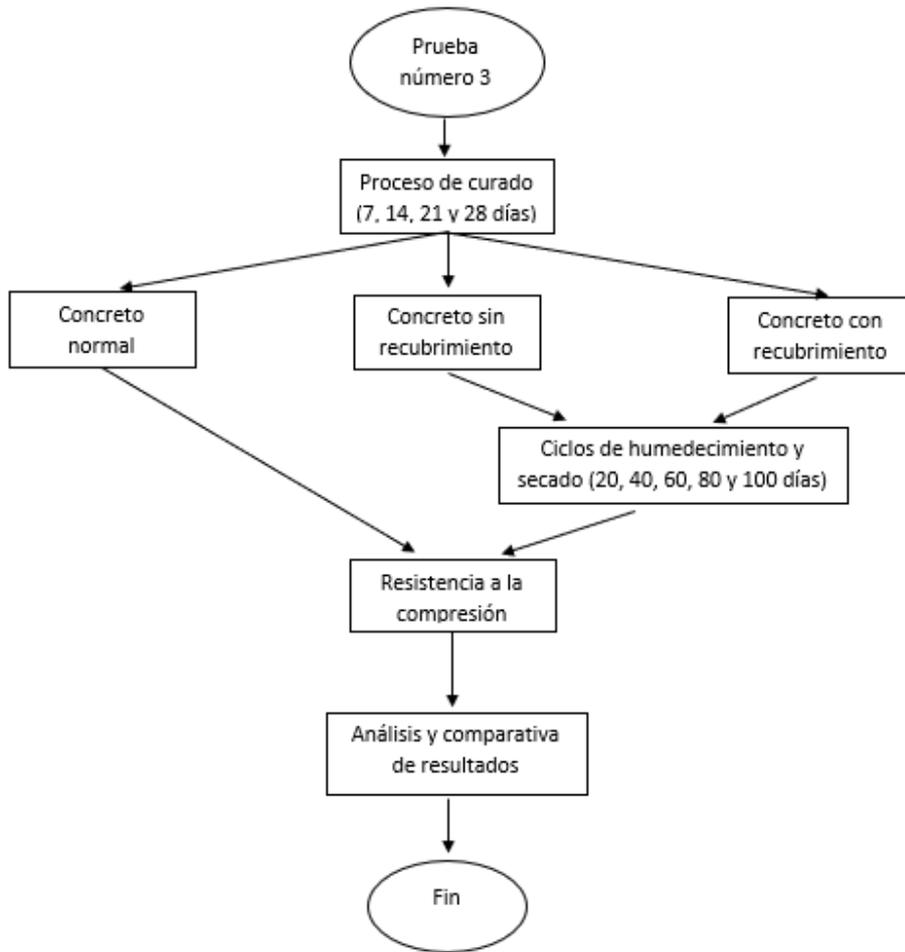


Figura 3.3 Diagrama de flujo prueba 3

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La obtención del recubrimiento se realizó utilizando un agitador magnético y una solución de 200 ml de acetona y 200 ml de acetato de etilo (figura 4.1), así como las cantidades de poliestireno a evaluar, como se muestran en la Tabla 4.1

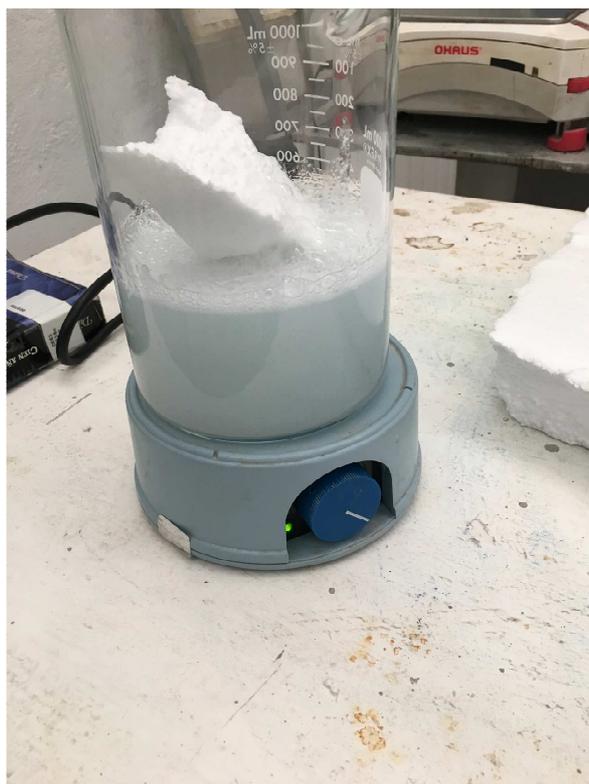


Figura 4.1 Obtención de recubrimiento

Tabla 4.1. Proporciones recubrimiento

Muestra	Cantidad de poliestireno en gramos	sin impermeabilizante			Con impermeabilizante		
		peso seco	peso húmedo	% humedad	peso seco	peso húmedo	% humedad
1	50	2.81	3.08	9.61%	3.01	3.28	8.97%
2	50	2.83	3.1	9.54%	3.03	3.29	8.58%
1	75	2.87	3.11	8.36%	3.07	3.3	7.49%
2	75	2.8	3.04	8.57%	3.01	3.24	7.64%
1	100	2.8	3.05	8.93%	3.01	3.11	3.32%
2	100	2.88	3.13	8.68%	3.08	3.18	3.25%

Fuente: Elaboración propia

Al realizar el impermeabilizante con 125 gr de poliestireno, se obtuvo un material que se desprendió de los cilindros de concreto.

Debido a los resultados obtenidos la cantidad de óptima de poliestireno a utilizar es de 100 gr, para producir un total de 500 ml de recubrimiento en cuál será aplicado con una dosificación de 1 a 1.2 lts/m<sup>2</sup>. El poliestireno en estado líquido tiene una densidad de 890.40 kg/m<sup>3</sup>, se aplicó en capas utilizando una brocha tal y como se muestra en la figura 4.2,



Figura 4.2 Aplicación de recubrimiento

Se realizaron las primeras pruebas en las cuales se tomó en cuenta lo siguiente:

- Concreto de resistencia 150 kg/cm<sup>2</sup>
- Ciclos de humedecimiento secado de 28 días, 24 horas de humedecimiento con 24 horas de secado.
- La proporción de cloruro de sodio utilizada fue de 10% en peso de agua.

Los especímenes se dividieron en:

- 1) N71: Concreto sin recubrimiento y sin ser expuesto a ciclos de humedecimiento y secado.
- 2) S71: Concreto sin recubrimiento expuesto a ciclos de humedecimiento y secado.

3) R71: Concreto con recubrimiento expuesto a ciclos de humedecimiento y secado.

Los tiempos de curado de los especímenes fueron de 7, 14, 21 y 28 días.

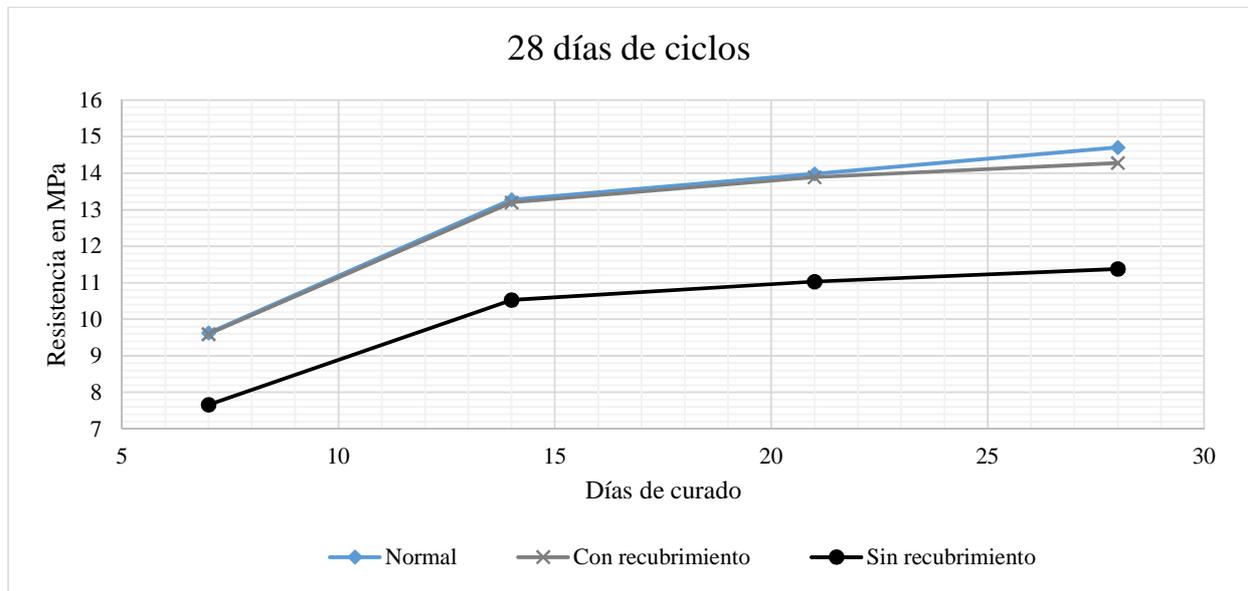
Tabla. 4.2 Resultados prueba número uno

Días de curado	Especimen	Resistencia (Mpa)	Especimen	Resistencia (Mpa)	Especimen	Resistencia (Mpa)
7	N71	9.6123	S71	7.679	R71	9.582
7	N72	9.653	S72	7.634	R72	9.589
14	N141	13.312	S141	10.584	R141	13.231
14	N142	13.254	S142	10.468	R142	13.169
21	N211	13.946	S211	10.956	R211	13.847
21	N212	14.026	S212	11.107	R212	13.93
28	N281	14.815	S281	11.506	R281	14.357
28	B282	14.606	U282	11.254	C282	14.207

Fuente: Elaboración propia

Al finalizar los ciclos de humedecimiento y secado se evaluó la resistencia a la compresión de los especímenes de concreto y se anotaron los resultados en la Tabla 4.2, con la finalidad de realizar un gráfico donde se pueda observar el comportamiento de cada espécimen y realizar una comparativa.

Figura 4.3.- Comparativa de resistencia a la compresión 28 días



Fuente: Elaboración propia.

El poliestireno en estado líquido utilizado como impermeabilizante se desempeña de manera correcta minimizando el desgaste de las estructuras de concreto ocasionado por los ciclos de humedecimiento y secado y el cloruro de sodio, mientras que los especímenes a los cuales no se les aplicó el impermeabilizante presentaron una pérdida de resistencia y desgaste del concreto, como se puede observar en la Figura 4.3

Para realizar una comparativa del comportamiento de cada grupo de especímenes de concreto se determinó la diferencia de resistencia a la compresión del grupo de especímenes de concreto normal con el grupo al que le fue aplicado el recubrimiento y con los del grupo de sin recubrimiento, tal y como se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Comparativa de resistencia a la compresión prueba número uno

Días de curado	Normal – con recubrimiento		Normal – sin recubrimiento	
	Diferencia (MPa)	%	Diferencia (MPa)	%
7	0.0303	0.32%	1.9333	20.18%
7	0.064	0.66%	2.019	21.06%
14	0.081	0.61%	2.728	20.62%
14	0.085	0.64%	2.786	21.16%
21	0.099	0.71%	2.99	21.59%
21	0.096	0.68%	2.919	20.95%
28	0.458	3.09%	3.309	23.05%
28	0.399	2.73%	3.352	23.59%

Fuente: Elaboración propia.

Se evaluó la pérdida de resistencia a la compresión. Los especímenes de concreto con recubrimiento mostraron un comportamiento similar al del concreto normal, presentando diferencia mínima, sin embargo, los especímenes sin recubrimiento que fueron expuestos a ciclos de humedecimiento y secado con agua con cloruro de sodio mostraron una pérdida de resistencia significativa que va alrededor del 20 al 23%, Por lo tanto, el desempeño del recubrimiento fue satisfactorio.



Fig. 4.4. Ciclos de humedecimiento y secado

Los ciclos de humedecimiento y secado se realizaron cada 24 horas, con una solución de agua con 10% de cloruro de sodio, tal y como lo muestra en la Figura 4.4



Fig. 4.5 Evaluación de resistencia a la compresión

Se evaluaron los especímenes de compresión utilizando la maquina universal, como se muestra en le Figura 4.5.

Prueba número 2.

- Concreto de resistencia 200 kg/cm<sup>2</sup>
- Ciclos de humedecimiento secado de 80 días, 24 horas de humedecimiento con 24 horas de secado.
- La proporción de cloruro de sodio utilizada fue de 10% en peso de agua.

Los especímenes se dividieron en:

- 4) N71: Concreto sin recubrimiento y sin ser expuesto a ciclos de humedecimiento y secado.
- 5) S71: Concreto sin recubrimiento expuesto a ciclos de humedecimiento y secado.
- 6) R71: Concreto con recubrimiento expuesto a ciclos de humedecimiento y secado.

Las edades de los especímenes fueron de 7, 14, 21 y 28 días.

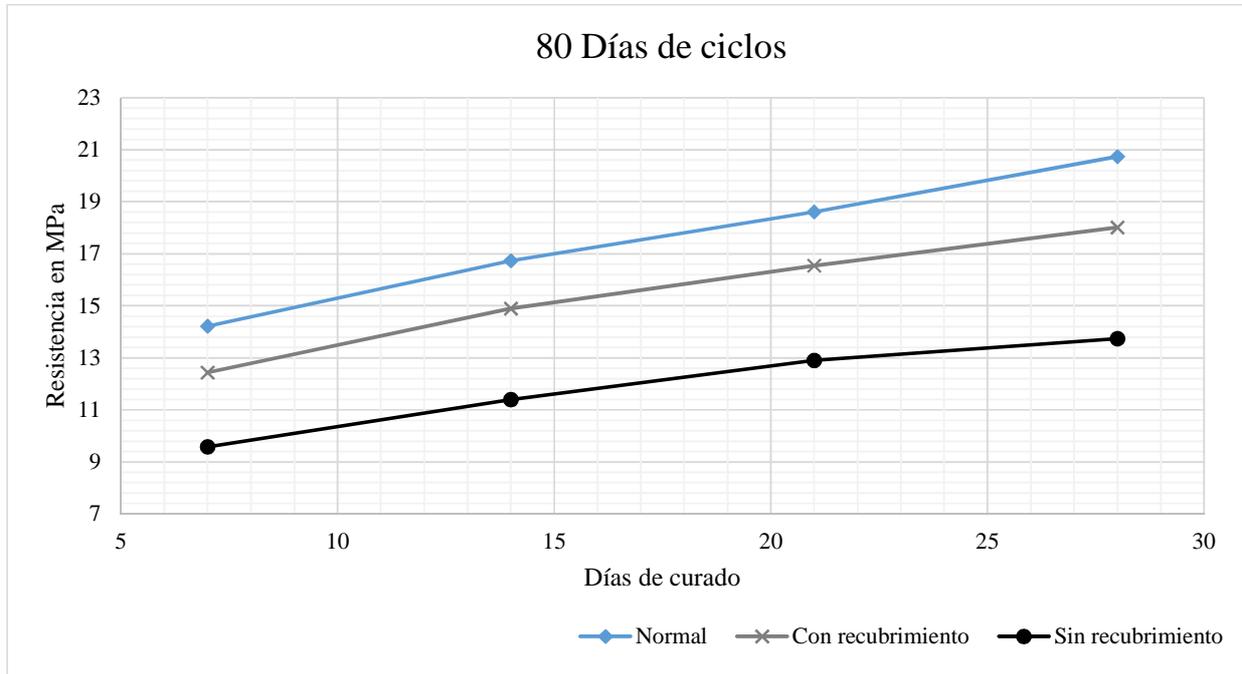
Tabla 4.4 Resultados prueba número 2.

Días de curado	Especímen	Resistencia (Mpa)	Especímen	Resistencia (Mpa)	Especímen	Resistencia (Mpa)
7	N71	13.933	S71	9.036	R71	11.896
7	N72	14.480	S72	10.116	R72	12.987
14	N141	16.801	S141	11.354	R141	14.934
14	N142	16.683	S142	11.442	R142	14.856
21	N211	18.747	S211	12.707	R211	16.534
21	N212	18.467	S212	13.101	R212	16.555
28	N281	20.489	S281	13.157	R281	17.236
28	N282	20.985	S282	14.328	R282	18.777

Fuente: Elaboración propia

Se aumentaron los días de ciclos de humedecimiento y secado para evaluar el desempeño del poliestireno utilizado como impermeabilizante en largos periodos de tiempo, al finalizar los ciclos se evaluó la resistencia a la compresión y se anotaron los resultados en la Tabla 4.4.

Figura 4.6.- Comparativa de resistencia a la compresión



Fuente: Elaboración propia

Al realizar el gráfico comparativo, Figura 4.6, se observa que los especímenes de concreto a los que no se les aplicó el impermeabilizante presentaron una pérdida de resistencia mayor que los especímenes que sí tenían impermeabilizante. El impermeabilizante funciona de manera adecuada por un tiempo, después existieron desprendimientos lo que ocasionó que el cloruro de sodio penetrara en el concreto y ocasionara daños. Para realizar una comparativa del comportamiento de cada grupo de especímenes de concreto se determinó la diferencia de resistencia a la compresión del grupo de especímenes de concreto normal con el grupo al que le fue aplicado el recubrimiento y con los del grupo de sin recubrimiento, tal y como se muestra en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Comparativa resistencia a la compresión.

Días de curado	Normal – con recubrimiento		Normal – sin recubrimiento	
	Diferencia	%	diferencia	%
7	2.037	14.62%	4.897	41.17%
7	1.493	10.31%	4.364	33.60%
14	1.867	11.11%	5.447	36.47%
14	1.827	10.95%	5.241	35.28%
21	2.213	11.80%	6.04	36.53%
21	1.912	10.35%	5.366	32.41%
28	3.253	15.88%	7.332	42.54%
28	2.208	10.52%	6.657	35.45%

Fuente: Elaboración propia

En la prueba número dos se aumentaron los días de ciclos con la finalidad de observar el desempeño del recubrimiento a mayor tiempo de exposición a ciclos de humedecimiento y secado en agua con cloruro de sodio.

Los resultados mostraron que los especímenes con recubrimiento expuesto a ciclos de humedecimiento y secado presentaron una resistencia menor que los especímenes que no fueron expuestos a ciclos de humedecimiento y secado, mientras que la resistencia presentada por los especímenes sin recubrimiento y expuestos a ciclos se vio muy afectada comparada con los especímenes de concreto que no fueron expuestos a dichas condiciones.

Los especímenes expuestos al ataque de sulfatos mediante ciclos de humedecimiento y secado al ser ensayados a la compresión fallan a manera de desmoronamiento, es decir, debido al ataque de sulfatos el concreto pierde su resistencia lo que lo hace frágil y se desmorona al ser aplicada la carga, tal y como se muestra en la Figura 4.7, mientras que los especímenes que no fueron expuestos a ciclos de humedecimiento y secado no presentan desmoronamiento, fallan por una grieta longitudinal como se muestra en la Figura 4.8.



Fig. 4.7. Falla de especímenes expuestos a ciclos de humedecimiento y secado



Fig 4.8. Falla de especímenes que no fueron expuestos a ciclos de humedecimiento y secado



Fig. 4.9. Pérdida de recubrimiento

El aumentar los días de ciclos el recubrimiento se iba desgastando y desprendiendo tal y como se muestra en la Figura 4.9, permitiendo que el cloruro de sodio penetrara en el concreto y permitiera que el ataque de sulfatos afectara al concreto.

Prueba número tres:

Se realizaron 12 especímenes de concreto los cuales se separaron en tres grupos:

- Normal
- sin impermeabilizante
- con impermeabilizante.

El primer grupo se utilizó como medida base para conocer cuando afecta el ataque de sulfatos por cloruro de sodio a las estructuras de concreto, los demás grupos fueron sometidos a ciclos de humedecimiento y secado y fueron ensayados a diferentes días de ciclos de humedecimiento y secado: 20, 40, 60 y 80 días, con el propósito de observar el comportamiento del poliestireno en estado líquido como impermeabilizante a través del tiempo, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Resultados prueba número tres

Días de ciclos	Resistencia en Mpa		
	Normal	sin recubrimiento	Con recubrimiento
<b>20</b>	19.53	17.04	19.16
<b>40</b>	19.58	14.13	18.46
<b>60</b>	19.42	12.65	17.58
<b>80</b>	19.60	10.98	16.86

Fuente: Elaboración propia

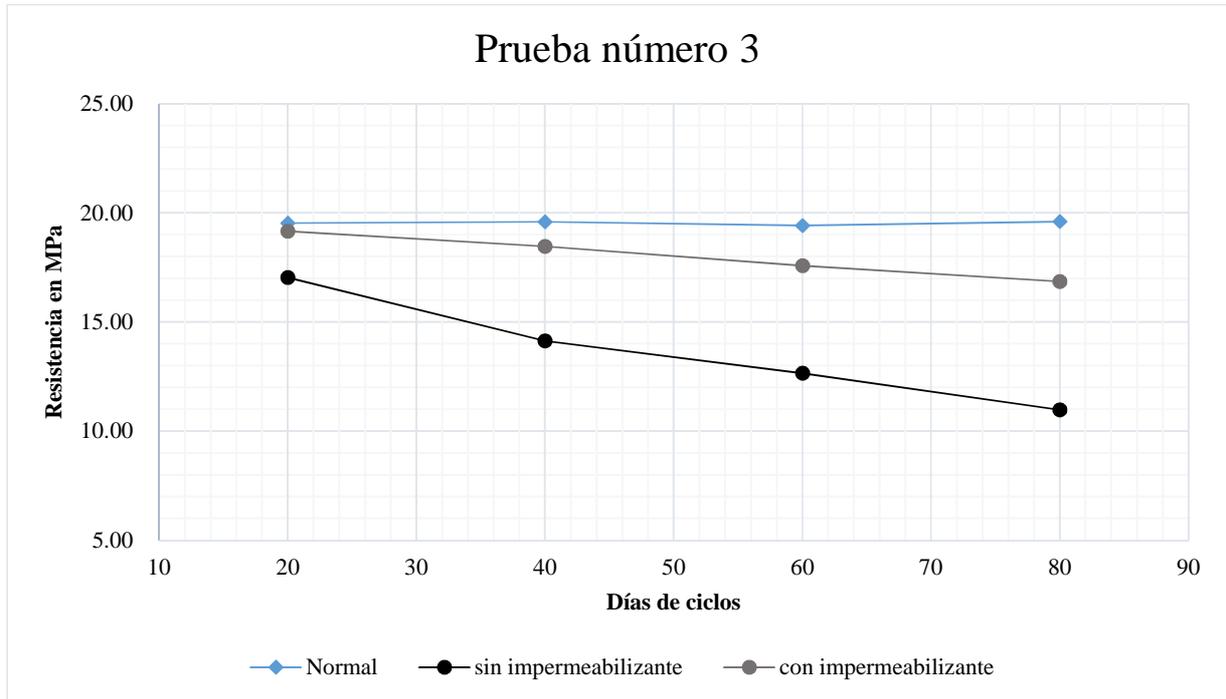
Tabla 4.7. Comparativa resistencia a la compresión

Días de ciclos	Pérdida de resistencia	
	Sin recubrimiento	con recubrimiento
<b>20</b>	12.75%	1.88%
<b>40</b>	27.84%	5.74%
<b>60</b>	34.87%	9.46%
<b>80</b>	44.00%	14.00%

Fuente: Elaboración propia

El impermeabilizante se comporta de manera adecuada al inicio de los días de ciclos minimizando el desgaste ocasionado por el cloruro de sodio, al paso del tiempo se observa que el impermeabilizante se desgasta al aumentar el día de ciclos. En la Figura 4.7 se observa un gráfico comparativo de la resistencia a la compresión a diferentes días de ciclos.

Figura 4.10 Comparativa de la pérdida de resistencia a la compresión



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.10 se puede observar que la resistencia a la compresión en los especímenes sin impermeabilizante va disminuyendo gradualmente debido al ataque de sulfatos ocasionado por los ciclos de humedecimiento y secado con cloruro de sodio penetrando la estructura y cristalizándose tal y como lo muestra la Figura 4.9, de la misma manera la resistencia a la compresión de los especímenes a los que se les colocó el impermeabilizante realizado con poliestireno se desempeña de manera adecuada ayudando a evitar que el concreto se desgaste por el ataque de sulfatos, sin embargo, al aumentar los ciclos el impermeabilizante deja de funcionar como capa protectora y el concreto empieza a sufrir pérdida de resistencia, esto se debe a que el impermeabilizante con el paso del tiempo se va desprendiendo permitiendo que el cloruro de sodio penetre en la estructura. En la figura 4.10 se muestra como el impermeabilizante empieza a desprenderse del espécimen de concreto.



Figura 4.11 Ataque de sulfatos en especímenes de concreto



Figura 4.12 Pérdida de recubrimiento en especímenes.

El comportamiento del impermeabilizante a través del tiempo se puede observar en la Figura 4.13, donde al inicio de los ciclos el impermeabilizante no presentaba ningún desprendimiento, pero con el aumento de los días de ciclos, el impermeabilizante se desprende permitiendo el paso del cloruro de sodio y la formación de cristales de sal en la estructura, afectando su resistencia a la compresión y su durabilidad.

El poliestireno utilizado como impermeabilizante se desempeña de manera adecuada al inicio de los ciclos, ayudando a preservar la resistencia a la compresión y la durabilidad del concreto, al aumento de los días de ciclos el impermeabilizante se va desprendiendo y su desempeño deja de ser el adecuado.



20 días de ciclos



40 días de ciclos



60 días de ciclos



80 días de ciclos

Figura 4.13. Comportamiento del impermeabilizante a través del tiempo

Con el aumento de los días de ciclos de humedecimiento y secado, el cloruro de sodio penetra en los poros del concreto y va formando cristales los cuales se expanden y afectan el funcionamiento del concreto, reduciendo su resistencia a la compresión y su durabilidad, en la Figura 4.14 se muestra el espécimen de concreto sin impermeabilizante a los 20 días de ciclos, en donde se puede observar que el cloruro de sodio ha empezado a penetrar en los poros del concreto pero aún no se ha cristalizado, la pérdida de resistencia en esta etapa es mínima.



Figura 4.14 Espécimen a los 20 días de ciclos

En la Figura 4.15 se muestra el espécimen de concreto sin impermeabilizante a los 20 días de ciclos de humedecimiento y secado, dónde se observa que el concreto es más

poroso y esto es ocasionado por el cloruro de sodio que penetra en los poros y se va cristalizando y expandiendo, aumentando el tamaño de los poros y generando grietas microscópicas, es por esto por lo que en estos días de ciclos la pérdida de resistencia va en aumento.



Figura 4.15 Espécimen a 40 días de ciclos de humedecimiento y secado.

A los 60 días de ciclos los especímenes de concreto empiezan a mostrar la formación de cristales los cuales van aumentando su tamaño y afectando al concreto reduciendo más su resistencia a la compresión, así como el aumento en el tamaño de los poros, se ve pérdida de superficie de concreto exponiendo los agregados, tal y como se muestra en la Figura 4.16.



Figura 4.16 Espécimen a 60 días de ciclos de humedecimiento y secado.

A los 80 días de ciclos la cristalización de sales es evidente y va aumentando en tamaño tanto que se puede observar su forma, la pérdida de resistencia es muy elevada alrededor del 40-45%, comparado con especímenes que no fueron expuestos a ciclos de humedecimiento y secado, el desprendimiento de la superficie de concreto es evidente, tanto que deja una superficie irregular, como se observa en la Figura 4.17



Figura 4.17 Espécimen a 80 días de ciclos de humedecimiento y secado.

## 5 CONCLUSIONES

Se comprobó la hipótesis, el poliestireno en estado líquido utilizado como impermeabilizante ayuda a minimizar el daño ocasionado por el cloruro de sodio en las estructuras de concreto. Se realizaron dos pruebas en las que los especímenes fueron expuestos a condiciones de ciclos de humedecimiento y secado en agua con cloruro de sodio, en las pruebas se varió los días de ciclos buscando evaluar el desempeño del recubrimiento.

Para poder realizar una comparativa se realizaron especímenes que no fueron expuestos a condiciones de ciclos de humedecimiento y secado, a los cuales se le evaluó la resistencia a la compresión a 7, 14, 21 y 28 días de curado, esto con la finalidad de tener un comportamiento base de un concreto que no está expuesto a condiciones climáticas adversas y ataque de sulfatos.

En la prueba número 1, los especímenes con recubrimiento presentaron un comportamiento similar a los especímenes de concreto normal, es decir existió una pérdida de resistencia mínima, mientras que los especímenes sin recubrimiento presentaron una pérdida de resistencia mayor que va alrededor del 20 al 23% comparada con los especímenes de concreto normal. Por lo tanto el desempeño de recubrimiento fue satisfactorio. Se observó que al final de los ciclos los especímenes con recubrimiento presentaban desprendimientos del mismo, por lo que para la prueba número dos se decidió aumentar el número de ciclos para observar el comportamiento del poliestireno como impermeabilizante.

En la prueba número 2, los especímenes con recubrimiento presentaron pérdida de resistencia alrededor del 10 al 14% mientras que los especímenes sin recubrimiento su pérdida de resistencia fue mayor alrededor del 35 al 40%.

Es importante destacar que el concreto estuvo expuesto a envejecimiento prematuro, para acelerar su desgaste.

El desempeño del poliestireno en estado líquido utilizado como impermeabilizante fue el adecuado debido a que ayuda a minimizar el desgaste ocasionado por cloruro de sodio

y es recomendable utilizarlo para las estructuras de concreto en la red carretera, cabe señalar que para que las estructuras de concreto cumplan con su vida útil es necesario que se realicen acciones de conservación y rehabilitación de la estructura, es decir el poliestireno puede ser utilizado pero es necesario que se realicen conservaciones periódicas para garantizar la durabilidad de las estructuras.

Los especímenes expuestos a ciclos de humedecimiento y secado sin recubrimiento tienen una pérdida de resistencia que va del 20% al 25% comparado con la resistencia de los especímenes que no fueron expuestos a ciclos de humedecimiento y secado.

En la prueba tres se observa el como el ataque de sulfatos se va manifestando en las estructuras de concreto, afectando su resistencia y durabilidad. El ataque de sulfatos genera cristales que van aumento su tamaño y dañando la estructura del concreto.

El impermeabilizante realizado con poliestireno puede ser utilizado en las estructuras de concreto de la red carretera ya que ayudarán a prevenir el ataque de sulfatos y prolongaran la vida útil, es importante señalar que es un material que debe de ser aplicado antes de la temporada de lluvias y realizar mantenimiento periódico para asegurar el desempeño del concreto en toda su vida útil.

Cabe mencionar que las pruebas realizados fueron en un envejecimiento prematuro maximizando el ataque de sulfatos y observar el comportamiento, tanto del sulfato como del impermeabilizante.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- Ayora C., Chinchón S., Aguado A., Guirado F., (1998) Weathering of iron sulfides and concrete alteration: thermodynamic model and observation in dams from Central Pyrenees, *Cement Concrete Research*, 28, pp. 1223–1235.
- Baghabra Al-Amoudi, (1995) Performance of fifteen reinforced concretes in magnesium–sodium sulphate environments, *Construction and Building Materials*, 9(1), pp. 25–33.
- Baghabra Al-Amoudi, (2002) Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments, *Construction and Building Composites*, 9(1), pp. 25–33.
- Baltazar L, Santana J, Lopes B, Rodrigues MP, Correia JR., (2014) Surface skin protection of concrete with silicate-based impregnations: influence of the substrate roughness and moisture, *Construction Building Materials*, 70, pp. 191–200.
- Barbucci A, Delucchi M, Cerisola G., (1997) Organic coatings for concrete protection: liquid water and water vapour permeabilities, *Progress in Organic Coating*, 30, pp. 293–7.
- Bassuoni M.T., Nehdi M.L., (2009) Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading, *Cement Concrete Research*, 39, pp. 206–226.
- Bertinelli L., Mohanb P., Strobl E., (2016) Hurricane damage risk assessment in the Caribbean: An analysis using synthetic hurricane events and nightlight imagery, *Ecological Economics*, 124, pp. 135–144.
- Bickley J.A., Hemmings R.T., Hooton R.D., Balinski J., (1994) Thaumasite related deterioration of concrete structures, *American Concrete Institute*, 144, pp. 159–176.

- Biczók L., (1967) Concrete corrosion and concrete protection, *New York: Chemical publishing.*
- Bonnell D.G.R., Nottage M.E., (1939) Studies in porous materials with special reference to building materials: I. The crystallization of salts in porous materials, *Journal of the Society of Chemical Industry*, 58, pp. 16– 21.
- Brenna A, Bolzoni F, Beretta S, Ormellese M., (2013) Long-term chloride-induced corrosion monitoring of reinforced concrete coated with commercial polymer modified mortar and polymeric coatings, *Construction Building Materials*, 48, pp. 34–44.
- Cai H., Liu X., (1998) Freeze-thaw durability of concrete: ice formation process in pores, *Cement and Concrete Research*, 28 (9), pp. 1281–1287.
- Casanova I., Agulló L., Aguado A., (1996) Aggregate expansivity due to sulfide oxidation – I. Reaction system and rate model, *Cement Concrete Research*, 26, pp. 993–998.
- Casanova I., Agulló L., Aguado A., (1997) Aggregate expansivity due to sulfide oxidation – II. Physico chemical modeling of sulphate attack, *Cement Concrete Research*, 27, pp. 1627–1632.
- Chinchon J.S., Ayora C., Aguado A., Guirado A., (1995) Influence of weathering of iron sulphides contained in aggregates on concrete durability, *Cement Concrete Research*, 25 (5), pp. 1264–1272.
- Chinchon-Payá S., Aguado A., Chinchon-Yepes A., (2012) A comparative investigation of the degradation of pyrite and pyrrhotite under simulated laboratory conditions, *Engineering Geology*, 127, pp. 75–80.
- Colleparidi M., (2003) A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete, *Cement Concrete Composites*, 25, pp. 401–407.
- Delucchi M., Barbucci A., Cerisola G., (1997) Study of the physico-chemical properties of organic coatings for concrete degradation control. *Construction Building Materials*, 11, pp. 65–71.

- Detwiler R.J., Dalgleish B.J., Williamson R.B., (1989) Assessing the durability of concrete in freezing and thawing, *ACI Material Journal*, 86, pp. 29–35.
- Diamanti MV, Brenna A, Bolzoni F, Berra M, Pastore T, Ormellese M., (2013) Effect of polymer modified cementitious coatings on water and chloride permeability in concrete, *Construction Building Materials*, 49, pp. 720–8.
- J. Espinós, A. Aguado, C. López, A. Campos, Chinchón-Payá S., (2010) Expansion studies for the Paso Nuevo damage, *Proceedings of the 2nd International Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation, Zaragoza, RC Press, Taylor and Francis Group, Balkema*, pp. 143–152.
- Fernandes I., Pericão M., Hagelia P., Noronha F., Ribeiro M.A., Maia J., (2012) Identification of acid attack on concrete of a sewage system, *Materials Construction*, 45 (3) 337–350.
- Figg J., (1999) Field studies on sulfate attack on concrete. In: Marchand J, Skalny JP. *Materials Science of Concrete: Sulfate Attack Mechanisms. Westerbroom, Ohio: American Ceramic Society*, pp. 315–23.
- Franzoni E, Pigino B, Pistolesi C., (2013) Ethyl silicate for surface protection of concrete: performance in comparison with other inorganic surface treatments. *Cement Concrete Composite*, 44, pp. 69–76.
- Gao J., Yu Z., Song L., Wang T., Wei S., (2013) Durability of concrete exposed to sulfate attack under flexural loading and drying–wetting cycles, *Construction and Building Materials*, 39, pp. 33–38.
- Gross C.U., Ohtsu M., (2008) *Acoustic emission testing*, Springer, 3–10.
- Hime W.G., Mather B., (1999) Sulfate attack, or is it?, *Cement Concrete Research*, 29, pp. 789–791.
- Hooton R.D., (1993) Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkalisilica reactivity, *American Concrete Institute 90*.

- Irassar E.F., (1990) Sulfate resistance of blended cement: prediction and relation with flexural strength, *Cement Concrete Research*, 20, pp. 209–218.
- Japan Concrete Institute (JCI) C65, (2005) Evaluation of concrete performance in natural environmental conditions. *Japan Concrete Institute* pp. 35–140.
- Jenelius E., (2009) Network structure and travel patterns: explaining the geographical disparities of road network vulnerability. *Journal of transport Geography*, 17, pp. 234-244.
- Jiang H., Zipser, E.J., (2010) Contribution of tropical cyclones to the global precipitation from eight seasons of TRMM data: regional, seasonal, and interannual variations. *Journal of Climate* 23, pp. 1526–1543.
- Koetse M.J., Rietveld, P., (2009) The impact of climate change and weather on transport: an overview of empirical findings. *Transport Research. Part D* 14, pp. 205 – 221.
- Lihong Jiang, Xue Xiao, Zhang weidong, Yang Jingna, Zhang Hongiang , Li Yanwen, Rongpu Zhang, Zhang Ziyang, Xu Lijin, Qu Jian, Song Jianrong, Qin Jie., (2015) The investigation of factors affecting the wáter impermeability of inorganic sodiun silicated-bases concrete sealers. *Construction Building Materials*, 93, pp. 729-736.
- Marzouk H., Jiang D.J., (1994) Effect of freeze-thaw on the tension properties of high strength concrete, *ACI Materials Journal* 91, 6, pp. 577–586.
- Medeiros M, Helene P., (2008) Efficacy of surface hydrophobic agents in reducing water and chloride ion penetration in concrete., *Material Structures*, 41, pp. 59–71.
- Metwally I., Al-Gahtani AS, Maslehuddin M., Almusallam AA., (1997) Effectiveness of concrete surface treatment materials in reducing chloride-induced reinforcement corrosion. *Construction Building Materials*, 11, pp. 443–51.
- Mulcahy M., (2006), Hurricanes and Society in the British Greater Caribbean, 1624–1783, *Johns Hopkins University Press, Baltimore*.

- Mehta P.K., (2000) Sulfate attack on concrete: separating myths from reality, *Concrete International*. 22 (8), pp. 57– 61.
- Mehta P.K., P.J.M., (2006) Monteiro, Concrete Microstructure, Properties, and Materials, *third editorial, McGraw-Hill, New York.*
- Neville A.M., (2002) Properties of Concrete, *Longman Group UK Limited.*
- Neville A.M., (2004) The confused world of sulfate attack on concrete, *Cement and Concrete Research*, 34 (8), pp. 1275 -1296.
- Oliveira I., Cavalaro S.H., Aguado A., (2013) New kinetic model to quantify the internal sulfate attack in concrete, *Cement Concrete Research*, 43, pp. 95–104.
- Oliveira I., Cavalaro S.H., Aguado A., (2013) New unreacted-core model for predict pyrrhotite oxidation in concrete dams, *J. Mater, Civil. Engineering. ASCE* 25 (3), pp. 372–381.
- Pielke Jr., R.A., Gratz, J., Landsea, C.W., Collins, D., Saunders, M.A., Musulin, R., (2008) Normalized hurricane damage in the United States: 1900–2005. *Natural Hazard*, 24, pp. 305-316.
- Pedrozo-Acuña, A., Breña-Naranjo, J.A., Domínguez-Mora, R., (2014) The hydrological setting of the 2013 floods in Mexico. *Weather*, 69, pp. 295–302.
- Resio, D.T., Westerink, J.J., (2008) Modeling the physics of storm surges. *Physics Today*, 61, pp. 33–38.
- Rodrigues A., Duchesne J., Fournier B., Diurand B., Rivard P., Shehata M., (2012) Mineralogical and chemical assessment of concrete damaged by the oxidation of sulfide-bearing aggregates: importance of thaumasite formation on reaction mechanisms, *Cement Concrete Research*. 42 (10), pp. 1336–1347.
- Seneviratne AMG, Sergi G, Page CL., (2000) Performance characteristics of Surface coatings applied to concrete for control of reinforcement corrosion, *Construction Building Materials*, 14, pp. 5–9.

- Schmidt T., Leemann A., Gallucci E., Scrivener K., (2011) Physical and microstructural aspects of iron sulfide degradation in concrete, *Cement Concrete Research*, 41 (3), pp. 263–269.
- Schmidt T., Lothenbach B., Romer M., Neuenschwander J., Scrivener K., (2009) Physical and microstructural aspects of sulfate attack on ordinary and limestone blended Portland cements, *Cement and Concrete Research*, 39, pp. 1111-1121.
- Skalny J., Marchand J., Odler I. (2002) Sulfate Attack on Concrete, *tenth editorial.*, Spon Press, London.
- Stefan J., Hans C.G. (1995) High strength concrete freeze/thaw test and cracking, *Cement and Concrete Research* 25 (8), pp. 1775–1780.
- Swamy RN, Tanikawa S. (1993) An external surface coating to protect concrete and steel from aggressive environments. *Material Structures*, 26, pp.465–78.
- Taylor, H.F.W., (1997), *Cement Chemistry*, Second edition, Thomas Telford, London.
- Taylor, M.A.P., Sekhar, S.V.C., D'Este, G.M., (2006) Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks. *Networks and Spatial Economics*, 6, pp. 267–291.
- Thomas M., Rogers C., Bleszynski R., (2003) Occurrences of thaumasite in laboratory and field concrete, *Cement Concrete Composite*, 25, pp. 1045–1050.
- Veniamin D.K. (1996) An evaluation of frost actions on concrete. *Concrete International, Design and Structure*, 18 (3), pp. 42–43.
- Wakizaka Y., Ichikawa K., Kakamura Y., Anan S., (2003) The formation and role of ettringite in Iowa highway concrete deterioration, *Cement Concrete Research*, 4, pp. 1–8.
- Xu H., (2004) Study on High Performance Concrete in Salt Lake: Durability, *Mechanism and Service Life Prediction. PhD thesis. Southeast University, Nanjing, China.*

- Yu D., Guan B., He R., Xiong R., Liu Z., (2016) Sulfate attack of Portland cement concrete under dynamic flexural loading: A coupling function. *Construction and Building Materials*. 115, pp. 478-485.
- Yuan J., Liu Y., Tan Z., Zhang B., (2016) Investigating the failure process of concrete under the coupled actions between sulfate attack and drying–wetting cycles by using X-ray CT, *Construction and Building Materials*, 108, pp. 129-138.
- Zhou Y., Li M., Sui M., Xing F., (2016) Effect of sulfate attack on the stress–strain relationship of FRP-confined. *Construction and building materials*. 110, pp. 235-250.