



Evaluación de las propiedades mecánicas de revestimientos Cured-In-Place Pipe (CIPP) utilizados en la rehabilitación de tuberías de alcantarillado

Ing. José Julián Velásquez Agudelo

Pontificia Universidad Javeriana
Facultad de ingeniería
Departamento de ingeniería civil
Bogotá Colombia
2021



Evaluación de las propiedades mecánicas de revestimientos Cured-In-Place Pipe (CIPP) utilizados en la rehabilitación de tuberías de alcantarillado

Trabajo de grado para optar al título de:
Magister en Ingeniería Civil

Ing. José Julián Velásquez Agudelo

Director
Ing. Diego Raúl Calderón Ballesteros

Pontificia Universidad Javeriana
Facultad de ingeniería
Departamento de ingeniería civil
Bogotá Colombia
2021

Tabla de Contenido

1. Introducción	4
2. Pregunta de investigación	5
3. Hipótesis	5
4. Objetivos	5
5. Artículo de investigación	5

1. Introducción

Esta investigación está enfocada en la evaluación de las propiedades mecánicas de flexión y tracción de revestimientos de CIPP en la rehabilitación de redes de alcantarillado de la ciudad de Bogotá. La revisión de las propiedades mecánicas de los revestimientos, son parte fundamental de un programa de control de calidad, que permita la comparación contra valores mínimos establecidos para el material, según las normas internacionales ASTM F1216 y ASTM F2019. Este trabajo presenta un análisis de las propiedades mecánicas obtenidas por medio de ensayos de resistencia a flexión y a tracción tomados en laboratorio para materiales de revestimiento recolectados de tres proyectos de rehabilitación de la red de alcantarillado de la ciudad de Bogotá, suministrados por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP). Con la ejecución de ensayos de laboratorio realizados en la Pontificia Universidad Javeriana, se logró identificar el cumplimiento o no, de los valores mínimos exigidos por las normas técnicas. Adicionalmente se realizó un análisis comparativo de los resultados, con los obtenidos por investigaciones similares y tendencias internacionales. En consecuencia, el producto de esta investigación, se sugiere que el proceso constructivo y las actividades de instalación del revestimiento pueden jugar un papel importante en los resultados de los ensayos mecánicos del material y es necesario un control estricto de calidad para garantizar la aceptación de las tecnologías sin zanja en el país. Con estos resultados, la EAAB-ESP podrá tomar medidas inmediatas frente a la situación actual y futura del procedimiento y resultado de estas tecnologías en la capital colombiana.

2. Pregunta de investigación

¿Las muestras recolectadas de algunos de los revestimientos de alcantarillado instalados por la tecnología sin zanja CIPP en la ciudad de Bogotá, cumplen con las propiedades mecánicas mínimas reguladas por la normatividad ASTM?

3. Hipótesis

El 70% de las muestras validas obtenidas de revestimientos CIPP en la rehabilitación de alcantarillados de la ciudad de Bogotá, cumplen con los valores mínimos de las propiedades mecánicas establecidos por la normatividad ASTM.

4. Objetivos

Objetivo General:

Evaluar las propiedades mecánicas de materiales utilizados para la rehabilitación de tuberías de alcantarillado mediante la tecnología sin zanja ‘Cured-In-Place Pipe’ (CIPP).

Objetivos Específicos:

1. Caracterizar mediante ensayos de laboratorio, las propiedades mecánicas de resistencia a flexión, módulo de elasticidad a flexión y resistencia a tracción de distintos revestimientos en CIPP.
2. Realizar un análisis comparativo de las propiedades mecánicas de distintos materiales de CIPP probados en laboratorio con respecto a los valores mínimos exigidos por la normatividad vigente y resultados de investigaciones similares y tendencias internacionales.

5. Artículo de investigación

Evaluation of the mechanical properties of Cured-In-Place Pipe (CIPP) lining used for the rehabilitation of wastewater pipelines

Evaluación de las propiedades mecánicas de revestimientos Cured-In-Place Pipe (CIPP) utilizados en la rehabilitación de tuberías de alcantarillado

ABSTRACT

Trenchless technologies are a set of methods and techniques used for the rehabilitation of underground infrastructure. One of the most commonly used method for the rehabilitation of wastewater pipelines is the Cured-In-Place Pipe (CIPP). Since the first use of this technology in Colombia, there has not been a thorough research on the mechanical behaviour of installed liners. The review of the mechanical properties of liners is a fundamental part of a quality control program, that allows a comparison against the minimum values established for the lining material, in international standards such as ASTM F1216 and ASTM F2019. In this regard, this article presents an analysis of the mechanical properties obtained in laboratory for flexural and tensile strength tests, for lining materials collected at three sewer rehabilitation projects in the city of Bogotá. The mean values obtained, show that 67% of the tested samples comply with the bending requirements proposed in current regulations and standards. Based on comparisons with similar studies and international trends, this research suggests that the construction process and lining installation activities may play an important role in the results of the material mechanical testing.

Keywords: [Trenchless Technology], [Cured-In-Place Pipe], [CIPP], [Wastewater], [Pipelines].

RESUMEN

Las tecnologías sin zanja son un conjunto de métodos y técnicas utilizadas para la rehabilitación de infraestructura subterránea. Uno de los métodos más utilizados es la rehabilitación de tuberías con Cured-In-Place Pipe (CIPP). Desde que se utilizó dicha tecnología por primera vez en Colombia, el comportamiento mecánico de los revestimientos instalados no ha sido totalmente investigado. La revisión de las propiedades mecánicas de los revestimientos, son parte fundamental de un programa de control de calidad, que permite la comparación contra valores mínimos establecidos para el material, según las normas internacionales ASTM F1216 y ASTM F2019. En ese sentido, este artículo presenta un análisis de las propiedades mecánicas obtenidas por medio de ensayos de resistencia a flexión y a tracción tomados en laboratorio para materiales de revestimiento recolectados de tres proyectos de rehabilitación de la red de alcantarillado de la ciudad de Bogotá. Los promedios de los resultados demuestran que el 67% de las muestras ensayadas cumplen con los requisitos mecánicos a flexión propuestos en la normatividad vigente. En base a comparaciones con investigaciones similares y tendencias internacionales, esta investigación permite sugerir que el proceso constructivo y las actividades de instalación del revestimiento pueden jugar un papel importante en los resultados de los ensayos mecánicos del material.

Palabras clave: [Tecnología Sin Zanja], [Tubería Curada En Sitio], [CIPP], [Alcantarillado], [Tuberías].

1 Introducción

La continua construcción y rehabilitación de la infraestructura subterránea es una necesidad que se presenta día a día en el ámbito internacional y la cual está ligada al deterioro continuo de dicha

infraestructura [1]. El gran impacto social, ambiental y económico que revista la rehabilitación de alcantarillados permite que las alternativas tecnológicas actuales produzcan efectos altamente positivos para la comunidad; y es allí donde las Tecnologías Sin Zanja (TZS) han ganado un espacio dentro del abanico de alternativas a las construcciones a cielo abierto [2].

Las tecnologías sin zanja, (en inglés como Trenchless Technologies, o No-Dig) son todos los métodos, técnicas, materiales y equipos que permiten la intervención de estructuras subterráneas con mínima o incluso nula excavación [3]. Dichas tecnologías son alternativas para la construcción, rehabilitación, o reemplazo de la infraestructura subterránea [4]. Uno de los métodos más utilizados y de mayor demanda en las TSZ es la rehabilitación de tuberías por Cured-in-Place-Pipe (CIPP), el cual se ha convertido en el método de rehabilitación de tuberías más aceptado mundialmente [5], debido a que puede aumentar la vida útil de una tubería evitando los costos y demás factores asociados con la excavación a zanja abierta [6]. En el 2021, el primer CIPP instalado en el mundo, cumple cincuenta años de vida útil; lo cual permite indicar que los revestimientos en CIPP pueden alcanzar la vida útil esperada de diseño de 50 años [7]. Algunos estudios recientes proporcionan información valiosa al realizar pruebas a muestras de CIPP que van desde los cinco a los 34 años de servicio, donde se evalúan las principales propiedades para estos materiales, como: flexión, tracción, espesores, porosidad, etc. Entre los principales ensayos que se deben realizar a las muestras del CIPP se encuentra la determinación del módulo de elasticidad a flexión, resistencia a flexión y resistencia a tracción (tuberías a presión), pues estas propiedades indican la integridad estructural y la rigidez del revestimiento, siendo parámetros clave para el diseño del CIPP [8].

El CIPP es un material compuesto, que comprende un material textil tubular (manga) y resinas plásticas termoestables, las cuales se impregnan en la manga y se polimerizan (curado) para revestir el interior de la tubería afectada. El proceso de instalación del CIPP puede incluir diferentes métodos de curado de la resina. El producto resultante es un nuevo tubo de material compuesto con polímeros termoestables que permite un reforzamiento estructural para la tubería existente [9] [10]. La calidad de estos materiales, los procedimientos de aplicación de resinas y su curado, son los parámetros que condicionan la vida útil esperada del revestimiento [11]. Los materiales CIPP se fabrican en todo el mundo para diferentes combinaciones de manga y resinas. Las fallas en este tipo de materiales o su mala instalación pueden representar en malos desempeños del revestimiento inmediatamente después de su instalación y también durante la vida útil a largo plazo [5].

A partir del desarrollo de rehabilitación de alcantarillados con el método de CIPP en la ciudad de Bogotá y por falta de rigor para hacer cumplir los requisitos normativos internacionales del CIPP, las instalaciones con dicho revestimiento que se han hecho en Bogotá no cuentan con un control de calidad que compare los parámetros específicos de diseño establecidos mediante el cálculo estructural del CIPP contra los materiales y dimensiones realmente instaladas [12]. Actualmente la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP) ha actualizado las normas para el desarrollo de estos trabajos, igualando los requisitos con los exigidos en los Estados Unidos de América [13]. Las normas técnicas de la EAAB-ESP, NS-150 “Criterios de Diseño para la Rehabilitación de Redes de Alcantarillado con Tubería Curada en Sitio (CIPP)” y NS-152 “Requerimientos de Construcción para la Rehabilitación de Redes de Alcantarillado con Tubería Curada en Sitio (CIPP)” son las normas que establecen los parámetros y criterios que deben tenerse en cuenta para el diseño y construcción de revestimientos en CIPP para tramos completos de tubería en la ciudad de Bogotá [14] [15]. Los procesos de instalación, reconexión y pruebas para recibo de obra de estas normas, se rigen en la normatividad internacional de la American Standards for Testing and Materials (ASTM)

Esta investigación se enfocó en evaluar el desempeño del CIPP en razón a sus propiedades mecánicas para las redes de alcantarillado de la ciudad de Bogotá puesto que no hay información que pueda evidenciar si las muestras recolectadas de algunos de los revestimientos de alcantarillado instalados por la tecnología sin zanja CIPP en la ciudad de Bogotá, cumplen con las propiedades mecánicas mínimas

reguladas por la normatividad ASTM. Conocer las propiedades a flexión del material exhibe cuál es la capacidad estructural de las muestras revestidas con CIPP, que, junto al espesor de la manga, son los principales requisitos de resistencia ante el pandeo del revestimiento [8].

Para la EAAB-ESP, como uno de los principales interesados en esta investigación, le es importante conocer si los materiales y procedimientos de instalación se están realizando de manera efectiva en la ciudad de Bogotá, puesto que los beneficios de cada técnica pueden variar según la exposición en la que se encuentren. Los efectos que puedan producir el proceso de curado, manipulación de los materiales (resinas y manga) y mejoras en cuanto a la relación espesor-resistencia, son factores que se deben tener en cuenta en cada instalación de CIPP [16] [17] [18] [19].

2 Materiales y método experimental

Las muestras utilizadas en esta investigación fueron suministradas por la EAAB-ESP y se obtuvieron de tres proyectos de rehabilitación de alcantarillado en varias de las zonas de servicio de alcantarillado de la EAAB-ESP en la ciudad de Bogotá (Proyecto M, Proyecto S, Proyecto C) con edades que no superaban los dos meses de instalación al momento de realizar los ensayos. Para todas las instalaciones se espera que el producto obtenido tenga como mínimo las propiedades estructurales iniciales propuestas en las normas ASTM F1216-16 y ASTM F2019-20. Para esta investigación, las muestras de CIPP hacen referencia a especímenes de material extraídos de tramos de tubería donde ha sido instalado el CIPP. Por cada tramo de tubería rehabilitada con CIPP se obtuvo una muestra de dicho material. Se utilizaron muestras de diferentes combinaciones de CIPP de los proyectos incluidos en esta investigación expuestos en la Tabla 1.

Tabla 1. Combinaciones de revestimientos en CIPP de esta investigación

Proyecto	Combinación de CIPP	Componentes		
		Manga	Resina	Curado
Proyecto M	Tipo 1	Poliéster	Epóxica	Vapor de agua
Proyecto S	Tipo 2	Fibra de vidrio	Poliéster	Luz UV
Proyecto C				

Fuente: Autor

La norma técnica ASTM F1216-16 establece las prácticas de inspección de un revestimiento en CIPP, indicando la forma de toma de las muestras dependiendo el diámetro de la tubería. Para tuberías de 450 mm (18 pulgadas) o menos, la muestra CIPP se debe tomar en un pozo intermedio del tramo instalado o al final del mismo. Para la toma de la muestra se hace un molde al final del tubo existente donde se realiza el revestimiento, en dicho molde se hace pasar el CIPP y posterior al proceso de curado se corta y extrae [20]. Las muestras que se obtienen deben proporcionar por lo menos tres especímenes de CIPP para pruebas a flexión y tracción; sin embargo, lo recomendado es cinco especímenes por cada muestra de revestimiento obtenido [20].

El espesor del CIPP es un requisito de resistencia al pandeo externo y una variable de diseño para la estimación de la vida útil [8]. El espesor es un parámetro de aceptación o rechazo del material suministrado. En relación con las pruebas dimensionales para determinar si una muestra puede ser probada en laboratorio, una vez recolectadas las muestras de campo, se realizaron como mínimo ocho mediciones a intervalos equidistantes alrededor de la circunferencia de la tubería, donde el espesor

mínimo en cualquier punto no debía ser inferior al 87,5% del espesor de diseño [20]. Las muestras recolectadas de los tres proyectos superaron los espesores de diseño, obteniendo espesores entre 5,36 y 6,56 mm para muestras Tipo 1, y espesores entre 4,25 y 5,24 mm para las Tipo 2. Existen otros factores que también fueron tenidos en cuenta en esta investigación para establecer razones de rechazo o aceptación; algunos de ellos fueron el tamaño total de la muestra y el estado de la misma. A modo general hubo muestras que no se pudieron fallar debido a disparidades de la superficie, impidiendo proporcionar los especímenes necesarios para cada prueba. Finalmente, se hizo una selección de un total de 27 muestras de estudio, 10 muestras Tipo 1 del Proyecto M, 10 muestras Tipo 2 del Proyecto S y siete muestras de Tipo 2 del Proyecto C. De cada muestra se proporcionaron entre tres y cinco especímenes de CIPP para pruebas a flexión y tracción.

2.1 Prueba A flexión

Los ensayos de las propiedades a flexión de los revestimientos en CIPP se hicieron de acuerdo a las normas ASTM D790-17 y la ASTM F2019-20. La resistencia máxima a la flexión y el módulo de elasticidad a flexión son parámetros importantes para evaluar el estado estructural de los revestimientos [9].

Para los ensayos a flexión del CIPP Tipo 1, se fabricaron especímenes con cortes rectangulares de acuerdo a las dimensiones establecidas por la ASTM D790-17. Los cortes fueron realizados en dirección longitudinal a la tubería. Los cortes de los especímenes de CIPP Tipo 2, se realizaron como lo indica la ASTM F2019-20. Dichos especímenes fueron cortados en dirección radial de la tubería, formando una sección curva uniforme [21].

Las pruebas a flexión tanto para el CIPP Tipo 1 y Tipo 2, se hicieron utilizando un sistema de carga a tres puntos donde un espécimen del material se somete a una carga aplicada en el centro de la luz, la cual descansa sobre dos apoyos. El montaje se puede ver en la Figura 1. La probeta se controló hasta que se produjo la falla por ruptura en el material o hasta llegar a una tensión máxima del 5,0% [22]. Una vez finalizado el ensayo, se calculó la resistencia máxima a flexión y el módulo de elasticidad a flexión haciendo uso de la Ecuación (1) y la Ecuación (2) [22] [21].

$$\sigma = 3PL/2bd^2 \quad (1)$$

Donde: σ = Esfuerzo a flexión (MPa), P = carga en un punto dado de la curva carga-deflexión (N), L = distancia entre apoyos (mm), b = ancho del espécimen (mm), y d = espesor del espécimen (mm).

$$E_B = L^3m/4bd^3 \quad (2)$$

Donde: E_B = módulo de elasticidad a flexión (MPa), L = distancia entre apoyos (mm), b = ancho del espécimen (mm), d = espesor del espécimen (mm), y m = pendiente de la tangente a la parte inicial en línea recta dela curva carga-deflexión (N/mm).

Se utilizó una máquina universal capaz de operar a velocidades constantes de movimiento, velocidades que fueron calculadas dependiendo del espesor de la muestra. La máquina cuenta con dos apoyos fijos de forma cilíndrica para sostener el espécimen y un apoyo generador de carga. En total, para el material Tipo 1 se hicieron 49 pruebas a flexión correspondientes a 10 muestras de revestimientos de CIPP del Proyecto M y 84 pruebas a flexión de especímenes de CIPP Tipo 2 correspondientes a 10 muestras del Proyecto S y a siete muestras del Proyecto C.

Figura 1. (a) Montaje de ensayo a flexión CIPP Tipo 1 (b) Montaje de ensayo a flexión CIPP Tipo 2

(a)



(b)



Fuente: Autor

2.2 Prueba a tracción

Los ensayos a tracción del Proyecto M se realizaron de acuerdo a la norma técnica D638-14. La capacidad de resistir un esfuerzo a tracción es una propiedad importante del material de CIPP, donde la fuerza por unidad de área necesaria para romper el material es la máxima resistencia a la tracción [9].

El ensayo a tracción del CIPP se realizó a las muestras de manga en poliéster del Proyecto M, adoptando las dimensiones de los especímenes en forma de hueso como lo indica la ASTM [23]. Los cortes se hicieron de manera longitudinal a la tubería y se tomaron entre cinco y tres especímenes de cada muestra de revestimiento.

Para este ensayo se utilizó una máquina universal la cual tiene un miembro fijo y uno móvil, cada uno con empuñaduras para agarrar y tensionar el espécimen con un mecanismo de acción que proporcionó una velocidad uniforme de 5 mm/min hasta el momento en el que se produjo la falla del material. Una vez terminado el ensayo, se calculó la resistencia a la tracción dividiendo la carga máxima en Newtons generada por el espécimen, entre el promedio del área original de la sección transversal en metros cuadrados. Se ejecutaron en total 41 ensayos a tracción, pertenecientes a las 10 muestras del material Tipo 1.

En cuanto a la propiedad de tracción de la manga de CIPP Tipo 2, no se realizó ninguna prueba para su determinación, puesto que la norma que rige los estándares de la rehabilitación de tuberías con este tipo de material, la ASTM F2019-20, no propone ningún procedimiento para este fin. Adicionalmente, no se menciona en la norma ningún valor mínimo estructural referente a las propiedades de tracción.

3 Resultados

La recopilación de los resultados de esta investigación sobre las propiedades mecánicas de las pruebas a flexión y a tracción de revestimientos en CIPP utilizados para la rehabilitación de tuberías de alcantarillado se encuentran resumidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen datos de ensayo

Muestra	Material de CIPP	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Valores experimentales promedio		
				Esfuerzo a Flexión (MPa)	Módulo de Elasticidad a Flexión (MPa)	Esfuerzo a Tracción (MPa)
M1	Tipo 1	200	5,36	44,3	1 674,7	17,2
M2		200	5,91	42,2	1 540,2	19,7
M3		200	5,80	24,9	775,3	15,8
M4		200	5,95	36,3	1 254,7	16,5
M5		200	5,69	41,0	1 408,5	19,1
M6		200	6,08	44,3	1 830,3	17,6
M7		200	5,53	35,7	1 351,4	17,6
M8		270	5,42	45,5	1 860,2	19,6
M9		270	5,53	35,1	1 306,2	22,6
M10		300	6,56	42,3	1 997,8	14,4
S1	Tipo 2	200	4,77	244,1	6 190,4	-
S2		200	4,84	255,8	9 969,4	-
S3		200	5,24	257,4	5 874,0	-
S4		200	4,41	234,8	5 755,9	-
S5		200	4,33	193,9	5 299,4	-
S6		200	4,69	239,7	6 216,3	-
S7		200	4,87	204,4	9 249,4	-
S8		200	4,64	204,8	5 163,4	-
S9		200	4,73	192,7	5 499,4	-
S10		200	5,04	211,5	5 987,4	-
C1		200	5,00	120,0	3 152,7	-
C2		200	4,34	234,2	5 502,9	-
C3		200	4,77	150,2	4 108,0	-
C4		200	4,98	212,4	6 118,0	-
C5		200	4,25	245,3	5 083,7	-
C6		200	4,84	258,5	5 500,5	-
C7		200	4,83	197,4	5 667,5	-

Fuente: Autor

3.1 Resultados de prueba a flexión

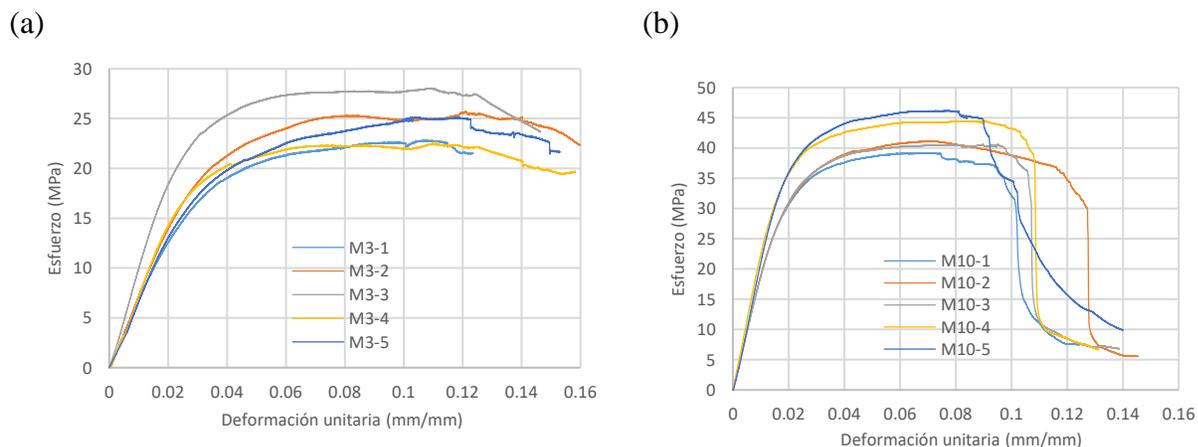
Para el material Tipo 1, el valor medio de resistencia a flexión de una de las muestras ensayadas estuvo por debajo del valor mínimo inicial requerido de 31 MPa establecido por la ASTM F1216-16, mientras que las otras nueve muestras superaran dicho valor mínimo exigido. Los valores medios en las muestras tienen un rango de 24,9 MPa a 45,5 MPa con un promedio aritmético de las 10 muestras de 39,2 MPa, una desviación estándar de 6,3 MPa y un porcentaje de resistencia promedio de 126,3% con respecto a la

resistencia mínima requerida. La Figura 2 representa las muestras M3 y M10, exhibiendo el comportamiento de los cinco especímenes ensayados por cada muestra de CIPP. Se evidencia una gran diferencia de esfuerzos entre las dos muestras, la muestra M10 posee casi el doble de resistencia a flexión que la muestra M3, notando que esta última no cumplió la resistencia mínima y tampoco llegó a la rotura. En cuanto a la propiedad del módulo de elasticidad a flexión del CIPP Tipo 1, tan solo tres muestras superaron el valor mínimo inicial de 1724 MPa. Los valores medios de las muestras van desde los 775,3 MPa a 1997,8 MPa, con un promedio de las 10 muestras de 1499,9 MPa, una desviación estándar de 360,9 MPa y un porcentaje de módulo de elasticidad promedio de 87,0% con respecto al módulo de diseño requerido. Respecto al CIPP Tipo 1 se consiguió un total de cumplimiento del 30% de los revestimientos de alcantarillado ensayados a flexión, El resumen de los resultados de las propiedades mecánicas a flexión del Proyecto M se presenta en la Figura 3.

Con respecto a los revestimientos Tipo 2 de los Proyectos S y C, todas las muestras cumplieron con el valor mínimo de esfuerzo a flexión de 103 MPa estipulado por la norma ASTM F2019-20. Los valores medios de las muestras S van desde los 192,7 MPa a 257,4 MPa con un promedio de las 10 muestras de 223,9 MPa, una desviación estándar de 25,1 MPa y con un porcentaje de resistencia promedio de 217,4% con respecto a la resistencia mínima requerida. Los valores medios de las muestras C van desde los 120,0 MPa a 258,4 MPa con un promedio de las siete muestras de 202,6 MPa, una desviación estándar de 51,1 MPa y un porcentaje de resistencia promedio de 196,7% con respecto a la resistencia mínima. La Figura 4 representa las muestras S3 y C3, exhibiendo el comportamiento de los cinco especímenes ensayados por cada muestra de CIPP, mostrando que ambas muestras cumplen con las resistencias mínimas, pero existen valores de resistencias más altos en la muestra S3 que en la C3.

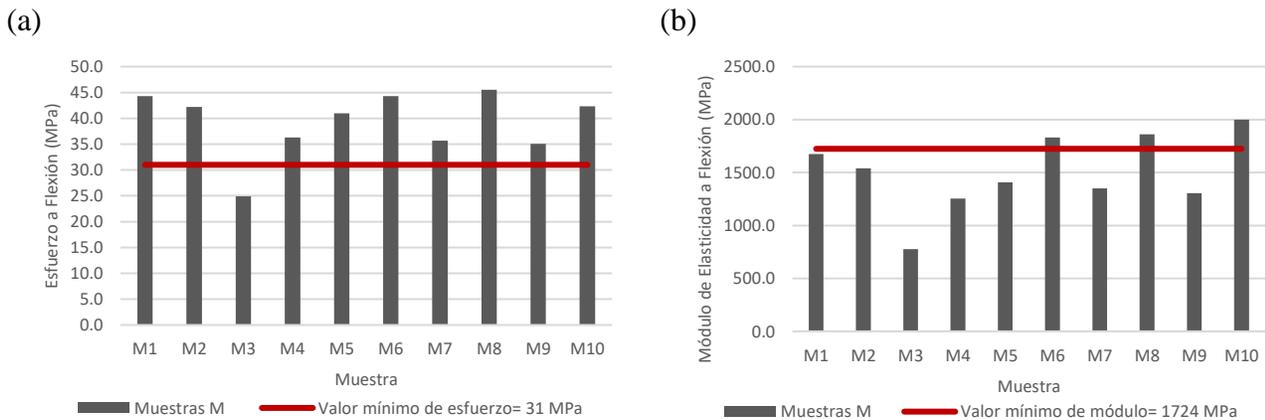
De los valores del módulo de elasticidad a flexión del CIPP Tipo 2, la media logró superar el valor mínimo inicial requerido de 5000 MPa en ambos proyectos, con excepción a las muestras C1 y C3 del Proyecto C. Dichos módulos estuvieron por debajo de lo estipulado. Los valores medios del módulo de elasticidad a flexión de las muestras S van desde los 5163,4 MPa a 9969,4 MPa con un promedio de las 10 muestras de 6520,5 MPa y una desviación estándar de 1673,5 MPa. Los valores medios de las muestras C van desde los 3152,7 MPa a 6118,0 MPa con un promedio de las siete muestras de 5019,1 MPa y una desviación estándar de 1033,7 MPa. De los revestimientos CIPP de alcantarillado ensayados con material Tipo 2 se consiguió un total de cumplimiento del 100% del Proyecto S y del 71,4% del Proyecto C. El resumen de los resultados de las propiedades mecánicas a flexión de los Proyectos S y C se presenta en a Figura 5.

Figura 2. Graficas Esfuerzo vs Deformación unitaria: (a)Especímenes de la Muestra M3 (b)Especímenes de la Muestra M10



Fuente: Autor

Figura 3. Resultados del Proyecto M (CIPP Tipo 1): (a)Esfuerzos a flexión (b)Módulos de elasticidad a flexión



Fuente: Autor

3.2 Resultados de prueba a tracción

Los ensayos a tracción se hicieron a las 10 muestras extraídas de revestimientos de alcantarillado del Proyecto M de CIPP en material de manga en poliéster. El valor medio de resistencia a tracción de nueve muestras ensayadas se encuentra por debajo del valor mínimo inicial de 21 MPa establecido por la ASTM F1216-16, tan solo una muestra superó el valor mínimo exigido. Los valores medios de las muestras van desde los 14,4 MPa a 22,6 MPa con un promedio aritmético de las 10 muestras de 18 MPa. La muestra M9 fue única muestra con valores de resistencias mayores a los 21 MPa.

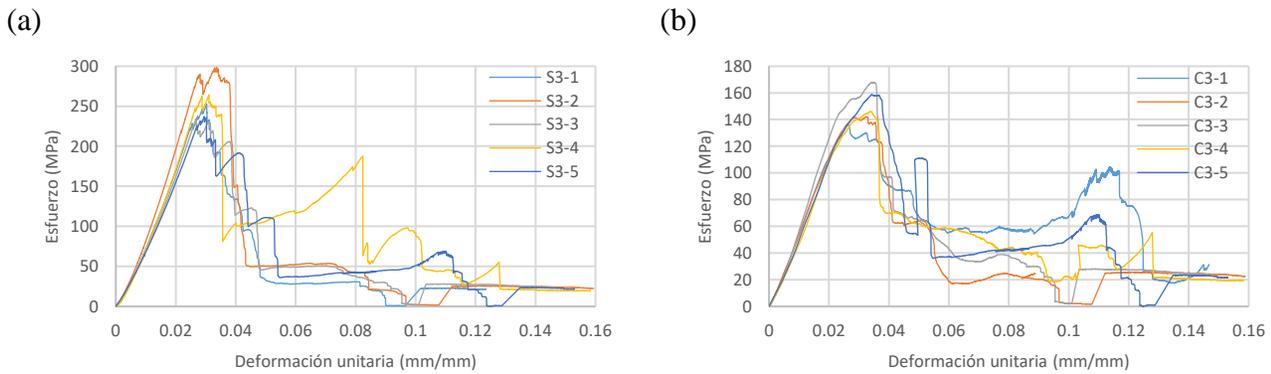
4 Discusión

El material de los revestimientos de CIPP Tipo 1 mostraron los valores de propiedades a flexión más bajos en este estudio, con módulos de elasticidad a flexión por debajo de la mitad de los mínimos requeridos por la ASTM F1216-16, esto indica un posible bajo desempeño de algunos de los revestimientos instalados al ser sometidos a cargas a flexión. Además, incumplen con los valores mínimos iniciales que debería tener el material. Aunque el promedio de los valores de esfuerzo a flexión fue positivo frente a los valores recomendados (90% de cumplimiento), el promedio de los valores de módulo de elasticidad a flexión del Proyecto M estuvo por debajo de los mínimos estipulados (30% de cumplimiento), razón por la cual se puede proponer que los revestimientos posiblemente tendrían una menor vida útil, como también lo proponen otras investigaciones [8]. Se podría corroborar lo anterior haciendo ensayos a flexión a largo plazo, tal como se realizó en la investigación de Wong (2016) de acuerdo con la norma ASTM D2990. En dicha investigación se realizaron pruebas a largo plazo de 10.000 horas o un poco más de 13 meses para estimar las propiedades del material a los 50 años [5].

El Proyecto S que utilizó el CIPP Tipo 2 muestra unos valores de resistencia a flexión más altos que los mínimos requeridos por la ASTM F2019-20, y los módulos de elasticidad a flexión superaron el valor mínimo exigido por dicha norma. Debido al cumplimiento de los valores mínimos, para este proyecto se esperaría que los revestimientos caracterizados cumplan con los 50 años de vida útil de diseño. En

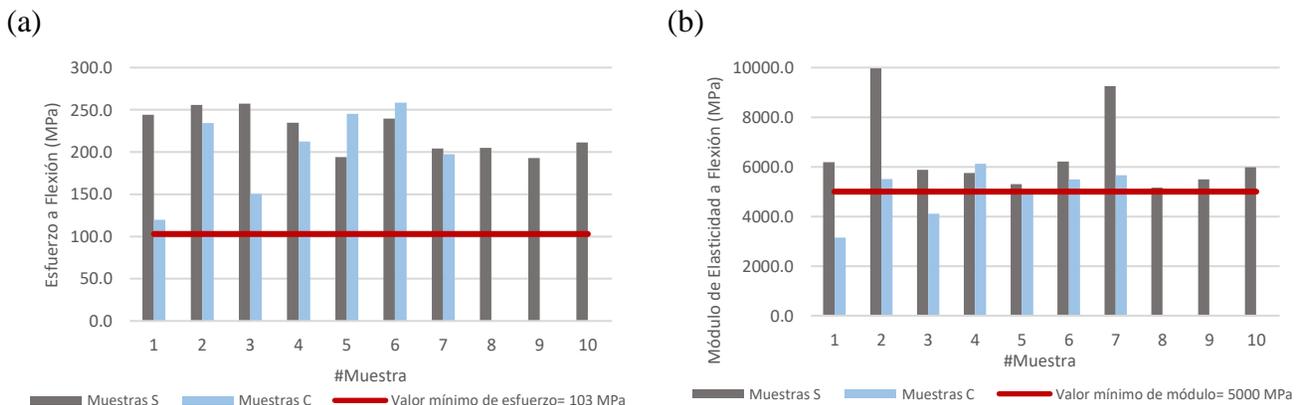
estudios anteriores [16], se obtuvieron valores de resistencia a la flexión máxima promedio de 200 MPa para 37 muestras ensayadas, valores que fueron bastantes similares a los del presente estudio. En cuanto al Proyecto C, que también utilizó CIPP Tipo 2, los resultados no fueron tan favorables como las muestras S. A pesar de que los valores de resistencia a flexión cumplen con los mínimos exigidos por la norma, dos de las siete muestras no alcanzaron el módulo de elasticidad a flexión de 5000 MPa.

Figura 4. Graficas Esfuerzo vs Deformación unitaria: (a)Especímenes de la Muestra S3 (b)Especímenes de la Muestra C3



Fuente: Autor

Figura 5. Resultados de los Proyectos S y C (CIPP Tipo 2): (a)Esfuerzos a flexión (b)Módulos de elasticidad a flexión



Fuente: Autor

Se determinan en base a investigaciones previas, unas posibles razones que contribuyen a los resultados de las propiedades estructurales y que pudieron causar valores de resistencia a flexión menores a los requeridos. Algunas de estas razones son: la calidad de las muestras recolectadas, la calidad del material de la manga, impregnación y mezclado de resinas, y los factores de temperatura y presión durante el curado de la manga. Una teoría probada por David J. Herzog indica que, a menores temperaturas de curado en campo, menores son los desempeños mecánicos generados [19]. Además, un curado no uniforme con variaciones de temperatura puede reducir la vida útil del revestimiento instalado debido a menor resistencia mecánica [18]. Un reporte de la Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos de América (EPA), identificó que algunas veces el curado a vapor no proporciona el calor suficiente para permitir un curado completo [17]. Por otro lado, se ha demostrado que, a medida que se bajan las presiones de instalación con vapor o aire durante el curado, se crea un material más grueso, pero también más débil (menos denso) [1], y si la presión de curado es insuficiente, puede causar vacíos

internos en el material que debilitan las propiedades mecánicas del mismo [18]. Con los antecedentes nombrados, se resalta la importancia de mantener un buen control durante el procedimiento de instalación y curado para evitar bajos rendimientos del material.

La resina es otro de los componentes importantes del CIPP, ya que contribuye directamente a las propiedades mecánicas del material [17]. Cuando se hace una instalación de CIPP Tipo 1, generalmente la resina se mezcla e impregna en obra [24]; por lo tanto se puede deducir, que si este procedimiento no se hace correctamente, se pueden causar bajos desempeños del material como los presentados en esta investigación. En las mangas de fibra de vidrio la resina se impregna desde en planta y la vida útil de la manga impregnada sin instalar es de aproximadamente seis meses [17]. Adicionalmente, la norma ASTM F2019-20 recomienda mantener la temperatura del material entre los 7°C y 35°C desde su fabricación hasta la instalación dentro de la tubería existente. Si estos requisitos no se tienen en cuenta, se pueden generar deterioros previos en el material que repercuten en el desempeño mecánico, como los observados en esta investigación.

Haciendo una comparación con investigaciones anteriores (Allouche, 2012), los revestimientos de CIPP con manga en poliéster en dichas investigaciones obtuvieron valores de resistencias a flexión de 31 MPa y módulos de elasticidad de 1256 MPa. Allouche indica que la posible causa de los bajos valores de las propiedades a flexión es la manera en la que se toma muestra, ya que cuando se realiza el corte de la muestra en la parte sobrante del revestimiento en la boca del pozo de inspección, la muestra no tiene la misma instalación ni condiciones de curado como dentro del tramo de la tubería, razón por la cual espera que las muestras extraídas tengan resistencias menores que si se cortaran en el interior del tubo [25].

En cuanto a la prueba a tracción, es importante mencionar que la medida de este parámetro no está ligada directamente con las fórmulas de diseño estructural CIPP para alcantarillados por gravedad. Este valor es para el diseño de tuberías presurizadas [8]. Debido a esto, y a pesar del no cumplimiento de los valores de resistencia a tracción de los revestimientos de alcantarillado de CIPP Tipo 1, en esta investigación no se considera esta propiedad como un parámetro clave para determinar la condición estructural de los revestimientos, puesto que las muestras fueron extraídas de tuberías de alcantarillado por gravedad y no de tuberías a presión. Los ensayos para determinar la resistencia a la tracción del CIPP fueron incluidos para proporcionar la mayor cantidad de información sobre las características del material compuesto, tal como lo indica la norma ASTM F1216-16. Otras investigaciones similares mostraron resultados promedio de resistencia a tracción de 20,9 MPa [25] [9] [8], revelando resultados más altos que los valores promedio en esta investigación.

La principal ventaja del CIPP Tipo 2 es su alta resistencia a flexión [7] lo cual también se pudo evidenciar en los resultados de esta investigación. Sin embargo, no se puede concluir que lo anterior sea un parámetro generalizado y realmente ventajoso ante cualquier carga aplicada a un revestimiento. Aunque los revestimientos de las muestras Tipo 2 tienen valores de propiedades a flexión más altos en comparación con los revestimientos Tipo 1, no se puede concluir que los revestimientos Tipo 2 tienen mejor desempeño mecánico que los revestimientos Tipo 1 debido a que la información recolectada no permite realizar cálculos estadísticos que ayuden a predecir futuras instalaciones. Igualmente, esta investigación no analizó otros parámetros de caracterización del material, como la resiliencia y tenacidad del material. Sin embargo, se confirma en este estudio que las distintas combinaciones de CIPP proporcionan alteraciones considerables en los resultados de los valores mecánicos del revestimiento [26].

El Instituto de Infraestructura Subterránea de Alemania (IKT) tiene reportes de pruebas de CIPP desde el 2003, donde el mínimo de cumplimiento normativo ha sido del 85% [27]. En su reporte del 2020, se analizaron 2613 muestras de revestimientos ubicados en Bélgica, República Checa, Francia, Alemania, Gran Bretaña, Holanda y Suiza, en el que su porcentaje de cumplimiento frente a la norma fue del 94% y 97% para las resistencias y módulos a flexión [28], revelando la mejoría que han tenido sus instalaciones

a lo largo de los años. El IKT expresa que, a pesar del desarrollo tecnológico y la capacitación intensiva del personal, no ha podido alcanzar el objetivo de cumplimiento deseado, por lo que deben continuar los rigurosos controles de calidad tanto en campo como en los laboratorios, [28]. Al revisar el 67% de cumplimiento que se obtuvo en esta investigación y al no contar con ningún reporte de pruebas de CIPP en la ciudad de Bogotá, es evidente la necesidad de tener un registro de datos históricos que permita discernir la mejoría en cuanto a propiedades mecánicas del material instalado a través del tiempo.

5 Conclusiones

Los resultados obtenidos de la presente investigación demostraron que el 67% de las muestras ensayadas de revestimientos CIPP utilizados en la rehabilitación de tuberías de alcantarillado de tres proyectos de la ciudad de Bogotá, cumplen con los valores mínimos de desempeño mecánico determinados por la ASTM F1216-16 y ASTM F2019-20. La combinación del CIPP Tipo 1 obtuvo los valores de resistencias y módulos de elasticidad a flexión más bajos, y un cumplimiento del 30% de las propiedades a flexión. El resultado puede impactar en la credibilidad de la vida útil de este tipo de material instalado, puesto que se diseña estructuralmente para vida de servicio de 50 años, pero al no alcanzar los valores de desempeño mecánico a corto plazo, es posible que el material no tenga el desempeño esperado en el largo plazo.

En esta investigación el CIPP Tipo 2, cumple en su mayoría con los valores mínimos normativos y tiene mayores valores de propiedades iniciales. El proyecto S que utilizó el material Tipo 2, cumplió en su totalidad con los valores de propiedades mínimos exigidos por la ASTM F2019-20, mientras que, en el Proyecto C, que usó la misma combinación de CIPP, el 71,4% de las muestras ensayadas cumplió con las propiedades a flexión. Se espera que la mayoría de los revestimientos del CIPP Tipo 2 del proyecto en estudio cumplan con los años de vida útil de diseño.

Con los datos obtenidos del presente estudio, se hizo un análisis comparativo de resultados similares de investigaciones previas y se llegó a la conclusión de que el proceso constructivo juega un papel importante en relación a las propiedades estructurales del producto final del CIPP y no solo depende la calidad del material. Puesto que el procedimiento en obra del CIPP es similar a nivel mundial, se recomienda la necesidad de hacer control estricto durante las siguientes actividades en la instalación: transporte y almacenamiento de la manga, temperaturas y presiones durante el curado y el mezclado e impregnación de la resina debe ser monitoreado. La muestra para ensayo debe igualar las condiciones de instalación y curado que el CIPP interior de la tubería.

Para la EAAB-ESP fueron satisfactorios los resultados obtenidos de esta investigación, pues permiten encaminar e incentivar no solo a la empresa, sino a otras entidades públicas, entes de control, contratistas de obra, interventores y proveedores de la tecnología, a realizar un mayor control de los materiales instalados de manera que se pueda identificar y/o corregir los materiales con bajo desempeño.

Tanto en la ciudad de Bogotá como en el resto del país, es imperativa la necesidad de aumentar el control y la cantidad de muestras ensayadas en las instalaciones de la metodología CIPP, de manera que se puedan establecer registros de mejoría del cumplimiento de los requisitos normativos, tal como lo realiza el IKT para Alemania y Europa.

El material compuesto de la manga CIPP es el encargado de cumplir con el reforzamiento interno de la tubería afectada, pero se considera que es importante tener mayor certeza sobre la calidad de los materiales antes del proceso de instalación, por lo que puede ser conveniente para futuras investigaciones realizar ensayos a las materias primas del CIPP con el fin de comparar los resultados con las fichas

técnicas de fábrica y corroborar las propiedades mecánicas de los materiales que componen el CIPP según indique el proveedor.

Un análisis completo de los materiales de CIPP es una labor de vital importancia que se debe exigir para continuar garantizando la aceptación de las tecnologías sin zanja. Se considera importante incrementar las investigaciones en estos aspectos para evaluar el rendimiento desempeño y degradación del material CIPP tanto en revestimientos actuales como en aquellos con mayor número de años de servicio de manera que se pueda evaluar la vida útil de 50 años realizando pruebas a corto y largo plazo. Los estudios del proceso de instalación serán de gran aporte para identificar aquellas falencias que puedan ocasionar los bajos resultados de propiedades mecánicas en laboratorio.

6 Referencias

- [1] S. Das, *Evaluation of Cured-in-Place Pipe Lining Installations*. [Art]. University of Alberta, 2016.
- [2] J. C. Matthews y J. C. Gutierrez Monsalve, «Trenchless Infrastructure Construction Techniques Used in Colombia,» *Practice Periodical on Structural Design & Construction*, vol. 17, pp. 116-170, 2012.
- [3] D. R. Calderón, «Introducción a las Tecnologías sin zanja para la inspección, rehabilitación, reposición y construcción de redes de acueducto y alcantarillado,» de *Encuentros Magistrales de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – E.S.P.*, Bogotá D.C, 2020b.
- [4] S. Kramer, W. McDonald y J. Thomson, *An Introduction to Trenchless Technology*, Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [5] W. Wong, «Long-term performance of CIPP,» de *No-dig Beijing 2016*, Beijing , 2016.
- [6] M. J. Brown, I. D. Moore y Fam Amir, «Analysis of a cured-in-place pressure pipe liner spanning circular voids,» *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 101, n° 103424, pp. 1-10, 2020.
- [7] H. Wook , S. S. Yoo, J. Kim y D. D. Koo, «The Mechanical Properties of High Strength Reinforced Cured-in-Place Pipe (CIPP) Liner Composites for UrbanWater Infrastructure Rehabilitation,» *Water*, vol. 10, n° 983, pp. 1-12, 2018.
- [8] S. Alam, J. Matthews, R. Sterling, E. Allouche, A. Selvakumar, W. Condit, E. Kampbell y D. Downey, «Evaluation of testing methods for tracking CIPP liners' life-cycle performance,» *Cogent Engineering*, vol. 5, n° 1, pp. 1-13, 2018.
- [9] H. Alzraiee, I. Bakry y T. Zayed, «Destructive Analysis-Based Testing for Cured-in-Place Pipe,» *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 29, n° 4, pp. 040140951-040140959, 2015.
- [10] J. Hodul, J. Majerová, R. Drochytka, R. Dvořák, L. Topolář y L. Pazdera, «Effect ok Chemical Aggressive Media on the Flexural Properties of Cured-In-Place Pipes Supported by Microstructure Observation and Acoustic Emission,» *Materials*, vol. 13, n° 3051, pp. 2-17, 2020.
- [11] J. Moral y J. A. Durán, «Sistemas de rehabilitación de tubería sin zanja. La experiencia de EMACSA en su utilización,» de *IV Jornadas de Ingeniería del Agua, la precipitación y los procesos erosivos Córdoba, 21 y 22 de Octubre 2015*, Córdoba-España, 2015.
- [12] D. R. Calderon, «Entrevista con el Ingeniero Diego Raul Calderon,» 2020a.
- [13] D. Maldonado Villalobos y K. P. Montañez Medina, *Estudio de los sistemas de construcción sin zanja Auger Boring y Excavación Horizontal Dirigida, y de Rehabilitación CIPP*. [Art]. Escuela Colombiana de Ingenieria Julio Garavito, Bogota D.C, Colombia, 2019.
- [14] EAAB, «NS-150 "Criterios de Diseño para la Rehabilitación de Redes de Alcantarillado con Tubería Curada en Sitio (CIPP)",» Bogotá, 2020a.

- [15] EAAB, «NS-152 "Requerimientos de construcción para la rehabilitación de redes de alcantarillado con tubería curada en sitio (CIPP)",» Bogotá, 2020b.
- [16] J. Matthews, «Sewer rehabilitation using an ultraviolet-cured GFR cured-in-place pipe,» *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 20, n° 1, pp. 04014021-2-04014021-7, 2015.
- [17] EPA, «A Retrospective Evaluation of Cured-in-Place Pipe (CIPP) Used in Municipal Gravity Sewers,» U.S. Environmental Protection Agency, 2011.
- [18] M. Nuruddin, G. P. Mendis, K. Ra, S. Mahboobeh, T. Sendesi, T. Futch , J. Goodsell, A. J. Whelton, J. P. Youngblood y J. A. Howarter, «Evaluation of the physical, chemical,,» *Journal of Composite Materials*, vol. 53, n° 19, pp. 2687-2699, 2019.
- [19] D. J. Herzog, A. J. Bennett, K. Rahaim y J. D. Schiro, «A Comparison of Cured-In-Place-Pipe (CIPP) Mechanical Properties-Laboratory vs. Field,» de *COMPOSITES & POLYCON 2007 American Composites Manufacturers Association*, Tampa, FL USA, 2007.
- [20] ASTM, «F1216 "Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Inversion and Curing of a Resin-Impregnated Tube",» 2016.
- [21] ASTM, «F2019 "Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Pulled in Place Installation of Glass Reinforced Plastic (GRP) Cured-in-Place Thermosetting Resin Pipe (CIPP)",» 2020.
- [22] ASTM, «D790 "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials",» 2017.
- [23] ASTM, «D638 "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics",» 2014.
- [24] J. A. Pinzón, *Evaluación y perspectivas de la utilización de tecnologías sin zanja en redes de alcantarillado de Bogotá*. [Art]. Pontificia Universidad Javeriana, 2011.
- [25] E. Allouche, S. Alam, J. Simicevic, R. Sterling, W. Condit, J. Matthews y A. Selvakumar, «A pilot study for retrospective evaluation of cured-in-place pipe (CIPP) rehabilitation of municipal gravity sewers,» *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 39, pp. 82-93, 2014.
- [26] H. Wook, D. Daehyun y J.-H. Kang, «Short- and Long-Term Structural Characterization of Cured-in-Place Pipe Liner with Reinforced Glass Fiber Material,» *Environmental Research and Public Health*, vol. 17, n° 2073, pp. 1-15, 2020.
- [27] IKT, «Ten years of the IKT LinerReport,» Institute for Underground Infrastructure, 2014.
- [28] IKT, «CIPP liners meeting target values at six-year low,» Institute for Underground Infrastructure, 2020.