

Evaluación Del Efecto De Un Recubrimiento Termoestable De Resina De Poliuretano Y
Óxido De Grafeno Sobre Propiedades Fisicoquímicas Y Mecánicas De Matrices Cementicias

Diana Patricia Forero Castro y Juan Manuel Saavedra Sáenz

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Químico

Modalidad investigativa

Directora

Luz Marina Ballesteros Rueda

Ph D Electroquímica, Ciencia y Tecnología

Codirector

Ph D German Adolfo Díaz Ramírez

MSc Nelson Gutiérrez Niño

Universidad industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2023

Tabla de contenido

Introducción.....	11
1. Objetivos.....	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2 Marco Conceptual.....	14
2.1 Concreto.....	14
2.1.1 Barras de refuerzo de acero.....	15
2.1.2 Fibras de refuerzo.....	15
2.2 Recubrimientos.....	16
2.3 Incorporación de Recubrimientos.....	17
2.4 Evaluación de la eficiencia de un recubrimiento.....	17
2.4.1 Adherencia.....	18
2.4.2 Espesor del recubrimiento.....	18
2.4.3 Resistencia a la corrosión.....	18
2.4.4 Resistencia al desgaste.....	18
2.5 Producción de resina de poliuretano.....	19
3 Estado Del Arte.....	20
4 Metodología.....	23

4.1 Fase 0. Preparación de las muestras.....	23
4.1.1 Preparación de óxido de grafeno y producción de la resina PUOG	23
4.1.2 Preparación de las matrices de concreto	24
4.2 Fase 1. Protocolo para aplicación de la resina PUOG	24
4.2.1 Método de aplicación de la resina al concreto	25
4.3 Fase 2. Propiedades de adhesión interfacial y permeabilidad.....	26
4.3.1. Prueba de permeabilidad	27
4.3.2 Prueba de degradación	29
4.3.3 Prueba de desprendimiento (Pull-Off)	30
5 RESULTADOS.....	31
5.1 Método de Aplicación del recubrimiento	31
5.2 Determinación de cantidad de resina	33
5.2.1 Gravimetría	33
5.2.2 Reflectancia UV-Vis.....	34
5.3 Permeabilidad	36
5.3.1 Ángulo de Contacto	36
5.3.2 Inmersión en Agua.....	39
5.4 Degradación en ácido.....	40

RECUBRIMIENTO EN CONCRETO	4
5.5 Desprendimiento (Pull-Off)	42
5.5.1 Sistema Concreto-Recubrimiento sobre metal	42
5.5.2 Sistema Concreto-Recubrimiento sobre Concreto	44
6 Conclusiones	46
Referencias Bibliográficas	
48	
Apéndices	51

Lista de Tablas

<i>Tabla 1. Cantidad de resina utilizada en cada capa por unidad de área</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 2. Área bajo la curva de la relación de longitud de Onda vs Reflectancia Uv-Vis.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 3. Porcentaje de pérdida de masa en un lapso de 24 horas durante la degradación ácida de estructuras de concreto con y sin resina PUOG</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 4. Resultados Prueba Pull-Off sobre Dolly metálico</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 5. Resultados Prueba Pull-Off sobre concreto.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 6. Espesor de la resina PUOG dispuesta con brocha y esponja sobre un sistema de concreto</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 7. Resumen del comportamiento de cupones sin recubrir, con 2 y 3 capas de resina PUOG sumergidos en agua.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 8. Comportamiento de una gota de agua sobre un sistema de concreto sin recubrir.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 9. Comportamiento de una gota de agua sobre un sistema de concreto 1 Capa PUOG....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 10. Comportamiento de una gota de agua sobre un sistema de concreto 2 Capas PUOG</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 11. Comportamiento de una gota de agua sobre un sistema de concreto 3 Capas PUOG</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 12. Comportamiento de una gota de agua sobre un sistema de concreto 4 Capas PUOG</i>	<i>58</i>

Tabla 13. Resumen del comportamiento de cupones sin recubrir, con 2 y 3 capas de resina PUOG sumergidos en solución ácida de HCl al 5%60

Lista de Figuras

<i>Figura 1. Etapas de la metodología del presente trabajo de investigación</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2. Fotografía del fraguado de matrices cementicias</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3. Esquematización de la localización en el cupón de concreto de los 5 puntos equidistantes para medir el espesor de película seca.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 4. Fotografía del instrumento MEDIDOR DE ESPESOR MARCA CEM-DT-156</i>	<i>24</i>
<i>Figura 5. Procedimiento de aplicación de resina PUOG sobre cupones de concreto.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 6. Equipo DSA25E usado para análisis de gota sessile</i>	<i>27</i>
<i>Figura 7. Ilustración de la inmersión de cupones sin recubrir, 2 capas y 3 capas en agua.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 8. Fotografía del Equipo para la prueba mecánica MTS.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 9. Espesor de la capa de resina PUOG aplicada con brocha y esponja en 5 puntos equidistantes del cupón de concreto.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 10. Dispersión de los datos de espesor del concreto recubierto con la resina PUOG mediante el método de brocha y esponja.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 11. Relación Longitud de Onda vs Reflectancia Uv-Vis.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 12. Fotografía comparativa entre (a) un cupón sin recubrir y (b) un cupón con 3 capas de recubrimiento</i>	<i>35</i>

<i>Figura 13. Variación del ángulo de contacto en el tiempo</i>	51
<i>Figura 14. Evolución fotográfica del ángulo de contacto de una gota de agua sobre cupones de concreto con y sin resina PUOG</i>	38
<i>Figura 15. Aumento de la masa de cupones sin recubrir, con 2 capas y 3 capas sumergidas en agua a lo largo del tiempo</i>	38
<i>Figura 16. Pérdida de masa de cupones sin recubrir, con 2 capas y 3 capas sumergidos en solución HCl al 5%</i>	40
<i>Figura 17. Evolución fotográfica del ataque de la solución HCl al 5% con un tiempo de 720 minutos en cupones de concreto (a) sin recubrimiento, (b) 2 capas y (c) 3 capas</i>	41
<i>Figura 18. Relación Sistema-Dolly Vs Esfuerzo (MPa)</i>	42
<i>Figura 19. Dolly metálico desprendido del sistema</i>	42
<i>Figura 20. Relación Sistema-Concreto Vs Esfuerzo (MPa)</i>	44
<i>Figura 21. Evolución en el tiempo de una gota de agua sobre un sistema de concreto sin recubrir</i>	53
<i>Figura 22. Comportamiento de una gota de agua sobre un sistema de concreto con 1 capa de PUOG</i>	53
<i>Figura 23. Comportamiento de una gota de agua sobre un sistema de concreto con 2 capas de PUOG</i>	56

Figura 24. Comportamiento de una gota de agua sobre un sistema de concreto con 3 capas de PUOG56

Figura 25. Comportamiento de una gota de agua sobre un sistema de concreto con 4 capas de PUOG59

Lista de apéndices

<i>Apéndice A: Prueba de espesor</i>	<i>49</i>
<i>Apéndice B: Prueba de permeabilidad del agua</i>	<i>50</i>
<i>Apéndice C: Prueba de degradación.....</i>	<i>60</i>
<i>Apéndice D: Cálculo del área bajo la curva según espectros de la prueba UV- VIS.....</i>	<i>61</i>

Resumen

Título: Evaluación del efecto de un recubrimiento termoestable de resina de poliuretano y óxido de grafeno sobre propiedades fisicoquímicas y mecánicas de una matriz cementicia.

Autor(es): Diana Patricia Forero y Juan Manuel Saavedra Sáenz

Descripción:

Las estructuras de concreto están constituidas por cemento, agregados (arena, grava, piedra triturada) y aditivos, entre las más conocidas están las estructuras de concreto armado, las cuales contienen barras de acero como refuerzo. La continua exposición de estas estructuras a agentes ambientales puede generar corrosión en las barras de acero, provocándose con el tiempo fisuras y grietas en el concreto reduciendo sus propiedades mecánicas. La prevención de estas señales de deterioro se puede abordar mediante el uso de recubrimientos, los cuales según su naturaleza otorgan propiedades nuevas o mejoran las existentes. El presente trabajo de investigación buscó evaluar el efecto de un recubrimiento de resina de poliuretano y óxido de grafeno (PUOG) sobre las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de una matriz cementicia. La metodología utilizada comprendió dos fases: la primera consistió en establecer un protocolo para la aplicación de la resina sobre la matriz cementicia. En la segunda etapa se estimó la influencia del recubrimiento sobre las propiedades de adhesión interfacial y permeabilidad de la matriz, esto mediante pruebas de gota sessile, desprendimiento (pull-off) y degradación (por inmersión en ambientes agresivos). Las pruebas de gota sessile para el elemento de concreto recubierto con más de 3 capas evidenciaron que el uso de la resina PUOG le concedió un carácter hidrofóbico. Por otro lado, la falla mecánica, obtenida mediante pruebas de pull-off demostró que el sistema inicia su punto de falla o desprendimiento dentro del cupón de concreto y no en la interfase resina/concreto. Finalmente, el sistema concreto/resina se sometió a ambientes ácidos para observar su efecto en el tiempo, en el cual se observó que gran cantidad del material se desprende del sistema en las primeras horas cuando este no cuenta con recubrimiento, caso contrario sucede con los sistemas de 2 y 3 capas de PUOG. Los resultados obtenidos en este estudio evidencian la aplicabilidad de la resina PUOG sobre estructuras cementicias, demostrando que tienen un gran potencial para mejorar sus propiedades químicas y mecánicas.

¹*Proyecto de Grado, Modalidad Investigación.

*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Directora: Luz Marina Ballesteros Rueda, Ingeniera Química, M Sc., Ph. D. codirectores: German Adolfo Díaz Ramírez, Diseñador Industrial, M Sc., Ph. D. Nelson Gutiérrez Niño, Químico, M Sc

Abstract

Title: Evaluation of the effect of a thermostable coating of polyurethane resin and graphene oxide on physicochemical and mechanical properties of a cementitious matrix. **

Author(s): Diana Patricia Forero and Juan Manuel Saavedra Sáenz**

Description:

Concrete structures are made up of cement, aggregates (sand, gravel, crushed stone) and additives. Among the best known are reinforced concrete structures, which contain steel bars as reinforcement. The continuous exposure of these structures to environmental agents can generate corrosion in the steel bars, causing fissures and cracks in the concrete over time, reducing its mechanical properties. The prevention of these signs of deterioration can be addressed through the use of coatings, which depending on their nature provide new properties or improve existing ones. The present research work sought to evaluate the effect of a polyurethane and graphene oxide (PUOG) resin coating on the physicochemical and mechanical properties of a cementitious matrix. The methodology used included two phases: the first consisted of establishing a protocol for the application of the resin on the cement matrix. In the second stage, the influence of the coating on the interfacial adhesion and permeability properties of the matrix was estimated through sessile drop, detachment (pull-off) and degradation (by immersion in aggressive environments) tests. Sessile drop tests for the concrete element coated with more than 3 layers showed that the use of PUOG resin gave it a hydrophobic character. On the other hand, the mechanical failure, obtained through pull-off tests, demonstrated that the system begins its point of failure or detachment within the concrete coupon and not at the resin/concrete interface. Finally, the concrete/resin system was subjected to acidic environments to observe its effect over time, in which it was observed that a large amount of the material is released from the system in the first hours when it does not have a coating, otherwise the opposite happens with the PUOG 2 and 3 layer systems. The results obtained in this study show the applicability of the PUOG resin on cementitious structures, demonstrating that they have great potential to improve their chemical and mechanical properties.

Introducción

El concreto es la mezcla de cemento, agregados inertes los cuales pueden ser arena y grava, junto con agua, dicha mezcla se endurece después de cierto tiempo formando una piedra artificial. Este material presenta un tiempo de fraguado determinado, es decir, con la adición de agua los componentes del cemento comienzan a hidratarse, siendo en su mayoría silicatos de calcio hidratados, es por esto que la mezcla gana resistencia; dicho fraguado puede variar dependiendo del uso o no de un acelerante, establecido por las reglas ASTM regidas actualmente (Rodríguez, 2016).

Las señales más comunes de deterioro del hormigón son las fisuras, las eflorescencias, las manchas en el concreto, la corrosión de armaduras, entre otras. Esto ocurre debido a la naturaleza del hormigón, respecto a sus características físicas y químicas. Por ejemplo, la corrosión que se evidencia en las armaduras en el concreto es un fenómeno natural electroquímico, el cual puede empeorar dependiendo de las condiciones de exposición; es importante conocer el motivo de la falla para encontrar la solución adecuada. Otros de los agentes causantes de dichas fallas pueden ser las cargas, variaciones de humedad, térmicas, extrínsecas, agentes biológicos, e incompatibilidad de materiales (Gómez y Palacios, 2011).

Para lo anterior, se han planteado diferentes alternativas de solución, en las cuales se encuentran el ensanchamiento de cimentación, reforzamiento con encamisado de concreto, reforzamiento con planchas de acero unidas, reforzamiento con encamisado de fibras de carbono, aumento de sección de muro, reforzamiento de vigas con concreto armado, reforzamiento con planchas de acero, reforzamiento con bandas de acero, entre otras (Pérez, 2020). Sin embargo, asumiendo

responsabilidad social, se ha mostrado gran interés en implementar soluciones sostenibles, con el fin de no pensar solo en el ahora sino en las ventajas o desventajas que pueda traer cada acción al futuro y enfocándose en el uso de productos renovables. En este contexto, el uso de materiales orgánicos es utilizado para mitigar y mejorar la estructura del hormigón, con respecto a sus aplicaciones. Entre los materiales orgánicos más comunes usados está el Bambú y la Guadua, siendo versátiles, ligeros, resistentes a la tensión y utilizados en la fabricación de estructuras como puentes, torres, viviendas, ente otras. (Barbosa y Mayorga, 2015).

Según investigaciones (Barbosa y Mayorga, 2015)., las primeras aplicaciones del fique fueron en la fabricación de diferentes objetos para el uso diario, de igual forma, gracias al conocimiento ancestral, el fique fue utilizado de modo medicinal. Desde el año 1997, aprovechando las propiedades químicas, económicas y ambientales del fique se han venido implementando soluciones industriales. Este material orgánico es candidato para dar soluciones a problemas, como los manifestados en el concreto (Barbosa y Mayorga, 2015).

A pesar de los beneficios que tiene la fibra de fique, los autores Łukasz Sadowski, Jerzy Hoła, Andrzej Żak, Agnieszka Chowanie, han demostrado que con el pasar del tiempo las fibras naturales pierden sus propiedades mecánicas (Sadowski et al, 2019). En 1999, Manuel Fernández Canovas estudió métodos para prevenir el deterioro de las fibras dentro del medio alcalino del hormigón como parte de la investigación enmarcada en una tesis doctoral, que pretendía dar solución a esta problemática. Los resultados dieron como respuesta que la resistencia de las fibras se ven afectadas en su vida útil; todas esas fallas se presentan por la humedad, temperatura, y alcalinidad (Fernández et al.,2010). Para mejorar la vida útil de las fibras, se ha decidido reforzarlas en su exterior con un recubrimiento con el fin de obtener una mayor efectividad en su uso, años antes han sido utilizados diferentes tipos de recubrimientos tales como: colofonia+aguarras, aceite de

clavo+xilano+aguarras y tanino+xilano+alcohol; Los cuales no fueron en su totalidad exitosos, ya que traían consigo problemas en sus características de adherencia con la matriz, puntos de fusión bajos, y un módulo de estabilidad bajo.

En este trabajo de investigación se reforzaron las fibras con una resina de poliuretano a partir de óxido de grafeno que proporcionó una mejora en las propiedades físicas y químicas, evaluando el efecto de la interacción con la matriz cementicia. La resina anteriormente mencionada está producida a partir de disocianato y óxido de Grafeno, el cual reemplaza los polioles utilizados normalmente para hacer Poliuretano, este es implementado debido a sus propiedades, facilidad de obtención y ventajas económicas. Los polioles utilizados comúnmente son alcoholes polihídricos, con varios grupos hidroxilos, también pueden contener éster, éter, amida, acrílico, metal, metaloide y otras funcionalidades.

En este trabajo se conoció el efecto del recubrimiento PUOG sobre el concreto, es decir, recubrimiento-matriz cementicia. Se investigó de forma práctica el cómo afecta la resina PUOG al concreto, y se evidenció que cambios positivos o negativos se pueden ver reflejados por el uso de este recubrimiento en las propiedades del cemento.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de un recubrimiento termoestable de resina de poliuretano a partir de óxido de grafeno (PUOG) sobre propiedades fisicoquímicas y mecánicas de una matriz cementicia.

1.2 Objetivos Específicos

- Establecer el protocolo para la aplicación de la resina PUOG sobre la matriz cementicia
- Estimar la influencia del recubrimiento sobre las propiedades de adhesión interfacial y permeabilidad del sistema resina/matriz cementicia

2 Marco Conceptual

2.1 Concreto

El concreto es un material de construcción convencionalmente compuesto por una mezcla de cemento, agua, agregados gruesos (como la grava o la piedra triturada) y agregados finos (como la arena). La mezcla se endurece con el tiempo para formar una estructura sólida y resistente a la compresión como la mayoría de los compuestos pétreos, sin embargo, su resistencia a la tensión es baja (McCormac y Brown, 2015, p. 1) . El concreto es ampliamente utilizado en la construcción de edificios, puentes, carreteras, presas y otras estructuras debido a su resistencia y durabilidad. También es un material económico y fácil de fabricar en grandes cantidades.

Existen diferentes tipos de concreto y su clasificación es evidenciada dependiendo de los aditivos agregados, este puede tener diferentes características, como mayor resistencia, mayor durabilidad, oportuna resistencia a la corrosión, resistencia al fuego, entre otras (Santiago, 2011) y sus aplicaciones varían ampliamente. Algunos tipos conocidos son el concreto reforzado que se caracteriza por tener una resistencia considerable a la compresión por unidad de costo, de igual forma es el mejor material estructural cuando hay agua presente (McCormac y Brown, 2015) , el concreto liviano conocido por ayudar en la reducción de la permeabilidad, fisuración por contracción y durabilidad (Chandra y Berntsson, 2002), el concreto permeable, el cual está constituido por ingredientes que permiten obtener poros interconectados internamente los cuales logran que el agua infiltre fácilmente (ACI 522R, 2010).

El concreto puede clasificar según sus estructuras en dos grandes grupos, el concreto armado, son aquellas en las que se utiliza una armadura de acero para reforzar el concreto. La armadura se coloca dentro del encofrado antes de verter el concreto, y cuando el concreto fragua y se endurece,

la armadura queda encerrada dentro de él. Por otro lado, están las estructuras de concreto pretensado, son aquellas en las que la armadura se tensa antes de verter el concreto. La tensión de la armadura se mantiene hasta que el concreto ha fraguado y se ha endurecido, lo que permite que la estructura sea más resistente y tenga una mayor capacidad de carga (Harmsen, 2005). Estas estructuras de concreto cuentan con reforzamiento interno, los cuales pueden ser a grandes rasgos de dos tipos, las barras de acero y las fibras.

2.1.1 Barras de refuerzo de acero

Suelen ser barras con una superficie corrugada que se emplean para proporcionar resistencia a la tracción, de flexión, corte, etc. Estas son dispuestas antes de verter el concreto y se extienden a lo largo de toda la estructura a generar. Las barras de refuerzo se unen a los cimientos de la estructura y son usados para tener una resistencia optima ante las cargas colocadas sobre el concreto (Egger, 2020).

2.1.2 Fibras de refuerzo

Se caracterizan por ser fibras de diferentes materiales, se agregan para lograr aumentar la resistencia a la tracción y al agrietamiento en el concreto. Estas son mezcladas previamente con el concreto y son vertidas aleatoriamente, se utilizan cuando el concreto está expuesto a tensiones cíclicas o vibraciones (Masciotra, 2005). Existen varios tipos de fibras utilizadas en el concreto como las fibras de acero, fibras de polipropileno, fibras de vidrio, fibras de carbono y las fibras naturales. Cada tipo de fibra tiene diferentes propiedades y beneficios, su elección dependerá de las necesidades de la aplicación (Nemati, 2013).

2.2 Recubrimientos

Los recubrimientos son materiales que se aplican sobre una superficie con el fin de protegerla, decorarla o mejorar sus propiedades, estos materiales pueden ser líquidos o sólidos y se utilizan en una gran variedad de aplicaciones (Aguirre y Acosta, 2023). Cuando se usan en las estructuras de concreto cumplen con algunos trabajos específicamente, por ejemplo, son usados para proteger de la corrosión a las barras de acero localizadas en el interior de las estructuras (Ortiz et. al, 2021), son usados en la protección de las superficies contra la abrasión, erosión y el desgaste llegando a prolongar la vida útil de la estructura, son usados por efectos estéticos buscando cambios en el color y la textura de las superficies, entre otras aplicaciones (Meneses et. al, 2016).

Existen diferentes tipos de recubrimientos utilizados sobre el concreto y sus estructuras, estos recubrimientos se pueden clasificar en metálicos y no metálicos. Dentro de los recubrimientos no metálicos: los inorgánicos y los orgánicos. Particularmente por su bajo costo son muy apreciados los recubrimientos orgánicos. En estos los procedimientos de protección más frecuentes son el lacado, y el recubrimiento plástico además del recubrimiento con polvo (Diaz et. Al, 2013). Las pinturas son un ejemplo de estos, estas se aplican en capas delgadas sobre una superficie y tienen la propiedad de transformarse en una capa sólida, continua y adherente por evaporación de la mezcla solvente que la constituye (Giudice et. Al, 2009), otros recubrimientos son los epóxicos caracterizados por ser un material muy versátil con una estructura formada a partir de la unión de cadenas que tienen un anillo de tres miembros C-O-C conocido como “anillo epoxi”, tienen un importante uso en la protección de ductos expuestos a medios muy corrosivos y con variaciones amplias de temperatura (Su et. Al, 2002), por otro lado, los recubrimientos de poliuretano son polímeros principalmente caracterizados por el conjunto de enlaces $-NH-C(CO)-O-$ proveniente de su monómero uretano, usados en la industria ampliamente debido a que presentan excelentes

propiedades como resistencia a la abrasión, dureza y resistencia química (Mallakpour y Behranvand, 2016).

2.3 Incorporación de Recubrimientos

La incorporación de recubrimientos en estructuras de concreto es una técnica comúnmente utilizada para mejorar la durabilidad y la resistencia de estas mismas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la selección y la aplicación de los recubrimientos adecuados dependen de varios factores, como las condiciones ambientales de exposición, la calidad del concreto, el tipo de estructura, entre otros. Además, los recubrimientos deben aplicarse de manera adecuada para garantizar una adherencia y una durabilidad significativa.

Existen varios métodos de aplicación de recubrimientos, uno de los más tradicionales es la aplicación con una brocha de cerdas, este es adecuado para pequeñas superficies y para detalles que requieren una aplicación precisa, otro método es el pintado con rodillo y esponja el cual es adecuado para superficies grandes y lisas, por otra parte, el pintado con pistola se caracteriza por permitir una aplicación uniforme y en grandes áreas puesto que este utiliza una pistola de pulverización que atomiza la pintura y la proyecta sobre la superficie y la inmersión del sustrato en el recubrimiento es otro método que se utiliza para recubrir especialmente piezas pequeñas y de forma regular, en este último, la pieza se sumerge en un baño de pintura y luego se retira el exceso presente a través de secado.

2.4 Evaluación de la eficiencia de un recubrimiento

Para evaluar la eficiencia de un recubrimiento, se pueden utilizar diferentes métodos de prueba dependiendo de la aplicación específica del recubrimiento, a continuación, se describen algunos de los métodos más comunes utilizados en la evaluación de recubrimientos:

2.4.1 Adherencia

La adherencia es una propiedad importante de los recubrimientos, ya que determina su capacidad para adherirse a la superficie del sustrato. Se pueden realizar pruebas de adherencia, como la prueba de corte en cruz, la prueba de tracción y la prueba de adhesión a la tracción para evaluar la adherencia del recubrimiento.

2.4.2 Espesor del recubrimiento

El espesor del recubrimiento es una medida importante de la capacidad de protección contra la corrosión y otros factores ambientales. Se pueden utilizar diferentes instrumentos de medición de espesor de película, estos pueden ser por contacto directo con el sustrato o sin contacto alguno. Los equipos que trabajan bajo el principio del contacto directo emplean una sonda o punta de medición (calibradores de espesor por micrómetros, medidores de tipo palpador o electromagnéticos) y aquellos que se basan en el cero contacto los cuales trabajan de la mano con ondas ultrasónicas o propiedades ópticas (transmisión de la luz sobre la superficie).

2.4.3 Resistencia a la corrosión

La resistencia a la corrosión es una propiedad crítica de los recubrimientos que se utilizan para proteger superficies metálicas. Las pruebas de resistencia a la corrosión, como la prueba de niebla salina, la prueba de exposición a la humedad y la prueba de inmersión en ácido, se utilizan comúnmente para evaluar la eficacia del recubrimiento en la protección contra la corrosión.

2.4.4 Resistencia al desgaste

La resistencia al desgaste es una propiedad importante de los recubrimientos utilizados en aplicaciones donde la superficie está expuesta a fricción y abrasión, como en la industria automotriz

y aeronáutica. Se pueden realizar pruebas de resistencia al desgaste, como la prueba de abrasión Taber y la prueba de rayado, para evaluar la capacidad del recubrimiento para resistir el desgaste.

2.5 Producción de resina de poliuretano

La producción de resina de poliuretano generalmente implica la reacción química entre un poliol y un isocianato en presencia de catalizadores y otros aditivos (Mallakpour y Behranvand, 2016). El proceso general de producción de resina de poliuretano se encuentra constituido en una serie de pasos, primeramente, se seleccionan polioles e isocianatos adecuados en función de las propiedades deseadas de la resina de poliuretano final. Los polioles pueden ser poliésteres, poliéteres o polímeros, mientras que los isocianatos pueden ser alifáticos o aromáticos (Martínez et. al, 2022), en seguida, se mezclan en un recipiente en una proporción específica, la mezcla se agita mecánicamente para asegurar que los dos componentes se mezclen completamente. La reacción requiere la utilización de catalizadores, los cuales se agregan a la mezcla de poliol e isocianato, otros aditivos, como agentes espumantes, agentes colorantes y retardantes de llama, también se pueden agregar en esta etapa. La resina se aplica sobre el área de interés en donde la reacción de polimerización ocurre llegando a solidificar la resina sobre la superficie (Guzmán, 2020).

3 Estado Del Arte

En la actualidad se reportan diferentes mecanismos preventivos para salvaguardar la vida útil de las estructuras cementicias, evitando que alguna falla estructural represente un costo significativo para un proyecto en el sector de la construcción. Según la Norma Europea EN 1504, los tratamientos superficiales en función de la protección de estructuras de concreto pueden clasificarse en la impregnación hidrofóbica, bloqueo de poros y revestimientos (BSEN 1504-2, 2004), se ha denotado que estos sistemas abordan la protección contra el ingreso, el control de la humedad, el aumento de la dureza, aumento de la resistencia a los productos químicos y aumento de la resistividad (BSEN 1504, 2005).

Un tratamiento superficial es la implementación de un recubrimiento sobre la estructura de cemento, generando de esta manera una interfaz, la cual es un nuevo sistema, estos han sido ampliamente estudiados debido a mejoras en la tenacidad, adherencia, resistencia mecánica/química e impermeabilidad del concreto (Pan et. al, 2017). Este sistema es evaluado a través de pruebas específicas, como pruebas de desprendimiento, permeabilidad y resistencia al rayado, en función de caracterizar la interacción entre los componentes presentes.

Los recubrimientos a base de poliuretanos son atractivos por su versátil morfología y su amplia gama de propiedades deseables, como lo son la impermeabilidad, la resistencia a medios agresivos como los ácidos, excelente adherencia respecto a sustratos metálicos (Kang et. al, 2022), estas son posibles gracias a su capacidad de alterar su microestructura para llegar a adaptarse (Rodríguez, 2020).

Un ejemplo del uso de recubrimientos de poliuretano se encuentra en la investigación realizada por Vipulanandan y Liu, los cuales evalúan el comportamiento de 2 resinas de poliuretano dispuestas

sobre el concreto en un ambiente ácido, simulando la degradación de 5 años en el alcantarillado, logrando extender la vida útil del concreto hasta 57 veces cuando se hace uso de las resinas. Almusallam et al. realizó un estudio comparativo de diferentes tipos de recubrimientos, en donde concluyó que los recubrimientos de poliuretano alcanzaron el valor más bajo en ganancia de peso (0,21 %) por permeabilidad de agua y una reducción por penetración de cloruros del 99%, este mismo tipo de recubrimiento en la investigación de Medeiros y Helene representó el mejor desempeño en términos de eficiencia de reducción de cloruros en un 86%.

La evolución constante de la industria de la construcción y la aplicabilidad que se le da a las estructuras generadas en esta, requiere el desarrollo integral de nuevos materiales que puedan ser dispuestos para revolucionar las estrategias que a través de décadas han sido utilizadas, por lo tanto, un ejemplo de esto son los recubrimientos orgánicos a partir de arcillas modificadas con nanocompuestos, los cuales evidencian propiedades impermeabilizantes y antifúngicas en el sistema de interés (Woo et. al, 2008). Sin embargo, en la literatura se registra que la vida útil de estos recubrimientos está sujeta al envejecimiento y la intemperie, por consiguiente, no prometen una protección a largo plazo (Pan et. al, 2017).

Por otra parte, se reportan el uso de óxido de grafeno con el objeto de ayudar a prevenir y retardar el comportamiento corrosivo de materiales metálicos dentro de estructuras cementicias, así mismo, evidencian mejoras en el endurecimiento de los recubrimientos poliméricos usados en estas (Qureshi et. al, 2022), en otra investigación, los rellenos de grafeno pueden soportar eficientemente la transferencia de tensión representada como cargas dispuestas sobre las interfaces, esto con el fin de mejorar la resistencia a la fractura del revestimiento (Zhang et. al, 2016).

En la Universidad Industrial de Santander el magister Nelson Gutiérrez Niño de la mano del laboratorio LEAM, sintetizó un material denominado resina de poliuretano y óxido de grafeno

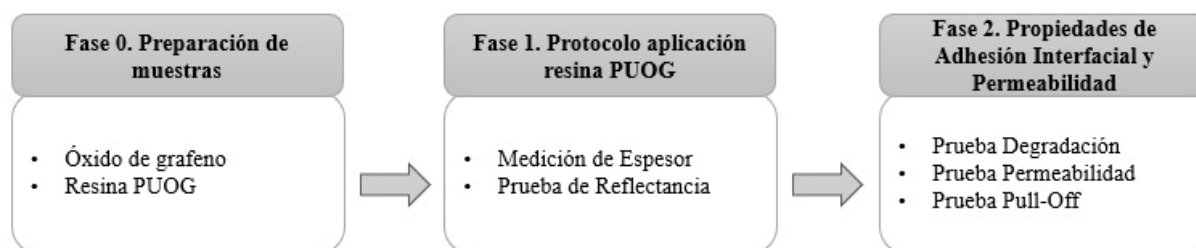
(PUOG), utilizada para recubrimiento en metales. Sin embargo, no se ha investigado su aplicación para recubrimiento en matrices cementicias, por lo tanto, en este trabajo se busca contextualizar a través de una metodología experimental, el protocolo necesario para recubrir estructuras de concreto con la resina PUOG en función de conocer las repercusiones sobre propiedades fisicoquímicas y mecánicas del sistema.

4 Metodología

La metodología utilizada en este proyecto estuvo dividida en 3 fases principales, iniciando desde la fase 0 hasta la fase 2. En las cuales se realizaron las pruebas pertinentes dependiendo de la propiedad que se deseaba evaluar. Estas están nombradas en la Figura 1 y especificadas más adelante.

Figura 1

Etapas de la metodología del presente trabajo de investigación



4.1 Fase 0. Preparación de las muestras

Con el fin de evaluar el comportamiento de la resina PUOG se requiere definir el protocolo de dispersión del recubrimiento sobre el concreto a través de los siguientes pasos:

4.1.1 Preparación de óxido de grafeno y producción de la resina PUOG

La producción de óxido de grafeno se realizó a través de dos etapas: obtención de óxido de grafito y obtención de óxido de grafeno. Para la obtención de óxido de grafito se hizo uso de grafito con un tamaño de partícula de 5 μ m y 98% de pureza. En un vaso de precipitado de 250 ml se adicionó 1 g de grafito y 50 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4). La mezcla se mantuvo en un proceso de agitación a 500rpm y luego se permitió un tiempo de homogenización de aproximadamente 15 minutos, posterior a esto se añadió el agente oxidante, en este caso permanganato de potasio ($KMnO_4$). Con el fin de purificar el óxido de grafito una vez finalizado

el proceso de oxidación, se realizaron lavados mediante centrifugación a 7000rpm con un tiempo establecido de 30 minutos, empleando agua destilada hasta alcanzar un pH con valores entre 5 y 6. Posteriormente el óxido de grafito se llevó a ultrasonido empleando una sonda, con parámetros de amplitud de 80%, y pulsos on:off 1:1 durante 30 min, repitiendo este proceso 6 veces, para homogenizar la muestra. Por último, se congeló para ser liofilizado, es decir, se eliminó la cantidad de hielo por medio de sublimación con calor en condiciones de vacío.

4.1.2 Preparación de las matrices de concreto

Las matrices de concreto fueron fundidas en moldes cilíndricos con medidas de 5.08cm de radio y 3.81cm de alto y cupones cúbicos con medidas de 32mm, empleando una relación 2:1 entre arena y cemento, agregando agua y acelerante Sika (Acelerante para Fraguados), equivalente a 1% de la cantidad de cemento. Estas se dejaron fraguar durante 8 días como se muestra en la figura 2, para luego ser recubiertas.

Figura 2

Fotografía del fraguado de matrices cementicias



4.2 Fase 1. Protocolo para aplicación de la resina PUOG

Pasado el tiempo necesario para el fraguado de las matrices cementicias, se inició el proceso de pruebas preliminares con el cual se determinó el método adecuado de aplicación de la resina PUOG, durante esta etapa se tuvo en cuenta la aplicación con uso de esponja, brocha, aspersor y

por inmersión, los últimos dos métodos fueron descartados ya que estos denotaban una falencia significativa cuando la porosidad del material era representativa.

4.2.1 Método de aplicación de la resina al concreto

Para la selección del método de aplicación de la resina PUOG, se tomaron dos sistemas con superficies uniformes los cuales fueron recubiertos con la resina mediante diferentes métodos, los cuales fueron haciendo uso de una brocha y una esponja. Después de recubrir dicho sistema con dos capas permitiendo el secado entre capa y capa, se midió el espesor de dicha resina en 5 puntos equidistantes como se presentan en la figura 3, evaluando la uniformidad de cada una y el grosor de esta misma. Al obtener un espesor de recubrimiento constante se identifica el método adecuado para recubrir, para esto se hizo uso del equipo mostrado en la figura 4.

Figura 3

Esquematización de la localización en el cupón de concreto de los 5 puntos equidistantes para medir el espesor de película seca



Figura 4

Fotografía del instrumento MEDIDOR DE ESPESOR MARCA CEM - DT-156



Para determinar la cantidad de resina empleada por unidad de área (rendimiento) en cada matriz, se cuantificó mediante gravimetría, registrándose valores de la cantidad de resina al iniciar y al finalizar de recubrir con respecto a la resina disponible por aplicación. Cabe resaltar que con la adición de mayor cantidad de resina el cupón de concreto se tornaba menos traslucido, por lo tanto, mediante espectroscopia de reflectancia UV-VIS se buscó corroborar el incremento del espesor con la adición de cada capa de recubrimiento, para esto se tomaron espectros a cada una de las muestras con diferentes cantidades de recubrimiento para visualizar a través del porcentaje de luz reflejada y absorbida la interacción con el área recubierta.

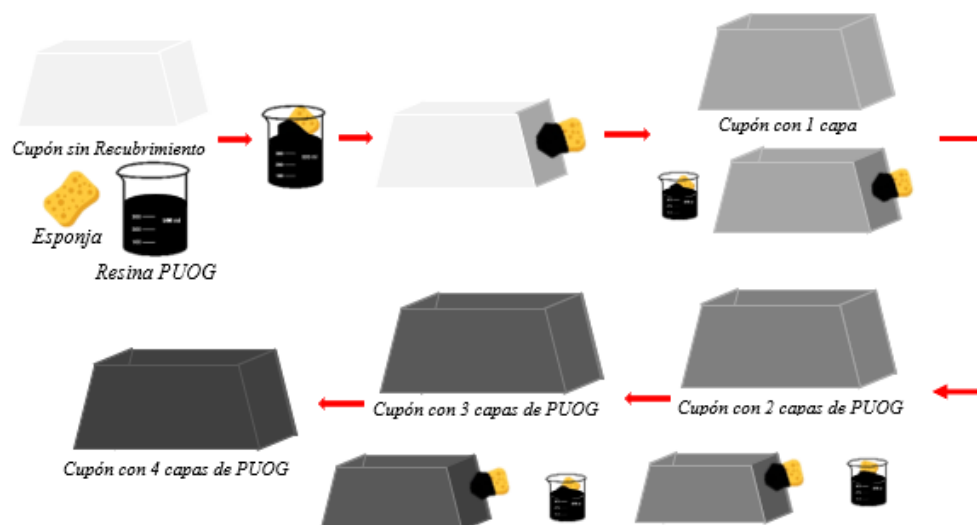
4.3 Fase 2. Propiedades de adhesión interfacial y permeabilidad

En el momento que se estableció la cantidad de recubrimiento que hacía referencia a una capa de este, se empezaron las pruebas necesarias para evaluar la eficiencia de este mismo bajo diferentes aspectos ambientales a los que pueden estar expuestos estos sistemas, para esto, se tomaron algunos de los cupones ya fraguados y se les aplicó la resina PUOG como se presenta en la figura 5, logrando tener cupones recubiertos con 1, 2, 3 y hasta 4 capas, cabe resaltar que la aplicación de cada capa se realizó después de un tiempo de secado de 48 horas.

Se realizó un pretratamiento a todos los cupones, el cual consistió en eliminar el exceso de material particulado retenido en la superficie haciendo uso de isopropanol para las muestras recubiertas y aire comprimido para las muestras sin recubrir y por otra parte para garantizar la eliminación del exceso de humedad retenida, las muestras fueron llevadas al horno a 60° C por 48 horas.

Figura 5

Procedimiento de aplicación de resina PUOG sobre cupones de concreto



4.3.1. Prueba de permeabilidad

En busca de determinar qué tanto previene la resina PUOG la permeación de agua sobre las matrices cementicias, se establecieron 2 pruebas las cuales son el análisis del ángulo de contacto y la inmersión en agua de las matrices a diferentes tiempos.

4.3.1.1 Ángulo de Contacto

Esta técnica hace referencia a una metodología usada para conocer el ángulo de contacto formado cuando se dispone un líquido sobre un sólido, en ella se percibe la humectabilidad e interacción del sistema formado. En la evaluación del recubrimiento PUOG sobre el concreto se buscó determinar variación del ángulo de contacto en función del número de capas aplicadas, esto como una herramienta para describir el comportamiento hidrofóbico o hidrofílico del sistema, este cambio en la hidrofobicidad puede representar contribución o deterioro de la permeabilidad del sistema cuando está expuesto a una cantidad de agua.

Para la realización de la prueba se dispuso del equipo para análisis de gota, tensión superficial y ángulo de contacto (DSA25E) que se encuentra en el laboratorio CICAT (ver figura 6). Para este trabajo se analizó la gota Sessile bajo unas condiciones ambientales en una interfaz de aire a temperatura y presión de 25 °C y 1 atm, respectivamente.

Figura 6

Equipo DSA25E usado para análisis de gota sessile



En la automatización del equipo (DSA25E) se dispusieron condiciones de partida, como lo fueron las ambientales referentes a la interfaz del aire, el líquido a usar y la disposición de este líquido sobre la superficie, esto se realizó a través de una aguja con un diámetro de 1 mm disponiendo una gota con un volumen de 20 μ l. Seguido a esto, se visualizó el comportamiento de la gota situada sobre la superficie durante 120 segundos registrando la información cada 5 segundos, esta información se reportó en las tabla de datos (8,9,10,11,12) y las figuras (21,22,23,24,25) presentados en el Anexo 2.

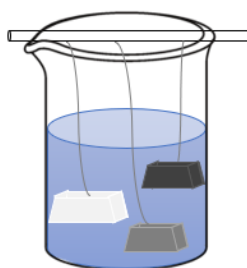
4.3.1.2 Inmersión en Agua

La inmersión de las matrices en agua se realizó para conocer la capacidad del recubrimiento para prevenir la difusión del fluido a través de los cupones de concreto. Para esto se hizo uso de un recipiente el cual se aforó con 2 litros de agua, en él que se colocaron cupones sin recubrir, con 2

capas y 3 capas por 24 horas (ver figura 7), en este lapso seleccionado se hicieron mediciones en diferentes instantes de tiempo para conocer la cantidad de agua permeada, los tiempos seleccionados fueron 15, 30, 45, 60 y 120 minutos, y luego una última toma a las 24 horas de iniciado el experimento.

Figura 7

Ilustración de la inmersión de cupones sin recubrir, 2 capas y 3 capas en agua



4.3.2 Prueba de degradación

Gran parte de la aplicación de las estructuras cementicias y elementos estructurales de concreto son usados en ambientes naturales, lo cual denota que están expuestos a cambios drásticos de estas condiciones llegando a ser en muchas ocasiones hostiles, por lo tanto, a través de la prueba de degradación se quiso conocer la capacidad que tiene la resina PUOG para proteger la estructura cementicia cuando esta está expuesta a un ambiente ácido representado por una solución de ácido clorhídrico (HCl) al 5% de concentración.

Para esta prueba se hicieron dos montajes, en el primero de ellos se hizo uso de cupones sin recubrir, 1 capa, 2 capas y 3 capas de resina PUOG, los cuales estuvieron por 24 horas sumergidos en la solución ácida, se retiraron de la solución, seguido a esto fueron secados a 60°C por 24 horas y luego pesados. En el segundo montaje se trabajaron cupones sin recubrir, 2 capas y 3 capas de resina PUOG, estos se sumergieron en 2 litros de la solución ácida, se retiraron las muestras pasado

15, 30, 60, 120 y 180 minutos de iniciada la prueba, luego fueron secados por 24 horas a 60°C y pesados después de retirar la humedad.

4.3.3 Prueba de desprendimiento (Pull-Off)

La determinación de la adhesión interfacial entre la resina PUOG y la matriz cementicia se realizó mediante una prueba de tracción, conocida como Pull Off.

4.3.3.1 Desprendimiento de Dollys metálicos

Esta prueba es realizada para conocer el valor de la fuerza necesaria para desprender un pin de acero (dollys) de forma vertical, el cual está suspendido y adherido a una matriz cementicia, con el fin de evidenciar que tan resistente es la interfaz entre el pin y el concreto, el cual está recubierto de la resina PUOG con diferentes cantidades de capas. El dolly mencionado anteriormente está adherido al sistema con un adhesivo comercial, *Araldite*. Por otra parte, se analizaron sistemas cemento/cemento unidos por medio del fraguado de uno de los cupones sobre el otro con sus días de endurecimiento completos. Se hizo uso del equipo PRENSA HIDRÁULICA MTS ubicado en el Edificio de Ingeniería Mecánica sede Principal UIS (ver **Figura 8**), implementado a una velocidad de 0.5mm/min.

Figura 8

Fotografía del Equipo para la prueba mecánica MTS



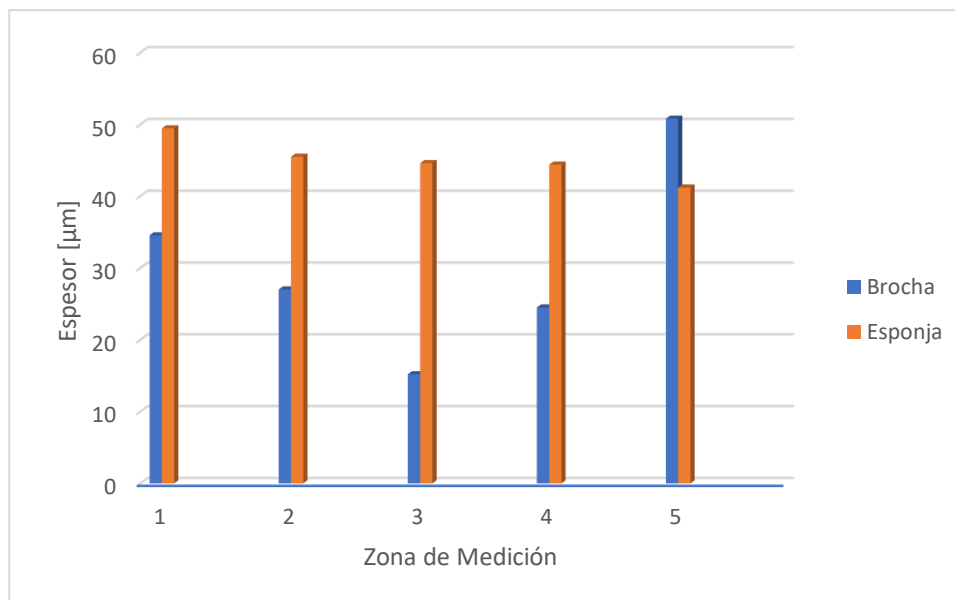
5 RESULTADOS

5.1 Método de Aplicación del recubrimiento

Partiendo de las dos superficies recubiertas con 2 capas de resina PUOG usando los métodos de aplicación por brocha y esponja, se midió el espesor de película seca en 5 puntos equidistantes de la superficie recubierta, cabe resaltar que cada punto fue realizado por triplicado. El valor promedio del espesor de película seca estimado para cada uno de los 5 puntos se reporta en la figura 9.

Figura 9

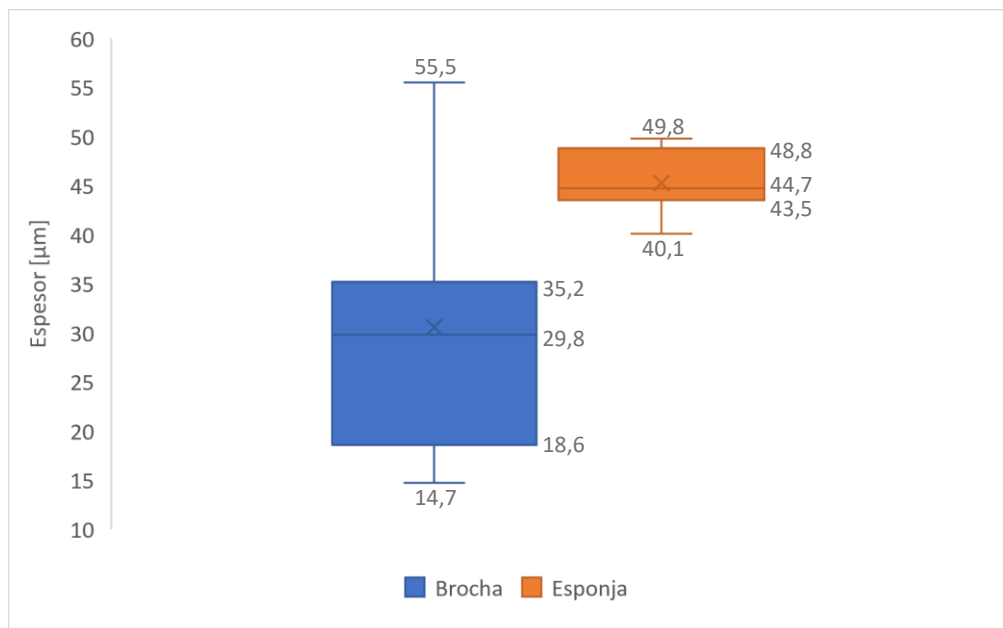
Espesor de la capa de resina PUOG aplicada con brocha y esponja en 5 puntos equidistante del cupón de concreto



El método de aplicación escogido para la aplicación es aquel que logró entregar uniformidad en la estructura que se estaba recubriendo, con el fin de evitar que exista alguna zona expuesta a daños por desgaste o deterioro. En la figura 10 se presenta a través de un diagrama de cajas y bigotes la dispersión de los datos encontrados por el medidor de espesor de película seca cuando se hace uso de brocha y esponja como método utilizado para la aplicación del recubrimiento. Es importante resaltar que los datos reportados corresponden a 15 datos de espesor encontrados los cuales representan cada uno de los 5 puntos equidistantes seleccionados con sus respectivos triplicados.

Figura 10

Dispersión de los datos de espesor de la capa de recubrimiento (resina PUOG) mediante el método de brocha o esponja



El rango de valores de espesor de resina PUOG calculado para la aplicación de la resina PUOG con brocha y esponja es de 40.8 y 9.7 respectivamente, esto denota que los datos encontrados en la aplicación con brocha se encuentran dispersos en comparación con los visualizados en el método con esponja, pues estos tienden a estar significativamente concentrados. Por otra parte, el rango inter-cuartil es de gran ayuda cuando se quiere percibir la variabilidad de los datos que para nuestro análisis en cuestión es de suma importancia, el rango inter-cuartil calculado para la aplicación con brocha y esponja es de 16.6 y 5.3 respectivamente. Los 5 puntos equidistantes seleccionados y sus triplicados describen el comportamiento general de la superficie, por lo tanto, el método de aplicación con esponja evidencia que el área de trabajo denota uniformidad, lo cual no fue encontrado con el método de aplicación con brocha, por lo cual este último fue descartado.

5.2 Determinación de cantidad de resina

5.2.1 Gravimetría

En esta etapa del proyecto se evaluó la cantidad de resina por unidad de área necesaria para recubrir la matriz de concreto, los valores están registrado en la Tabla 1, el rendimiento es el cociente entre

la cantidad de resina utilizada y el área recubierta. El área recubierta con cada capa es de 0.0101m^2 . Al observar la manera descendente en la cantidad de resina utilizada a medida que aumentan el número de capas indica que la resina es absorbida por el material, y esta cierra los poros de este.

Tabla 1

Cantidad de resina utilizada en cada capa por unidad de área

Capa	Resina (g)	Rendimiento (g/m ²)	Desviación Estándar (Rendimiento)	Coefficiente de Variación
1	23.4	2320.13	82.44	3.55 %
2	17.6	1739.27	79.41	4.57 %
3	13.2	1310.23	59.68	4.56 %

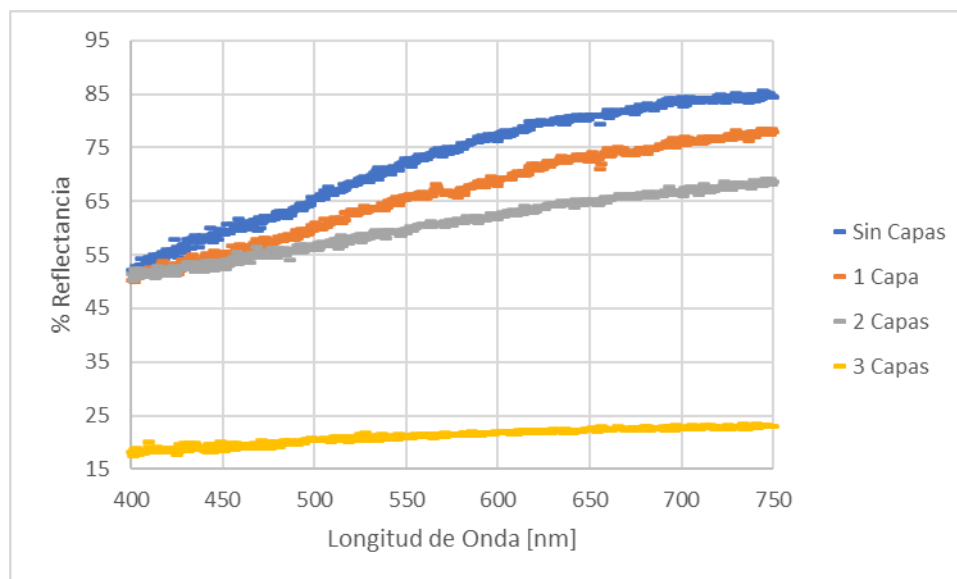
5.2.2 Reflectancia UV-Vis

Esta prueba fue realizada con el fin de corroborar el aumento del espesor de recubrimiento según cada capa agregada al cupón a través del porcentaje de luz reflejada.

En la figura 11, se presenta el rango de longitud de onda de luz escogido para incidir la superficie (cupones de concreto con y sin recubrimiento) vs el porcentaje de luz reflejada. Para cada una de las curvas encontradas se halló una ecuación representativa y esta fue usada para calcular su área bajo la curva, los cálculos pertinentes a este proceso pueden ser encontrados en el Apéndice 4, los valores del área bajo la curva fueron reportados en la Tabla 2.

Figura 11

Relación Longitud de Onda vs. Reflectancia UV-VIS



Realizando un análisis del área bajo la curva hallada a través de cada espectro con respecto a la cantidad de gramos usados (ver Tabla 2) se visualizó que a mayor cantidad de recubrimiento el sistema presenta menor área de interacción y por lo tanto, se observó un comportamiento similar al de un cuerpo negro, lo cual indica que a mayor cantidad de luz incidente es mayor la cantidad de luz absorbida por la superficie o es menor la cantidad de luz reflejada. En la figura 12 se presenta una comparación visual entre un cupón de concreto sin recubrimiento y uno con 3 capas de este, los cambios en la estructura son fáciles de percibir, por lo tanto, lo obtenido en los espectros es ratificado visualmente.

Tabla 2

Área bajo la curva de la relación de longitud de Onda Vs Reflectancia UV-VIS

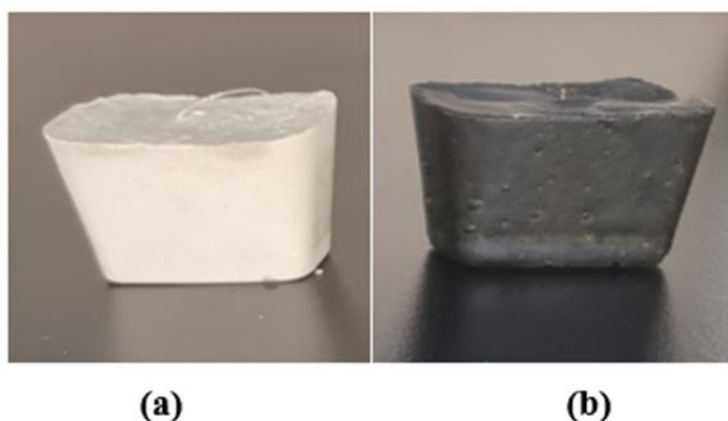
Capa	Resina (g)	Área bajo la curva (m ²)	Desviación Estándar (Área bajo la curva)	% Coeficiente de Variación
1	23.4	0.065	0.04	36.49%
2	41	0.0111	0.003	21.48%

3	54.2	0.0051	0.002	28.28%
---	------	--------	-------	--------

Área de la curva hallada con la ecuación de la recta plasmada en el Anexo 4, en los intervalos de 400 a 750 nanómetros. Relacionada con la suma de la cantidad de resina utilizada por capa aplicada con respecto al área de interés.

Figura 12

Fotografía comparativa entre (a) un cupón sin recubrir y (b) un cupón con 3 capas de recubrimiento.



5.3 Permeabilidad

La permeabilidad del agua sobre los cupones recubiertos con la resina se determinó bajo pruebas que considerarán lapsos diferentes, estas fueron ángulo de contacto e inmersión.

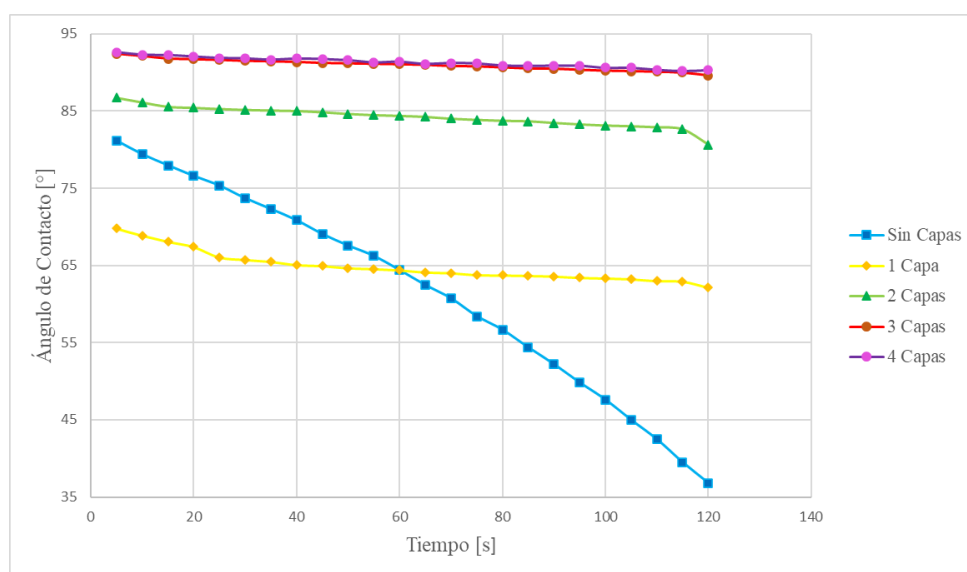
5.3.1 Ángulo de Contacto

En la elaboración de la prueba para la determinación del ángulo de contacto entre el agua y la superficie de los diferentes cupones evaluados, se realizaron 5 réplicas para cada uno de los cupones (sin recubrir, 1 capa, 2 capas, 3 capas y 4 capas), tomadas en diferentes posiciones. En la figura 14 presentada en el Anexo 2 se reporta un compilado fotográfico de la réplica #3 realizada en los cupones.

Los ángulos de contacto promedio se registraron cada 5 segundos, en un periodo de 2 minutos, se calculó la media de las 5 réplicas para cada uno de los tiempos, información encontrada en el Anexo 2. A partir de los promedios calculados para cada uno de los cupones evaluados, se construyó la comparación del comportamiento del ángulo de contacto en el tiempo (ver Figura 13).

Figura 13

Variación del ángulo de contacto en el tiempo



Las estructuras cementicias por naturaleza son porosas e hidrofílicas debido a su composición, esto se percibió en el comportamiento de la gota dispuesta sobre el cupón sin ningún tipo de recubrimiento, el ángulo inicial es de aproximadamente 80° lo cual podría representar algo de repelencia al agua, sin embargo, con el pasar de los segundos el consumo del fluido es inminente, para el minuto 2 su ángulo es de 37° aproximadamente. lo anterior indica una pérdida significativa del volumen inicial depositado, en este punto, cada una de las capas de recubrimiento se adicionaban con el fin de corroborar si se otorgaba impermeabilización a la estructura, esto debido a las propiedades de la resina PUOG y es que esta en su composición cuenta con óxido de grafeno.

Cabe resaltar que el grafeno por su estructura de capa única de átomos de carbono no presenta una afinidad por el agua, lo cual denota que la repele o le es difícil llegar a interactuar (Bernal et al., 2012). Sin embargo, la resina está formulada con óxido de grafeno, el cual es una variante que cuenta con átomos de oxígeno dentro de la estructura carbonada, esto varía de cierta manera sus propiedades, pero conserva parte de ellas. La estructura general de la resina PUOG tiende a ser hidrofóbica y las gotas de agua suelen resbalarse cuando entran en contacto con la superficie recubierta.

Al aplicar la primera capa de recubrimiento la superficie denota un ángulo inicial de 70° el cual después de los 2 minutos llegaba a ser de 62° , claramente, una capa de recubrimiento ralentiza la difusión del fluido dentro de la estructura, sin embargo, no demuestra una repelencia significativa en relación con la permeabilidad esperada.

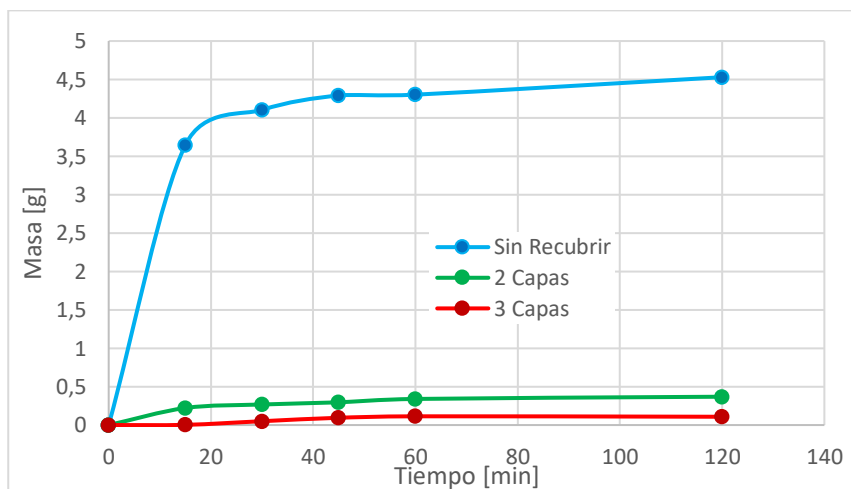
En una segunda capa gran parte de la superficie lisa y porosa está cubierta a totalidad y esto previene que el fluido llegue a difundirse, la protección se percibe sin embargo no se le describe como un comportamiento hidrofóbico, el cual se encuentra cuando el ángulo de contacto supera los 90° . El comportamiento hidrofóbico se percibe cuando se adiciona una tercera capa de recubrimiento, en este el ángulo inicial en 93° y 2 minutos más tarde es casi 90° . Se decidió adicionar una cuarta capa con el fin de percibir si el recubrimiento podía llegar a ser superhidrofóbico, sin embargo, como se percibe en la figura 13, la tercera y cuarta capa se superponen y registran un comportamiento similar lo cual nos hace entender que la variación después de una tercera capa no es significativa para invertir mayor cantidad de materia prima, pues los cambios no son significativos.

5.3.2 Inmersión en Agua

Es completamente diferente percibir como una gota con un volumen de 20 microlitros evoluciona en parte del área en cuestión a disponer toda la superficie en contacto con el fluido. Por lo tanto, al sumergir los cupones en su totalidad, la cantidad de capas de recubrimiento que estos tengan tienen una mayor labor, evitando que la porosidad sea un problema cuando sean expuestos a este ambiente. Partiendo de los resultados de la prueba de ángulo de contacto la cual arrojaba que 1 capa no era suficiente para impermeabilizar la estructura y que 4 capas era inversión innecesaria de material, por tal razón, en esta prueba se evaluaron cupones sin recubrir, 2 capas y 3 capas en un lapso de 2 horas (ver figura 15).

Figura 15

Aumento de la masa de cupones sin recubrir, con 2 capas y 3 capas sumergidos en agua a lo largo del tiempo



En los primeros minutos de la prueba se percibe un comportamiento que describe como será en la totalidad de esta, el cupón sin recubrir sin duda alguna logra permear la mayor cantidad de agua que su estructura puede almacenar, un porcentaje de 14.22% de aumento de masa. Se encontró que el porcentaje de aumento de masa en 2 horas es de 16.80%. En comparación a lo anterior y como se percibe en la misma figura 15, existe una amplia diferencia de cómo actúan los cupones con 2

capas y 3 capas de recubrimiento, al finalizar las 2 horas el cupón con 2 capas logró aumentar 1.46% de su masa inicial y el de 3 capas 0.46%, esto evidencia que aún para 2 capas de recubrimiento, este otorga un comportamiento permeable en algunas zonas. Para 3 capas, la estructura está protegida lo suficiente para evitar que el agua la permee.

5.4 Degradación en ácido

La degradación de las estructuras cementicias en un ambiente ácido fue una de las pruebas con mayor contundencia en cuanto a la labor de la resina PUOG, en la tabla 3 se presenta el comportamiento de los cupones sin recubrir, 1 capa, 2 capas y 3 capas en un lapso de 24 horas. El cupón sin recubrir es desintegrado en su totalidad. Por el contrario, se evidencia una ralentización en el deterioro de las estructuras cuando estas presentan un recubrimiento de la resina PUOG, actuando esta última como una barrera protectora.

Tabla 3

Porcentaje de pérdida de masa en un lapso de 24 horas durante la degradación ácida de estructuras de concreto con y sin resina PUOG

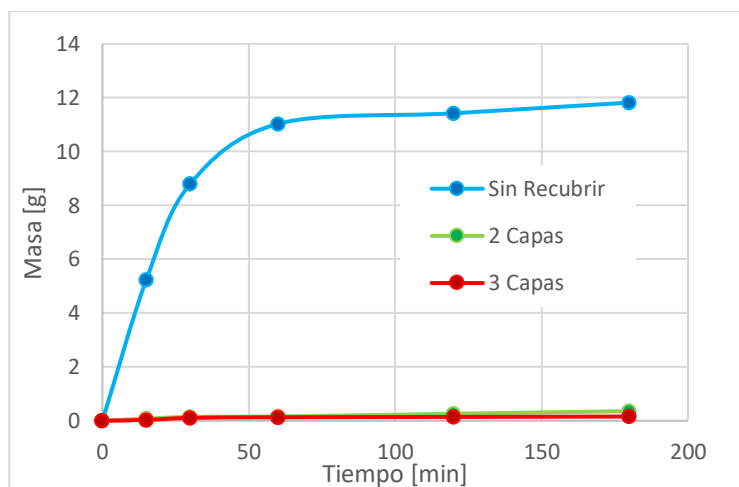
Tipo Cupón	Sin Recubrimiento	1 Capa	2 Capas	3 Capas
Masa Inicial [g]	22,09	22,41	23,45	23,38
Masa Final [g]	0	22,26	23,38	23,34
Perdida masa [g]	22,09	0,15	0,07	0,04
% Pérdida	100	0,66	0,29	0,16

Se debe aclarar que la destrucción total de la estructura de concreto sin recubrir se debe a la reacción ácido-base que se da a lugar de manera inmediata. Desde el momento inicial de contacto del cupón sin recubrir con la solución de ácido clorhídrico se observó el deterioro de la estructura, en esta reacción el ácido interactúa con todos los componentes alcalinos de la estructura de concreto, liberando iones de cloruro.

El ácido clorhídrico tiende a reaccionar fuertemente con sustancias básicas, las cuales hacen parte del concreto, cuando se hizo uso de la resina PUOG se evidenció ralentización del ataque ácido a la estructura, puesto que, la barrera protectora actúa como un inhibidor de la reacción, la razón principal es que el recubrimiento puede describirse bajo el mismo comportamiento ácido que la solución, ya que en la resina PUOG está presente el óxido de grafeno y sus grupos funcionales oxigenados denotan este comportamiento, sin embargo, esto no significa que no exista interacción en el tiempo. La exposición de la estructura de concreto al ataque de la solución acida está en función de la cantidad de capas de recubrimiento dispuestas, a mayor cantidad de recubrimiento dispuesto menor es el área de concreto expuesta al daño.

Figura 16

Pérdida de masa de cupones sin recubrir, 2 capas y 3 capas sumergidos en solución HCl al 5%

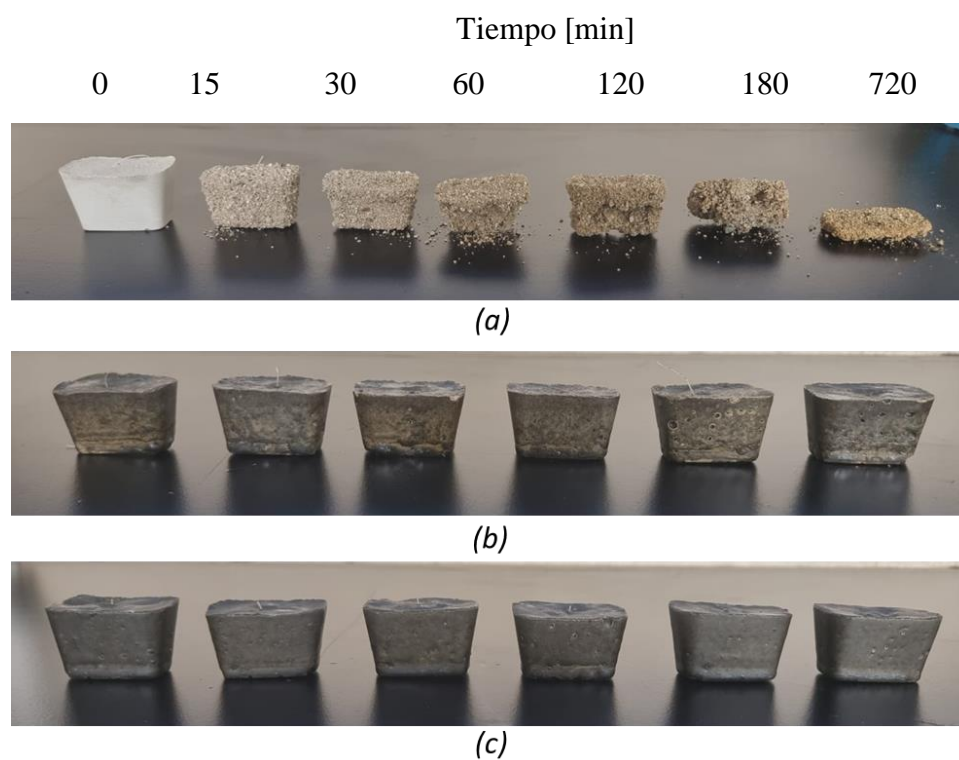


En la figura 16 se presenta la evolución de la pérdida de masa en un tiempo de 180 minutos de cupones sin recubrir, 2 capas y 3 capas. En esta figura se puede corroborar como desde el momento inicial de exposición la reacción se da lugar y la degradación es inminente. El porcentaje de pérdida reportado a las 3 horas de avanzado el experimento para los cupones sin recubrir, 2 capas y 3 capas es de 85.23%, 2.1%, 0.9% respectivamente, la evolución de esto se captó fotográficamente y se presenta en la figura 17, en la cual se logra evidenciar como en los cupones con 2 y 3 capas la

solución ácida ataca solo las zonas críticas de la estructura, estas zonas son los bordes y los poros característicos del concreto, en los cuales existe mayor probabilidad de aparición de pequeñas áreas sin recubrir que pueden reaccionar directamente con el ambiente.

Figura 17

Evolución fotográfica del ataque de la solución de HCl al 5% en un tiempo de 720 minutos en cupones de concreto (a) sin recubrimiento, (b) 2 Capas y (c) 3 Capas



5.5 Desprendimiento (Pull-Off)

5.5.1 Sistema Concreto-Recubrimiento sobre metal

Tabla 2

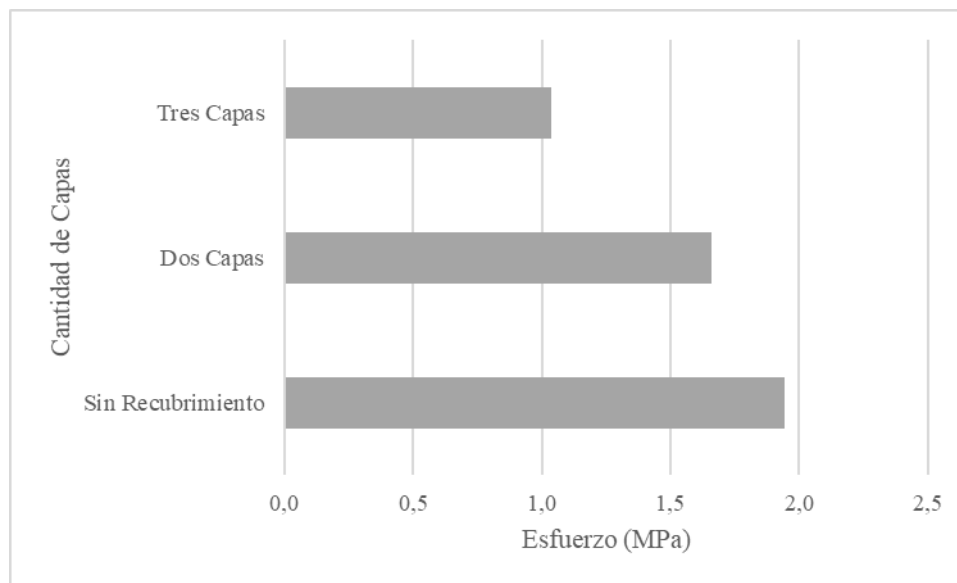
Resultados Prueba Pull-Off sobre Dolly metálico

Tipo de Muestra	Fuerza (N)	Esfuerzo (MPa)	Desviación Estándar (Fuerza)	% Coeficiente de Variación
-----------------	------------	----------------	------------------------------	----------------------------

Sin Recubrimiento	1867,8	1,9	625,18	50.20%
Dos Capas	1596,9	1,7	181,81	13.06%
Tres Capas	996,3	1,0	82,07	11.21%

Figura 18

Relación Sistema Dolly Vs Esfuerzo (MPa)

**Figura 19**

Dolly metálico desprendido del sistema



En esta prueba se utilizaron Dolly metálicos para hallar el valor de fuerza necesaria para desprenderse de la matriz cementicia con diferente cantidad de recubrimiento PUOG, estos datos fueron plasmados en la tabla 4, e ilustrados en la Figura 18.

Como se puede evidenciar en la Figura 19, se observó que a medida en que se aumenta el número de capas la resistencia entre los sistemas es menor, es decir, necesita menor esfuerzo. Lo cual se puede corroborar en la figura 16, esto ocurrió ya que, al obtener menos capas, tenemos más poros y consigo regiones donde se puede acoplar concreto fresco, siendo menos hidrofóbica la superficie y obteniendo más cantidad de concreto expuesto para presentar la falla.

5.5.2 Sistema Concreto-Recubrimiento sobre Concreto

Por otro lado, tenemos el sistema Cemento-Recubrimiento sobre cemento, realizado para demostrar que tan compatible puede ser una superficie recubierta con la resina y el concreto fresco aplicado sobre esta misma, Tabla 5 y Figura 20. La cual actúa de la misma manera del anterior sistema, entre mayor sean las capas de recubrimiento menor es la fuerza requerida para separar la matriz de cemento, sin presentar problema en el recubrimiento, solo en la matriz cementicia y la falla se puede dar debido a la naturaleza del material.

Tabla 3

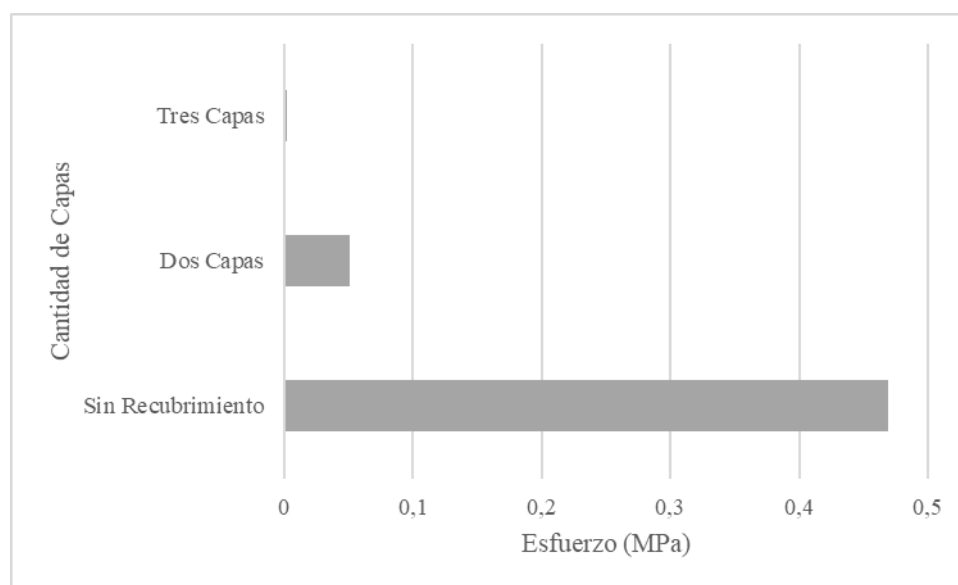
Resultados prueba Pull-Off sobre concreto

Tipo de Muestra	Fuerza (N)	Esfuerzo (MPa)	Desviación Estándar (Fuerza)	% Coeficiente de Variación
Sin Recubrimiento	996.8	0.5	173.32	20.74%
Dos Capas	107.2	0.05	5.24	5.17%
Tres Capas	3.93	0.002	0.65	19.50%

En las dos pruebas Pull-Off realizadas, se pudo constatar que al ser recubierto un sistema metálico o un sistema de concreto con la resina PUOG, se obtiene la garantía que, al presentarse algún tipo de desprendimiento en el sistema, la resina PUOG, no se verá afectada. Por lo que nos garantiza que las propiedades otorgadas por la resina, como lo es la permeabilidad no tendrán ningún cambio. Así como lo demostraron las pruebas, las fallas con este tipo de alteración como lo es un desprendimiento, se verá en el concreto.

Figura 20

Relación Sistema Concreto Vs Esfuerzo (MPa)



6 Conclusiones

El método más eficiente para la aplicación de la resina PUOG sobre concreto fue el uso de un objeto poroso como una esponja, debido al potencial que tienen para disponer la resina, esto fue corroborado mediante la medición del espesor. Asimismo, se logró evidenciar por gravimetría y espectroscopia de reflectancia Uv-Vis que la cantidad de resina aplicada sobre el área tiende a disminuir a medida que se adiciona una capa, demostrando que la resina cubre la estructura porosa de los cupones de concreto.

Se pudo estimar que el sistema formado por la resina PUOG y el concreto presenta muy buena adhesión. En las pruebas de permeabilidad y degradación bajo el ambiente ácido se evidencian mejoras en la estructura desde la primera capa aplicada. Se evidenció que el cupón de concreto a partir de la 2 capa de resina PUOG aplicada puede exponerse a ambientes hostiles por un periodo de tiempo más prolongado. Por otra parte, adicionar más de 3 capas en la estructura no representa cambios notorios en las propiedades del sistema, por lo que se recomienda aplicar 3 capas de recubrimiento. presentando mejoras en la impermeabilidad del agua en un 99,54%, y evitando la degradación por un agente ácido en un 99,32%.

Por medio de la prueba Pull-Off fue ratificada la adhesión interfacial entre la resina PUOG y un sistema de concreto, a través de la adhesión de un Dolly metálico aplicando pruebas de desprendimiento, las cuales nos indicaron que al usar la resina PUOG no tendremos fallas en la interfaz del sistema, las fallas fueron observadas en la matriz cementicia, la cual para desprender un Dolly metálico a un sistema sin capas necesita 1.9MPa de esfuerzo y para desprender el mismo Dolly de un sistema con 3 capas necesitamos 1MPa, por lo que podemos concluir que la resina PUOG no presentará fallas frente a esfuerzos aplicados en sistemas recubiertos, esta resina seguirá sin ningún cambio, y el sistema fallará debido a su naturaleza, es por esto que la resina es efectiva y nos ayuda a tener la certeza que el sistema no perderá propiedades como las anteriormente nombradas que son otorgadas por la resina.

Referencias Bibliográficas

- Aguirre, A., Acosta, A. (2023). Eficiencia de recubrimientos químicos en la resistencia a la compresión y permeabilidad de un concreto para estructuras hidráulicas, Trujillo 2022 [Tesis, Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/33098>
- Almusallam, A.; Khan, F.; Dulaijan, S.; Al-Amoudi, O. Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability. *Cem. Concr. Compos.* 2003, 25, 473–481.
- British Standards Institution. BS EN 1504-2, Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures—Definitions, Requirements, Quality Control and Evaluation of Conformity—Part 2: Surface Protection Systems for Concrete; BSI: London, UK, 2004.
- British Standards Institution. BS EN 1504:2005 Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures—Definitions, Requirements, Quality Control and Evaluation of Conformity—Part 3: Structural and Non-structural Repair; BSI: London, UK, 2005.
- Cristian Gerardo Barbosa Galeano, Juan Sebastian Mayorga Rojas, “Caracterización Mecánica del Concreto Reforzado Con Fibras de Fique Modificando la Matriz Cementicia Con Aditivo a Base de Humo de Sílice”, Universidad Piloto de Colombia, 2015.
- De Medeiros, M.H.F.; Helene, P. Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. *Constr. Build. Mater.* 2009, 23, 1476–1484.
- Díaz-Barriga, L. G., Palacios, E., Macías-Hernández, M. J., & Garibay-Febles, V. (2013). ELABORACIÓN DE UN RECUBRIMIENTO EPÓXICO REFORZADO CON NANOESTRUCTURAS DE CARBURO DE ZIRCONIO. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(4), 85-94.
- Egger Roa, J. (2020). Análisis experimental de fatiga cíclica en barras de refuerzo de acero de alta resistencia mediante fotogrametría. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/176190>
- Giudice, Carlos Alberto; Pereyra, Andrea Marisa; Tecnología de pinturas y recubrimientos: Componentes, formulación, manufactura y control de calidad; Universidad Tecnológica Nacional; 2009; 429
- Guide for Design of Jointed Concrete Pavements for Streets and Local Roads. American Concrete Institute.
- Guzmán Dagnino, F. N. (2020). Síntesis y caracterización de poliuretanos basados en polifenoles condensados y diisocianato para el desarrollo de recubrimientos resistentes al fuego.
- Harmsen, T. E. (2005). Diseño de estructuras de concreto armado. Fondo editorial PUCP.
- Jimenez Miguel Angel, Torres Fidel Arturo, ANÁLISIS SISTEMÁTICO DE LITERATURA – ANALISIS DE UN CONCRETO CONVENCIONAL CON UN CONCRETO CON MATERIAL ALTERNATIVO (BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR), 2021, Santa Marta

Colombia, <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/d9badc44-d0df-4551-88cc-a832ff82ca25/content>

- Juarez ATA Gregory, “Análisis de resistencia a compresión del concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$ con sustitución de 5%, 10% y 15% perlas de poliestireno expandido, Cusco-2020, https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/66720/Juarez_AG-Quispe_PC-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Łukasz Sadowski, Jerzy Hoła, Andrzej Żak, Agnieszka Chowaniec, "Microstructural and mechanical assessment of the causes of failure of floors made of polyurethane-cement composites", (2019),<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.
- Mallakpour, S. & Behranvand, V. Nanocomposites based on biosafe nano ZnO and different polymeric matrixes for antibacterial, optical, thermal and mechanical applications. *Eur. Polym. J.* 84, 377–403 (2016).
- Manuel Fernandez Canovas, INFLUENCIA DE LA COMPACTACIÓN Y CONSERVACIÓN DE PROBETAS DURANTE SU PERMANENCIA EN OBRA, ASÍ COMO SU POSTERIOR REFRENTADO EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN (PERÍODO 1997-2007), 2010, Madrid España.
- Martínez, D. A. G., Alarcón, J. F. N., Viguera, E., & López, S. H. (2022). Poliuretanos eco-amigables: Síntesis a partir de fuentes naturales y aplicaciones. In *Materiales Avanzados y Nanomateriales: aprovechamiento de fuentes naturales y sus beneficios al medio ambiente* (p. 35). OmniaScience.
- Masciotra G. “Fibras para refuerzo de hormigón y morteros”, *Revista Hormigonar*, Año 3, Edición No. 7, 2005. pp 16 – 23.
- McCormac, J.C. and Brown, R.H. (2015) *Design of Reinforced Concrete*. Wiley, Hoboken. Vol 10, <https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-18509059-b0e212c096.pdf>
- Meneses, Moro, J. M., Aveldaño, R. R., & Ortega, N. F. (2016). Influencia del espesor del recubrimiento de elementos de hormigón armado expuestos a procesos de corrosión y sometidos a cargas externas. *Revista ALCONPAT*, 6(2), 129–144. <https://doi.org/10.21041/ra.v6i2.134>
- Montes Nancy, *Vista de Cementos Alcalinos: Materiales de Construcción Ecológicos*. Available at: <https://revistas.pascualbravo.edu.co/index.php/cintex/article/view/42/44> (Accessed: 01 September 2023).
- Nemati K., “Progress in concrete technology. Fiber Reinforced Concrete”, CM 425, *Concrete Technology*, University Of Washington, 2013
- Pan, X.; Shi, Z.; Shi, C.; Ling, T.-C.; Li, N. A review on concrete surface treatment Part I: Types and mechanisms. *Constr. Build. Mater.* 2017, 132, 578–590.
- Qureshi, T., Wang, G., Mukherjee, S., Akibul Islam, M., Filleter, T., Singh, C. V., & Panesar, D. K. (2022). Graphene-based anti-corrosive coating on steel for reinforced concrete infrastructure applications: Challenges and potential. *Construction and Building Materials*, 351 doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.128947

- Rivera Ortiz, Díaz Blanco, Y., Menchaca Campos, E. C., & Uruchurtu Chavarín, J. (2021). Utilización del quitosano como recubrimiento orgánico para prevenir/inhibir la corrosión del concreto reforzado. *Revista ALCONPAT*, 11(2), 38–60. <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.519>
- Rodríguez M., Evaluación del desempeño de un hormigón con incorporación de vidrio reciclado finamente molido en reemplazo de cemento mediante ensayos de laboratorio, 2016, Argentina, <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54225524>.
- Rodríguez Remigio, D. M. (2020). Evaluación de la aplicación de recubrimientos Epoxi y Poliuretano alifático para la inhibición de la corrosión en las virolas de tuberías forzadas de la hidroeléctrica Machupichu–2019.
- Santiago Patricia, E. (2011). Diferentes tipos de aditivos para el concreto. Monografía, Universidad Veracruzana, Veracruz - México.
- S. Chandra and L. Berntsson, “Lightweight Aggregate Concrete-Science, Technology, and Applications,” William Andrew Publishing/Noyes, Chapter 8, 2002, pp. 231-240.
- Su, W-F., Fu, Y-Ch. & Pan, W-P. (2002). Thermal properties of high refractive index epoxy resin system. *Acta Thermochemica*, 392-393, 385-389.
- Vipulanandan, C.; Liu, J. Performance of polyurethane-coated concrete in sewer environment. *Cem. Concr. Res.* 2005, 35, 1754–1763.
- Woo, R.S.C.; Zhu, H.; Chow, M.M.; Leung, C.K.; Kim, J.-K. Barrier performance of silane–clay nanocomposite coatings on concrete structure. *Compos. Sci. Technol.* 2008, 68, 2828–2836.
- Xiaoying Pan, Zhenguang Shi, Caijun Shi, Tung-Chai Ling, Ning Li, A review on surface treatment for concrete – Part 2: Performance, Construction and Building Materials, Volume 13 2017, Pages 81-90, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.128>.
- Yansong Kang, Zenghui Feng, Xinhua Jiang, Lanxuan Liu, Jiafa Tao, Xiwang Huang, Weiwei Wang, Xiangding Xiao, "Study on Properties of Epoxy Composites Modified by Functional Graphite Oxide and Polyurethane", *Journal of Nanomaterials*, vol. 2022, Article ID 2302131, 12 pages, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/2302131>
- Y. Zhang, L. Liu, B. Sun, G. Wang, Z. Zhang, Preparation of lipophilic graphene oxide derivatives via a concise route and its mechanical reinforcement in thermoplastic polyurethane, *Compos. Sci. Technol.* 134 (2016) 36–42, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.07.027>.

Apéndices

Apéndice A: Cálculo de área bajo la curva según espectros de la prueba UV-Vis

Según los espectros de reflectancia encontrados bajo la prueba UV-Vis se hallaron las funciones que describen el comportamiento de cada para posteriormente ser integradas y evaluar en los respectivos intervalos seleccionados como se muestra a continuación.

1 Capa

$$y(x) = 0,0824x + 18,802m^2$$

$$\int_{0,0004}^{0,00075} y = 0,0824x + 18,802$$

$$\frac{x(103x + 47005)}{2500} + C = 0,065m^2$$

2 Capas

$$y(x) = 0,0522x + 30,571$$

$$\int_{0,0004}^{0,00075} y = 0,0522x + 30,571$$

$$\frac{x(261x + 305710)}{10000} + C = 0,011m^2$$

3 Capas

$$y(x) = 0,0137x + 13,261$$

$$\int_{0,0004}^{0,00075} y = 0,0137x + 13,261$$

$$\frac{x(137x + 265220)}{20000} + C = 0,005m^2$$

Apéndice B: Prueba de degradación

En la tabla 13 se consolida el comportamiento de los cupones que fueron sumergidos totalmente en la solución ácida de HCl al 5% en un tiempo de 3 horas.

Tabla 6

Resumen del comportamiento de cupones sin recubrir, con 2 y 3 capas de resina PUOG sumergidos en solución ácida de HCl al 5%.

Cupones Sin Recubrir						
Masa [g]/Tiempo [min]	0	15	30	60	120	180
Masa Inicial	0	22,1	21,0	22,3	19,9	20,0
Masa Final	0	16,9	12,2	11,2	8,5	8,2
Perdida masa	0	5,2	8,8	11,0	11,4	11,8
% Pérdida	0	23,7	41,9	49,5	57,4	59,2
Cupones 2 Capas						
Masa [g]/Tiempo [min]	0	15	30	60	120	180
Masa Inicial	0	23,6	24,0	22,8	23,2	24,5
Masa Final	0	23,5	23,9	22,7	23,0	24,1
Perdida masa	0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4
% Pérdida	0	0,3	0,6	0,7	1,1	1,5
Cupones 3 Capas						
Masa [g]/Tiempo [min]	0	15	30	60	120	180

Masa Inicial	0	24,6	23,1	24,5	24,6	23,5
Masa Final	0	24,6	23,0	24,3	24,4	23,3
Perdida masa	0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2
% Pérdida	0	0,1	0,5	0,5	0,6	0,7

Apéndice C: Prueba de Espesor

En la tabla 6 presenta los valores exactos de espesor en micrómetros calculados en los 5 puntos equidistantes localizados en cada una de las superficies con una capa de recubrimiento dispuesta con brocha y esponja.

Tabla 7

Espesor de la resina PUOG dispuesta con brocha y esponja sobre un sistema de concreto

Toma	Brocha		Esponja	
	Espesor [μm]	Promedio [μm]	Espesor [μm]	Promedio [μm]
1.1	35.2	34.55	49.8	49.45
1.2	29.8		49.2	
1.3	33.9		49.1	
2.1	20.9	27	44.4	45.5
2.2	18.6		48.8	
2.3	33.1		46.6	
3.1	14.7	15.2	44.7	44.6
3.2	18.6		43.5	
3.3	15.7		44.5	
4.1	23.3	24.5	44.8	44.4

4.2	35		45.2	
4.3	25.7		44	
5.1	55.5	50.8	40.1	41.2
5.2	51.9		41.7	
5.3	46.1		42.3	

Método de Aplicación	Brocha	Esponja
Desviación	13.33	2.96
% Coeficiente de Variación	43.84	6.57

Apéndice D: Prueba de permeabilidad del agua

Para esta sección se cuenta con la información tomada para las 2 subpruebas realizadas, en la tabla 7 se consolida el comportamiento de los cupones que fueron sumergidos totalmente en agua en un tiempo de 2 horas.

Tabla 8

Resumen del comportamiento de cupones sin recubrir, con 2 y 3 capas de resina PUOG sumergidos en agua

Cupones Sin Recubrir						
Masa [g]/Tiempo [min]	0	15	30	45	60	120
Masa Inicial	0	22,0	22,4	22,0	22,0	22,4
Masa Final	0	25,6	26,5	26,3	26,3	27,0
Aumento masa	0	3,6	4,1	4,3	4,3	4,5
% Aumento	0	14,2	15,5	16,3	16,4	16,8

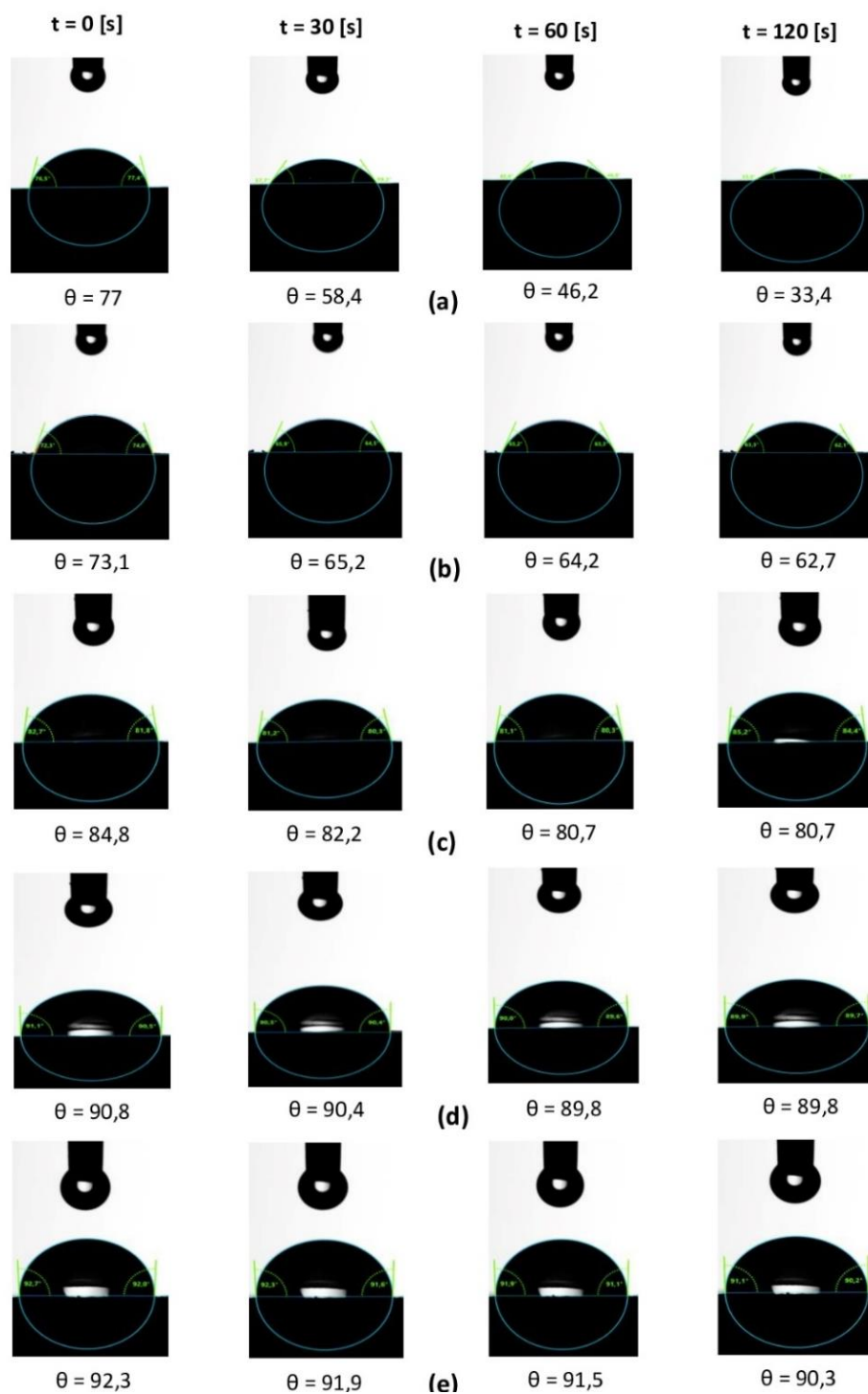
Cupones 2 Capas de Recubrimiento						
Masa [g]/Tiempo [min]	0	15	30	45	60	120
Masa Inicial	0	24,3	24,9	23,7	24,3	24,9
Masa Final	0	24,6	25,1	24,0	24,7	25,2
Aumento masa	0	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4
% Aumento	0	0,9	1,1	1,2	1,4	1,5

Cupones 3 Capas de Recubrimiento						
Masa [g]/Tiempo [min]	0	15	30	45	60	120
Masa Inicial	0	25,8	23,4	23,5	25,8	23,4
Masa Final	0	25,8	23,5	23,6	25,9	23,5
Aumento masa	0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1

% Aumento	0	0,0	0,2	0,4	0,4	0,5
-----------	---	-----	-----	-----	-----	-----

Figura 21

Evolución fotográfica del ángulo de contacto de una gota de agua sobre cupones de concreto con y sin resina PUOG. (a) Sin recubrimiento, (b) 1 Capa, (c) 2 Capas, (d) 3 Capas, (e) 4 Capas



A continuación, se presenta los datos reportados en prueba de permeabilidad haciendo uso de una gota de 20 microlitros localizada en la superficie del sistema, en las tablas 8,9,10,11,12 y figuras

21,22,23,24,25 se reportan los datos encontrados cada 5 segundos por el equipo de determinación de ángulo de contacto.

Tabla 9

Comportamiento de una gota de agua sobre un sistema de concreto sin recubrir

SIN RECUBRIMIENTO			
# Etapa	Tiempo [seg]	AC(M) [°]	Volumen [μL]
1	0	80,78	4,647
2	5	81,16	8,976
3	10	79,40	8,741
4	15	77,96	8,150
5	20	76,59	7,902
6	25	75,33	7,723
7	30	73,70	7,276
8	35	72,30	7,020
9	40	70,84	6,553
10	45	69,06	6,179
11	50	67,57	6,209
12	55	66,22	5,679
13	60	64,39	5,353
14	65	62,45	5,059
15	70	60,73	4,742
16	75	58,42	4,399
17	80	56,66	4,122
18	85	54,38	3,826
19	90	52,20	3,524
20	95	49,82	3,238
21	100	47,60	2,974

22	105	44,97	2,685
23	110	42,47	2,381
24	115	39,49	2,123

Figura 22

Evolución en el tiempo de una gota de agua sobre un sistema de concreto sin recubrir

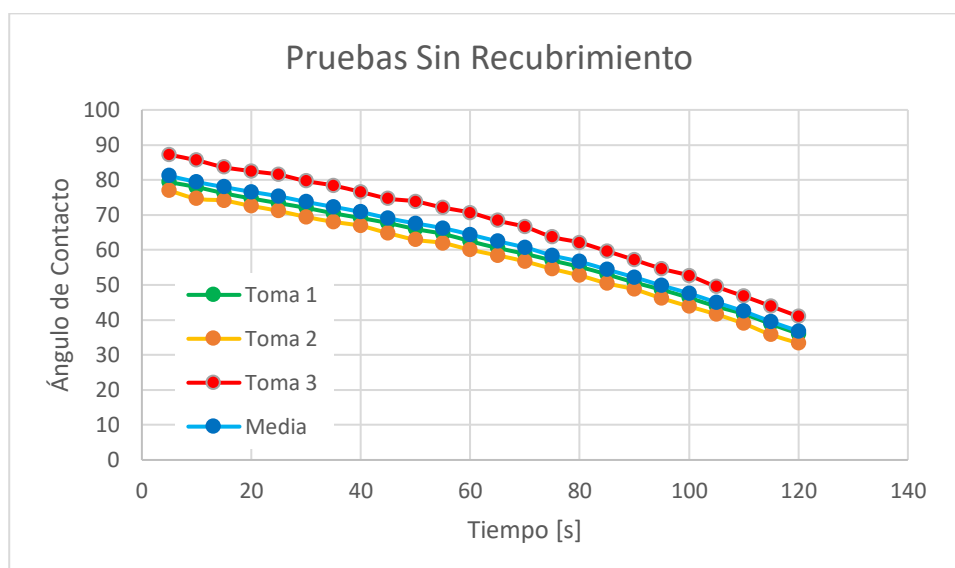
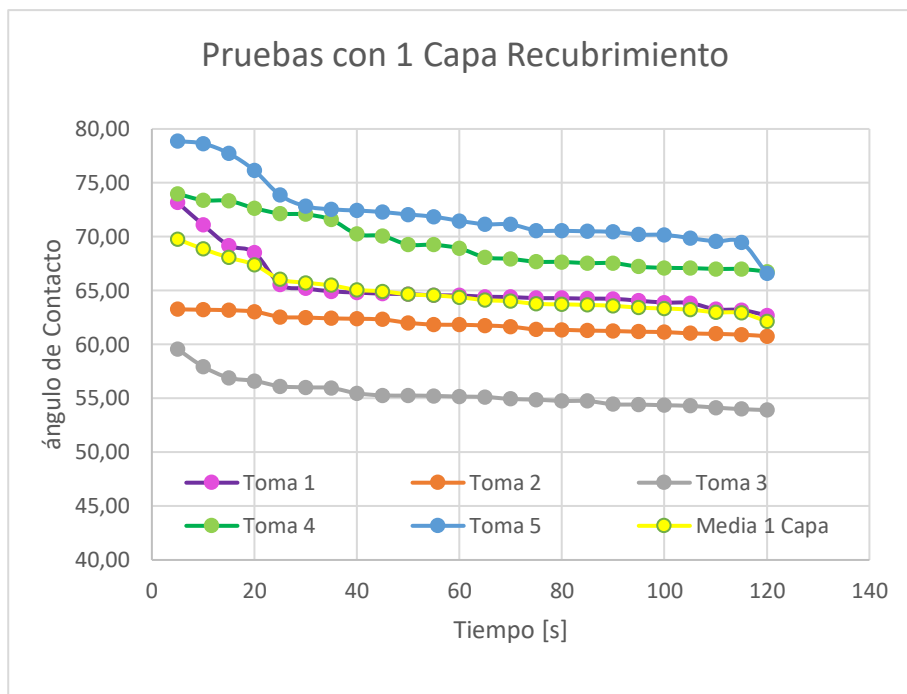


Figura 23

Comportamiento de una gota de agua sobre un sistema de concreto con 1 capa PUOG

**Tabla 10**

Comportamiento de una gota de agua sobre un sistema de concreto con 1 capa PUOG

1 CAPA			
# Etapa	Tiempo [s]	AC(M) [°]	Volumen [μL]
1	5	69,77	7,369
2	10	68,86	7,082
3	15	68,07	6,959
4	20	67,40	6,901
5	25	66,05	6,850
6	30	65,72	6,820
7	35	65,49	6,788
8	40	65,07	6,724
9	45	64,93	6,701
10	50	64,66	6,666
11	55	64,55	6,630

12	60	64,39	6,597
13	65	64,11	6,541
14	70	64,01	6,504
15	75	63,77	6,482
16	80	63,73	6,457
17	85	63,67	6,434
18	90	63,59	6,406
19	95	63,42	6,382
20	100	63,34	6,359
21	105	63,23	6,310
22	110	62,99	6,256
23	115	62,92	6,219
24	120	62,15	5,997

Tabla 11

Comportamiento de una gota de agua sobre un sistema de concreto con 2 capas PUOG

2 CAPAS			
# Etapa	Tiempo [s]	AC(M) [°]	Volumen [μL]
1	0	78,66	4,531
2	5	86,75	8,832
3	10	86,14	8,745
4	15	85,58	8,622

5	20	85,43	8,571
6	25	85,28	8,535
7	30	85,17	8,511
8	35	85,09	8,484
9	40	85,02	8,467
10	45	84,86	8,437
11	50	84,64	8,339
12	55	84,48	8,284
13	60	84,38	8,247
14	65	84,26	8,216
15	70	84,02	8,186
16	75	83,87	8,176
17	80	83,74	8,139
18	85	83,68	8,091
19	90	83,47	8,077
20	95	83,28	7,995
21	100	83,12	7,956
22	105	83,03	7,889
23	110	82,90	7,831
24	115	82,63	7,752

Figura 24

Comportamiento de una gota de agua sobre un sistema de concreto con 2 capas PUOG

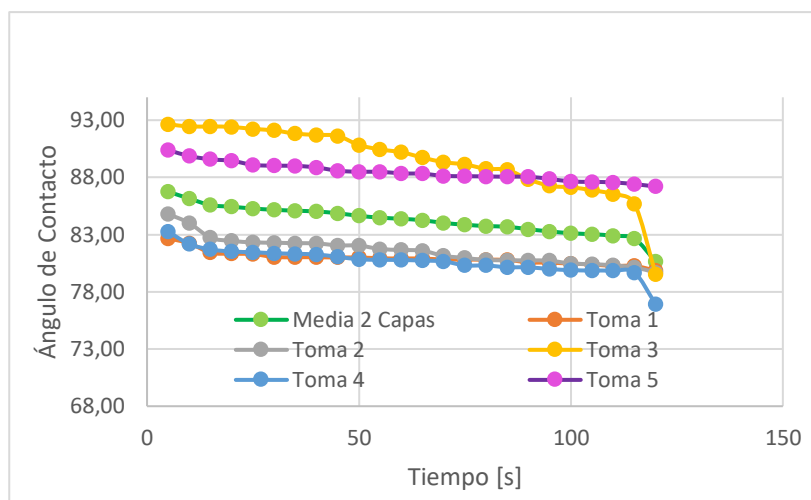


Figura 25

Comportamiento de una gota de agua sobre un sistema de concreto con 3 capas PUOG

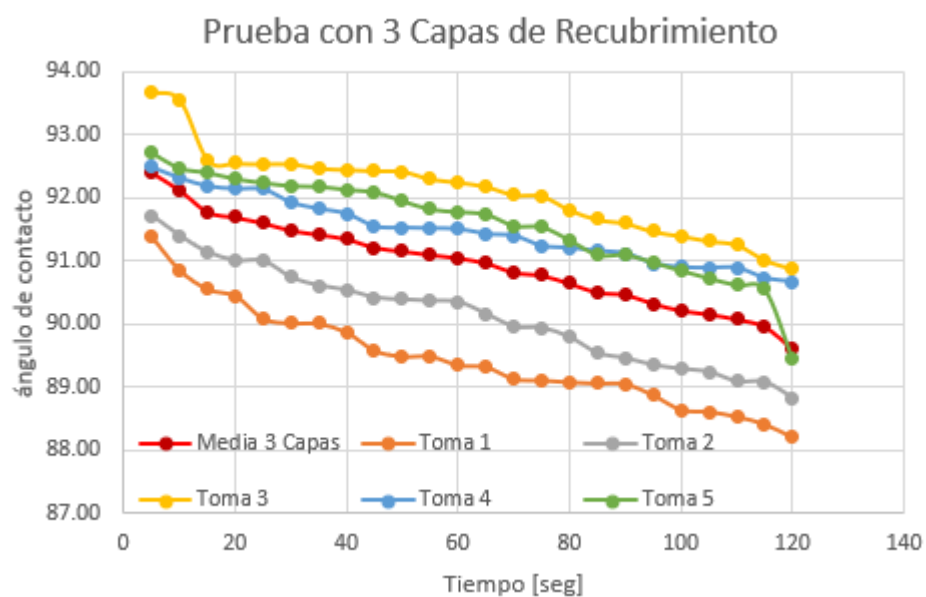


Tabla 12

Comportamiento de una gota de agua sobre un sistema de concreto con 3 capas PUOG

3 CAPAS			
# Etapa	Tiempo [s]	AC(M) [°]	Volumen [μL]
1	0	78,49	4,735
2	5	92,40	9,280
3	10	92,12	9,062
4	15	91,78	9,022
5	20	91,69	8,994
6	25	91,60	8,947
7	30	91,48	8,917
8	35	91,42	8,900
9	40	91,35	8,879
10	45	91,21	8,865
11	50	91,16	8,827
12	55	91,10	8,800
13	60	91,05	8,783
14	65	90,97	8,754
15	70	90,82	8,721
16	75	90,77	8,697
17	80	90,64	8,625
18	85	90,50	8,601
19	90	90,47	8,523
20	95	90,33	8,491
21	100	90,22	8,450
22	105	90,16	8,412
23	110	90,08	8,401
24	115	89,96	8,357

Tabla 13

Comportamiento de una gota de agua sobre un sistema de concreto con 4 capas PUOG

4 CAPAS			
# Etapa	Tiempo [s]	AC(M) [°]	Volumen [μL]
1	5	92,61	9,322
2	10	92,28	9,253
3	15	92,24	9,233
4	20	92,06	9,218
5	25	91,87	9,137
6	30	91,82	9,129
7	35	91,65	9,055
8	40	91,79	9,107
9	45	91,73	9,108
10	50	91,58	9,077
11	55	91,30	9,002
12	60	91,38	9,024
13	65	91,11	8,969
14	70	91,22	8,960
15	75	91,16	8,959
16	80	90,90	8,851
17	85	90,84	8,851
18	90	90,88	8,835
19	95	90,87	8,850
20	100	90,60	8,766

21	105	90,60	8,825
22	110	90,35	8,699
23	115	90,18	8,646
24	120	90,30	8,687

Figura 26

Comportamiento de una gota de agua sobre un sistema de concreto con 4 capas PUOG

