



**Diseño de un proceso de fabricación de un prototipo para la homologación  
del limitador de hundimiento para el Tranvía del Metro de Medellín**

**Laura Llicela Gómez Restrepo  
Autora**

**Informe final de Práctica Académica en la modalidad Semestre de Industria  
para optar al título de Ingeniera de Materiales**

**Asesor interno  
Diego Hernán Giraldo Vásquez, Dr. en Ingeniería**

**Asesor externo  
Iván Darío Álvarez, Profesional 2 del Metro de Medellín**

**Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería de Materiales  
Medellín  
2021**

---

**Cita**

Laura Llicela Gómez Restrepo [1]

---

**Referencia**

Estilo IEEE (2020)

- [1] L. L. Gómez Restrepo, «Diseño de un proceso de fabricación de un prototipo para la homologación del limitador de hundimiento para el Tranvía del Metro de Medellín.» Trabajo de grado profesional, Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2021.
- 



Coordinador de prácticas Universidad de Antioquia: Diego Hernán Giraldo Vásquez

Coordinador de prácticas Metro de Medellín: Iván Darío Álvarez



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes

**Decano:** Jesús Francisco Vargas Bonilla

**Jefe departamento:** Francisco Javier Herrera Builes

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi madre por su ayuda constante, por confiar en que el estudio es el camino para un mejor proyecto de vida, por su dedicación, confianza y esfuerzo. A mi novio por su apoyo incondicional, por soportar mis momentos de frustración y celebrar mis logros. A mi familia por creer mí y en mis capacidades

Gracias a la Universidad de Antioquia por haberme permitido ser parte de ella. Mi más profunda gratitud a mi asesor y profesor Diego Hernán Giraldo, quien confió en mí desde el primer momento, estuvo pendiente del desarrollo de mi semestre de industria y me guio por el camino correcto para obtener este gran logro.

A mis compañeros de carrera, gracias por el apoyo, por todos los momentos que pasamos estudiando, por compartir parte de su tiempo y su conocimiento conmigo.

A Iván Álvarez y Laura Múnera, les expreso mi agradecimiento por ser parte del comienzo de mi vida profesional, por el apoyo durante el semestre de industria y por la gran acogida a su grupo de trabajo. Al Metro de Medellín por permitirme demostrar las capacidades adquiridas de la mano de mis profesores durante estos años.

**“La U se lleva en el Alma”**

## Tabla de contenido

	Pág.
<b>1</b>	<b>Introducción..... 6</b>
<b>2</b>	<b>Planteamiento del problema ..... 9</b>
<b>3</b>	<b>Objetivos ..... 11</b>
3.1	Objetivo general..... 11
3.2	Objetivos específicos ..... 11
<b>4</b>	<b>Marco Teórico..... 11</b>
4.1	Proceso de fabricación del prototipo ..... 11
4.1.1	Proceso de homologación..... 11
4.1.2	Prototipo y prototipado ..... 12
4.1.3	Materiales poliméricos ..... 13
4.1.3.1	Clasificación de los materiales poliméricos..... 13
4.1.4	Materiales compuestos..... 14
4.1.4.1	Compuestos reforzados con fibras..... 14
4.1.4.2	Compuesto de matriz polimérica reforzados con fibras cerámicas 14
4.1.5	Moldeo de polímeros por colada (vaciado) ..... 15
4.1.6	Técnicas de caracterización..... 16
4.1.6.1	Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) ..... 16
4.1.6.2	Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) ..... 16
4.1.6.3	Termogravimetría (TGA) ..... 17
4.1.6.4	Dureza Shore A y D..... 17
4.1.6.5	Densidad ..... 18
4.2	El rol de la investigación, el desarrollo y la innovación en el Metro de Medellín ..... 19
4.2.1	Plan director..... 19
4.2.2	Tipos de búsquedas para la actualización del plan de empresa . 19
4.2.3	Innovación ..... 21
<b>5</b>	<b>Metodología ..... 22</b>
5.1	Revisión bibliográfica ..... 22
5.2	Reconocimiento del sistema Tranvía ..... 22
5.3	Análisis de caracterización de la materia prima ..... 23
5.3.1	Espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) ..... 23
5.3.2	Calorimetría diferencial de barrido (DSC) ..... 23
5.3.3	Termogravimetría (TGA)..... 23
5.3.4	Dureza Shore D: ..... 24
5.3.5	Densidad: ..... 24
5.4	Mapeo de la materia prima y elaboración de ficha técnica ..... 24
5.5	Vigilancia tecnológica..... 24

5.6	Padrinazgo .....	24
5.7	Revisión de informes .....	25
5.8	Recorrido en paneles solares .....	25
<b>6</b>	<b>Resultados y análisis .....</b>	<b>25</b>
6.1	Reconocimiento del sistema tranvía .....	25
6.2	Análisis de caracterización de la materia prima .....	26
6.3	Parte externa de la pieza .....	27
6.3.1	Análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) .....	27
6.3.2	Análisis termogravimétrico (TGA) .....	28
6.3.3	Análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC) .....	29
6.4	Parte interna de la pieza .....	30
6.4.1	Análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) .....	30
6.4.2	Análisis termogravimétrico (TGA) .....	32
6.4.3	análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC) .....	33
6.5	Resumen de la caracterización .....	34
6.6	Mapeo de materia prima y elaboración de ficha técnica .....	35
6.7	Vigilancia tecnológica .....	35
6.8	Padrinazgo .....	36
6.9	Revisión de Informes .....	37
6.10	Recorrido paneles solares .....	37
<b>7</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>37</b>
<b>8</b>	<b>Referencias .....</b>	<b>38</b>
<b>9</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>41</b>
9.1	Ficha técnica .....	41

# **Diseño de un proceso de fabricación de un prototipo para la homologación del limitador de hundimiento para el Tranvía del Metro de Medellín.**

## **Resumen**

Hoy en día surge como nueva alternativa el proceso de homologación de piezas, ya sea por la dificultad para importarlas, porque están descontinuadas en el mercado o por su gran costo en otros lugares del mundo. Para realizar una homologación satisfactoria para las empresas es necesario contar con personal calificado en diferentes áreas, especialmente en el área de metrología ya que de esta depende las dimensiones y la modelación exacta de la pieza y de la ingeniería de materiales, ya que de esta va a depender que los materiales usados para el diseño del prototipo cumplan con requerimientos químicos, físicos y mecánicos para proceder a la fabricación de la pieza homologada y posterior uso en la industria. Es de vital importancia la ingeniería de materiales para el área de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) del Metro de Medellín ya que las piezas homologas prestarán servicio en un sistema de transporte masivo de personas y se debe garantizar su seguridad y su integridad, manteniendo el buen nombre de la empresa Metro de Medellín. En este trabajo se planteó realizar una ficha técnica teniendo en cuenta la caracterización realizada a la pieza original para la correcta homologación del limitador de hundimiento del tranvía de Medellín. Se logró implementar una ficha con especificaciones y recomendaciones técnicas como ayuda a los futuros fabricantes, teniendo en cuenta criterios establecidos por la ingeniería de materiales. El área de I+D+i está adscrita a la Gerencia de Planeación Estratégica de la empresa y es por ello por lo que se les brinda apoyo a todas las áreas de la empresa desde infraestructura hasta mantenimiento, por lo tanto durante la práctica también se realizaron labores como búsquedas tecnológicas, búsquedas de patentes, y búsquedas de nuevas estrategias para prestar un buen servicio siempre de la mano de la innovación.

## **1 Introducción**

El Sistema Integrado de Transporte del Valle de Aburrá - SITVA es el conjunto de modos de transporte público que permite a los ciudadanos metropolitanos desplazarse por los diez municipios del Valle de Aburrá. El SITVA está conformado por los subsistemas de metro, cables aéreos, tranvía y buses que circulan por carriles preferenciales y exclusivos, así como sus servicios alimentadores [1].

El origen del transporte tipo tranvía se caracterizó principalmente porque circulaba sobre rieles de hierro, aunque estuviera tirado por caballos. La idea surgió a partir de los coches de caballos que transportaban personas y en

algunas ocasiones tenían problemas para moverse ágilmente por ciertas calles de las ciudades. Para solventar este problema se decidió instalar unos rieles metálicos que sobresalían de la calzada y por los que circulaba este nuevo medio de transporte urbano: había nacido el tranvía. El tranvía es un invento del inglés John Outram en 1775 en Inglaterra. Al principio, no se utilizó para el transporte urbano sino para transporte de las periferias de las ciudades. El uso urbano del tranvía se inició medio siglo más tarde en Nueva York, en 1832, donde a John Stephenson se le ocurrió construir el primer tranvía de transporte urbano.

En 1852 al francés Émile Loubat, un mecánico de Nantes, se le ocurrió la brillante idea de empotrar los rieles en el suelo, detalle que salvó al tranvía de su desaparición.

El tranvía eléctrico fue inventado por Werner von Siemens en Alemania en el año 1881. Al principio tomaba la electricidad de los rieles, pero posteriormente se cambió por un sistema de cable aéreo para evitar electrocutar a los peatones.

A partir de la década de los 80 del siglo XX se rescató el uso del tranvía, debido al auge de la concienciación del respeto del medioambiente y como solución a la alta contaminación de las ciudades por los vehículos equipados por motor de explosión [2].

El tranvía eléctrico llegó a Medellín en 1921: rodaba con 68 coches sobre 48 kilómetros de vías. En los primeros cinco años del tranvía, no se presentó ningún tipo de inconvenientes, pero en el año 1926, cuando debido a una serie de anomalías que se venían presentando con relación al servicio, que pueden llamarse problemas de orden operacional, el Concejo optó por aprobar un proyecto de reglamentación del servicio, presentado por la empresa el 18 de marzo y que partía de la premisa de la necesidad de cumplir el reglamento para poder viajar en el tranvía. El sistema contaba con rutas hacia La América, El Bosque, Buenos Aires, Robledo, Sucre, Manrique y Belén.

Finalmente fueron los efectos económicos de alta competencia del transporte público automotor, cuya demanda crecía aceleradamente, la que le dio el golpe mortal a la empresa del tranvía. A mediados del año 1951 ya no existían sino dos líneas, la de Aranjuez y la de Manrique. Las líneas restantes fueron reemplazadas con los modernos buses del municipio. En noviembre de 1951 comenzó el levantamiento de rieles por parte de los presidiarios del circuito judicial en la zona céntrica y por los trabajadores del municipio en la zona barrial. La historia del tranvía a partir de 1945 está

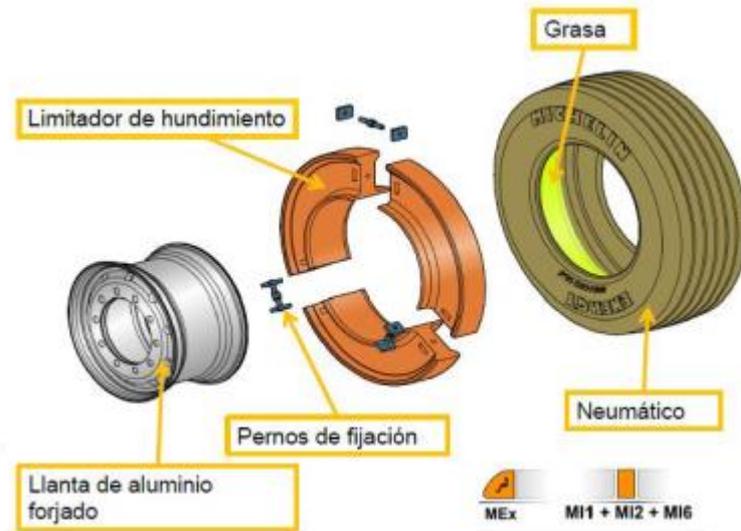
marcada por la agudización de la competencia con las empresas de buses, y será el desarrollo definitivo de estas últimas lo que determinó su desaparición en 1951 [3].

El 31 de marzo de 2016 el tranvía de Ayacucho comenzó su operación comercial. Con sus 6 paradas y tres estaciones, este medio de transporte amigable con el medio ambiente convirtió el corredor de Ayacucho en un espacio no solo de movilidad, sino también en una zona de interés comercial, de turismo y cultura, en un espacio público apto para el disfrute de todos los ciudadanos que transiten por esta zona de Medellín [4]. La plataforma tranviaria está formada por una base granular sobre la que se colocan dos losas de hormigón de 45 cm de espesor, en las que se sitúa un carril RG28 central de guiado del sistema tranviario Translohr –con neumáticos de caucho y un riel-, primer sistema de este tipo en entrar en funcionamiento en Latinoamérica y uno de los primeros del mundo. El proyecto incluye nueve paradas en superficie, dos de las cuales tienen conexión con líneas de Metrocable, y está conformado por 12 coches tranviarios que se desplaza a 30 km/h, con una capacidad para 300 pasajeros cada uno [5].

El primer tranvía Translohr fue puesto en funcionamiento en la ciudad de Clermont-Ferrand en Francia en el año 2006, luego siguieron las ciudades de Padua-Italia en 2007, Mestre-Italia en 2010 y en la ciudad de Medellín, Colombia, se inauguró en el año 2016 el primer tranvía Translohr STE5 de 39 m de longitud [6].

El tranvía T-A de Medellín es la primera línea que presenta los rendimientos de inserción y de franqueo del tranvía con neumáticos Translohr en un entorno topográfico especial con varios sectores que presentan una pendiente máxima del 12 % y curvas con un radio de 20 m [7].

Las unidades de este sistema cuentan con 12 neumáticos de caucho que a su vez cuentan con un sistema anti-hundimiento que se activa en casos de emergencia. El sistema anti-hundimiento está conformado por un limitador de hundimiento que son 3 piezas de un material compuesto de matriz polimérica que se unen por 3 tornillos metálicos M16 (llamados pernos de fijación). Este sistema se arma sobre el rin y al interior del neumático como se ilustra a continuación.



**Figura 1.** Esquema del conjunto de ruedas [7].

Entre las ventajas del uso de neumáticos en el tranvía se destaca la adherencia neumática/carretera que confiere al tranvía unas características dinámicas eficaces, en especial en las pendientes fuertes (hasta 13 %) y en las curvas. El uso de los neumáticos garantiza un funcionamiento silencioso, con una unión neumático/rueda sin vibraciones ni rechinchamientos, incluso en curvas de radio pequeño, hasta 10,5 m [8].

El área de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) del Metro de Medellín es la encargada de ejecutar proyectos como la modernización de trenes, homologación y sustitución de piezas. Estos proyectos requieren en su gran mayoría de aplicar conceptos de la Ingeniería de Materiales. El proceso de homologación de piezas se realiza por 3 razones principales: por discontinuación de las piezas en el mercado sin un reemplazo similar, porque los proveedores solo venden grandes cantidades cuando en realidad el usuario solo requiere unas pocas unidades, o por la dificultad para importar las piezas.

El área de I+D+i del Metro de Medellín además de encargarse de los procesos de homologación y sustitución, también hace parte importante en colaboraciones con otras dependencias de la empresa, su misión principal es el desarrollo de proyectos en los que se necesite innovación e investigación. El área de I+D+i cuenta con proyectos en colaboración con dependencias como infraestructura, UEN cívica, logística, el área legal, gestión social, entre otros.

## 2 Planteamiento del problema

Si bien no se han reportado en la literatura trabajos de investigación sobre el tranvía de neumáticos Translohr, el Metro de Medellín cuenta con una gran experiencia en el funcionamiento de este. El tranvía Translohr consiste en un

tranvía que no es convencional ya que se mueve sobre ruedas neumáticas y guiado por un solo carril situado en el centro. Este tipo de vehículo ha sido desarrollado por Lohr Industrie por lo cual está patentado, de tal manera que no se pueden emplear materiales de otras empresas y el fabricante solo permite que se les compren repuestos a ellos como empresa dueña de la patente.

El tranvía de Medellín cuenta con una longitud de 4.3 km, 9 paradas, un patio donde se realiza el mantenimiento y se parquean los vehículos, 12 coches y los vehículos tranviarios está diseñado para pendientes de hasta 13% [9]. Es debido a este tipo de pendientes que cada vehículo tranviario está equipado con un total de doce neumáticos de caucho, los cuales, a su vez, cuentan con un sistema anti-hundimiento que entran en funcionamiento cada vez que las llantas fallan por cualquier motivo.

El Metro de Medellín desde hace un tiempo decidió buscar nuevas alternativas de repuestos de recambio y de modernización de los vehículos, debido principalmente a los problemas de importación de las piezas que hacen parte de insumos para defensa militar como el sistema de anti-hundimiento de los vehículos tranviarios. Por tal motivo se planteó diseñar un proceso de fabricación de la pieza de matriz polimérica del limitador de hundimiento del tranvía, proceso que requiere realizar una homologación para que sea fabricado por empresas colombianas, en este caso disminuyendo los costos y principalmente tiempos de entrega, sin sacrificar de manera alguna la calidad y desempeño del sistema.

Además, durante la práctica se le brindo apoyo al área de I+D+i del Metro de Medellín en la actualización del plan rector de tecnología operativa (PRTO) elaborando búsquedas necesarias para la actualización tecnológica, en el programa de padrinazgo que se trata de fomentar la innovación entre los empleados y colaboradores del Metro de Medellín, en el proceso de prototipado de otras piezas y análisis de fallas revisando los informes elaborados por el grupo de investigación en materiales poliméricos de la Universidad de Antioquia de algunos elementos usados en los sistemas del Metro de Medellín, en el monitoreo de convocatorias de I+D+i en las que pudiera aplicar el Metro de Medellín y monitoreo de estado de los paneles solares ubicados a los largo del Valle de Aburrá.

### **3 Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Diseñar un proceso de fabricación de un prototipo del limitador de hundimiento del tranvía de Medellín, aplicando los conocimientos de la Ingeniería de Materiales obtenidos por la practicante durante la carrera.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Realizar la caracterización mecánica y química de la pieza original del sistema.
- Escoger los materiales más adecuados a emplear en el sistema anti-hundimiento del tranvía.
- Identificar la materia prima más adecuada para cada componente, verificando si es comercial en Colombia o buscar un sustituto adecuado que exhiba un desempeño igual o mejor al original.
- Realizar una ficha técnica del sistema de anti-hundimiento del tranvía de Medellín con todos los requerimientos exigidos a los futuros fabricantes.

### **4 Marco Teórico**

Este apartado se dividió en dos secciones, la primera consiste en el marco teórico con el que se sustenta el proceso de fabricación del limitador de hundimiento, y la segunda será el sustento de las actividades adicionales que se realizaron durante la práctica académica.

#### **4.1 Proceso de fabricación del prototipo**

##### **4.1.1 Proceso de homologación**

Para comprender el proceso que se lleva a cabo con componentes como el sistema anti-hundimiento, es pertinente definir la palabra homologación, lo que según la Real Academia Española consiste en “Equiparar, poner en relación de igualdad dos cosas”, y “Dicho de una autoridad: contrastar el cumplimiento de determinadas especificaciones o características de un objeto o de una acción” [10].

El proceso básico de homologación de un producto consta de varias fases entre las que se encuentran:

- 1.** Identificación del requerimiento
- 2.** Solicitud de evidencias por parte del solicitante

3. Evaluación de los requerimientos por parte de un organismo externo
4. En caso de que el organismo externo considere prudente la homologación y que cumple los requisitos, se emite un certificado de conformidad
5. Prototipado [11].

#### 4.1.2 Prototipo y prototipado

La Real Academia Española define prototipo como “Ejemplar original o primer molde en que se fabrica una figura u otra cosa” [12]. Los prototipos son representaciones concretas que materializan una idea; permiten entender, evaluar, refinar y comunicar aspectos de esta. Los modelos, que pueden ser representaciones de una idea, un producto o un servicio, se someten a procesos de prototipado para dar soporte a la exploración y definición de la propuesta a través de la puesta en prueba con usuarios [13]. El prototipado es un término válido para referirse a la acción y el proceso de creación de un modelo de un determinado producto y a las sucesivas pruebas que se hacen con él [14].

El proceso para diseñar un prototipo consta de los siguientes pasos:

1. Crear un modelo 3D con metrología incluida: en esta etapa se construye un boceto del producto a partir de diseños o de una pieza ya existente, la imagen tridimensional o el diagrama y las medidas reales de la pieza.
2. Buscar resolver el problema planteado. Antes de pasar al prototipo final, hay que asegurarse de que el modelo sea una solución viable. Se deben buscar alternativas de materiales.
3. Ejecutar iteraciones. Una vez que resuelva el funcionamiento adecuado, comienza la etapa de encontrar la versión más eficiente y mercadeable. Para ello es pertinente preguntarse qué podría mejorarse, buscar ayuda externa o consultar con conocidos sobre el funcionamiento. Esta fase sirve para afinar los detalles del lanzamiento.
4. Llevar a cabo experimentaciones. Resulta esencial hacer todas las pruebas necesarias para confirmar que la solución realmente funciona como se espera. Esto quiere decir que hay que apoyarse en diferentes métodos de validación para cubrir todos los ángulos posibles del funcionamiento. También puede apoyarse en la cocreación, dejando que los posibles usuarios le den retroalimentación.
5. Lanzar el prototipo piloto. Esta etapa avanzada requiere más tiempo, inversión y no puede estar atada a cambios radicales del funcionamiento del producto [15].

Una parte fundamental del proceso para realizar un prototipo es la búsqueda de materiales idóneos para la aplicación y que sean económicamente viables para la empresa. A continuación, se procede a

hablar de los materiales necesarios para el desarrollo del prototipo de limitador de hundimiento del sistema tranvía.

### 4.1.3 Materiales poliméricos

Los polímeros son materiales formados por cadenas de moléculas. Estos materiales son producidos por un proceso denominado polimerización que consiste en que pequeñas moléculas formadas por una unidad (conocida como monómero) o unas pocas unidades (conocidas como oligómeros) se unen químicamente para crear moléculas gigantes. Casi todos los polímeros son orgánicos, lo que significa que son de base carbono, pero también pueden ser inorgánicos [16].

Los polímeros comerciales, o materias primas estándar, son materiales ligeros, resistentes a la corrosión, de baja resistencia y rigidez.

#### 4.1.3.1 Clasificación de los materiales poliméricos

Una de las maneras más utilizadas para clasificar los materiales poliméricos es en función a su comportamiento mecánico y térmico así:

- **Polímeros termoplásticos:** Están formados por cadenas largas que se producen al unir monómeros; por lo general se comportan de una manera plástica y dúctil. Las cadenas pueden o no estar ramificadas y las cadenas individuales están entrelazadas. La mayoría de los termoplásticos son polímeros de alto peso molecular y pueden ser materiales amorfos o cristalinos. Al calentarse, se ablandan y se funden y es por esto por lo que se puede reciclar fácilmente.
- **Polímeros termoestables:** Están constituidos por cadenas largas (lineales o ramificadas) de moléculas fuertemente unidas por enlaces cruzados, entrelazados, para formar estructuras de red tridimensional. Los polímeros termoestables son por lo general más rígido, pero más frágiles que los termoplásticos. Los termoestables no se funden al calentarse sino que empiezan a descomponerse, por tanto, el reciclaje por métodos termomecánicos es difícil.
- **Elastómeros:** se conocen también comúnmente como cauchos. Son materiales que exhiben una deformación unitaria a la rotura superior al 200%, exhibiendo en casi todo el rango de deformaciones un comportamiento elástico. Los elastómeros pueden ser termoplásticos o termoestables con baja densidad de enlaces entrecruzados. Las cadenas poliméricas tienen forma de molécula en espiral que pueden estirarse de manera reversible al aplicar una fuerza [16].

#### **4.1.4 Materiales compuestos**

Los compuestos están formados por dos o más materiales o fases, se utilizan para obtener una combinación de propiedades que no se puede lograr de otra manera. Los compuestos a microescala incluyen materiales como los plásticos reforzados con fibra de carbono (PRFC) o con fibra de vidrio (PRFV). Estos ofrecen ventajas significativas y su uso es creciente en aviones, componentes eléctricos, automotores y artículos de deporte.

En los materiales compuestos son importantes las propiedades y fracciones volumétricas de cada fase individual; también es muy importante la conectividad de las fases. En general, la fase de la matriz es la fase continua y la otra fase es la fase dispersa [16].

##### **4.1.4.1 Compuestos reforzados con fibras**

La mayor parte de los compuestos reforzados con fibra producen resistencia a la fatiga, mejor módulo de Young y una mejor relación entre la resistencia y el peso, al incorporar fibras resistentes, rígidas, aunque frágiles, en una matriz blanda y más dúctil. El material de la matriz transmite la fuerza a las fibras, mismas que soporta la mayor parte de la fuerza aplicada.

Se utilizan muchos tipos de materiales de refuerzo. Se usa varillas de acero para reforzar el cemento, fibras de vidrio en una matriz polimérica para aplicaciones al transporte y naves espaciales. Fibras de boro, carbono, polímeros (como aramiditas) y materiales cerámicos proporcionan un refuerzo excepcional en los compuestos avanzados.

Al diseñar un compuesto reforzados con fibras, se deben tomar en consideración numerosos factores, incluyendo longitud y diámetro (las fibras puede ser cortas, largas o incluso continuas), orientación (puede ser aleatoria que da como resultado propiedades isotrópicas, unidireccional que da como resultado propiedades anisotrópicas y en patrones tridimensionales), cantidad (se debe tener en cuenta que la fracción volumétrica de la fibra incrementa la resistencia y la rigidez del compuesto) y las propiedades tanto de las fibras como de la matriz [16].

##### **4.1.4.2 Compuesto de matriz polimérica reforzados con fibras cerámicas**

Los materiales compuestos de matriz polimérica y refuerzo cerámico combinan una matriz que puede ser un material termoplásticas, termoestable o un elastómero, con fibras cerámicas en la mayoría de casos. Sus atractivas propiedades les hace ser competitivos con otros materiales del mercado.

Es el refuerzo fibroso el que consigue dotar al material compuesto de la resistencia mecánica adecuada, mientras que la matriz aporta elasticidad, resistencia química y térmica, y, sobre todo, bajo peso. En algunas ocasiones los refuerzos se presentan en forma de partículas como las cargas silíceas; aunque lo normal es que se trate de fibras, que pueden ser cortas o, según las prestaciones exigidas al material resultante. Las características más importantes y las aplicaciones de las fibras utilizadas normalmente son:

- Excelente adherencia fibra-matriz
- Resistencia mecánica específica (resistencia a tracción/densidad) superior a la del acero en la dirección de la fibra
- Buenas propiedades dieléctricas
- Incombustibilidad
- Estabilidad dimensional
- Débil conductividad térmica
- Buena resistencia a los agentes químicos
- Fácil procesamiento
- Propiedades isotrópicas [17]

Una de las aplicaciones con mayor valor agregado de este tipo de materiales compuestos es el sector automotriz, que en gran medida hace uso de los materiales poliméricos termoplásticos reforzados con fibra de vidrio para reemplazar algunas aleaciones metálicas, sin sacrificar la resistencia y añadiendo las atractivas ventajas que se mencionaron anteriormente.

Actualmente, el potencial de los termoplásticos reforzados es objeto de intensa investigación, particularmente en Europa, con el objetivo de reducir el peso y con esto las emisiones en aplicaciones automotrices. Y es de especial interés el uso de refuerzos de fibra larga, donde la capacidad de carga y la resistencia son mayores. Hasta ahora la mayor dificultad había sido el suministro de materia prima y el procesamiento: tener que mezclar los gránulos de compuestos para añadir aditivos o someterlos a corte durante el procesamiento reduce el largo de las fibras y va en detrimento de las propiedades de la pieza. Por esto los proveedores y demás entidades encargadas del desarrollo de resinas se han concentrado en brindar soluciones fáciles de procesar, donde el largo de las fibras se ve comprometido lo menos posible [18].

#### **4.1.5 Moldeo de polímeros por colada (vaciado)**

El moldeo por vaciado consiste en verter un polímero líquido en un molde para que fluya gracias a la fuerza de la gravedad, y posteriormente dejar que enfríe y solidifique.

Las ventajas de este proceso frente a otros procesos de transformación de polímeros residen en que los moldes son más simples y por consiguiente más

económicos, las piezas se moldean libres de tensiones, y en que es un proceso que resulta rentable para producciones de series cortas.

Para conseguir un llenado completo de la cavidad y evitar que se formen burbujas de aire durante el llenado, se puede realizar la colada en atmósfera de vacío. Asimismo, también se puede emplear presión o la fuerza centrífuga (colada por rotación) para hacer que el líquido rellene todas las cavidades del molde.

En general este método se utiliza cuando se tienen que fabricar muy pocas piezas y no se quieren realizar grandes inversiones, y para producción de prototipos industriales [19].

Algunos termoplásticos como poliamidas y acrílico y termoestables como la resina epóxica, poliéster o poliuretano se pueden colar en moldes rígidos o flexibles, con gran variedad de formas, pero hay que tener en cuenta que para obtener formas más detalladas es más efectivo utilizar un molde flexible.

#### **4.1.6 Técnicas de caracterización**

La caracterización es una herramienta esencial para asegurar la calidad en los procesos de diseño y fabricación de nuevos productos. Entre las técnicas más usadas para la caracterización de los polímeros se encuentra:

##### **4.1.6.1 Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)**

Esta técnica proporciona un espectro de reflexión de las bandas de los grupos funcionales de las sustancias inorgánicas y orgánicas, por lo cual es posible realizar una identificación de los materiales [20]. La región IR va de 12800 a 10  $\text{cm}^{-1}$  y se puede dividir en la región de IR cercano (NIR) (12800-4000  $\text{cm}^{-1}$ ), IR medio (4000-400  $\text{cm}^{-1}$ ) en el cual se caracterizan generalmente los materiales poliméricos e IR lejano o FAR-IR (50-400  $\text{cm}^{-1}$ ) [21]. El equipo cuenta con un accesorio que le permite trabajar modo reflectancia total atenuada (ATR), la cual es ideal para muestras muy absorbentes o gruesas que a menudo producen picos intensos cuando se miden por transmisión. ATR funciona bien para estas muestras porque la intensidad de las ondas evanescentes decae exponencialmente con la distancia desde la superficie del cristal ATR, lo que hace que la técnica sea generalmente insensible al grosor de la muestra [22].

##### **4.1.6.2 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)**

Permite determinar la cantidad de calor que absorbe o libera una sustancia, cuando es mantenida a temperatura constante, durante un tiempo

determinado, o cuando es calentada o enfriada a velocidad constante, en un determinado intervalo de temperaturas [23]. El DSC es una técnica cuantitativa. El área entre la curva del termograma y la línea base puede relacionarse con la entalpia de la transición [24]. Permite determinar transiciones reversibles y no reversibles de materiales poliméricos como temperatura de fusión, temperatura de transición vítrea, temperatura de cristalización y temperaturas de curado [25]. El fenómeno de la transición vítrea es un proceso de no equilibrio y tiene un carácter cinético. Este hecho se manifiesta en las medidas de DSC, donde la  $T_g$  que se obtiene depende de la historia térmica de la muestra y, particularmente, de la velocidad de enfriamiento (que es la que determina el estado inicial vítreo del polímero que se va a estudiar), así como la de la posterior velocidad de calentamiento del aparato durante la obtención del termograma. Durante el enfriamiento, se pueden obtener curvas simples con un enfriamiento balístico (enfriamiento rápido), con un enfriamiento controlado se puede definir su rastro térmico y permite realizar estudios de recristalización isotérmica, mientras que durante el posterior calentamiento pueden obtenerse picos, si el estado amorfo se ve perturbado por algunos factores como cristalinidad, diluyente, o en el caso de mezclas de polímeros. Es posible definir la temperatura de transición vítrea de varias formas. La más común es:  $T_0$ , punto de corte de la línea extrapolada desde la zona vítrea con la bisectriz de la transición trazada por su punto medio;  $T(1/2 \Delta C_p)$ , temperatura correspondiente a la mitad del incremento en el calor específico durante la transición y  $T_{inf}$ , la temperatura del punto de inflexión del termograma [26].

#### **4.1.6.3 Termogravimetría (TGA)**

Esta técnica permite medir el porcentaje del peso de una muestra frente al tiempo o a la temperatura mientras se somete a un programa de temperatura controlado en una atmósfera específica [27]. Permite determinar la temperatura de descomposición de diferentes materiales a diferentes temperaturas en atmósferas variables que pueden ser de nitrógeno o de aire [25]. Las áreas de aplicación de esta técnica incluyen los termoplásticos, elastómeros, termoestables, metales y cerámica, así como una amplia gama de análisis en las industrias química, alimentaria, farmacéutica y de la construcción.

#### **4.1.6.4 Dureza Shore A y D**

Para la medición de la dureza Shore se utilizan varias escalas: Shore A, B, C, D, 0 y 00. La escala Shore A es la más conveniente para medir elastómeros, aunque la escala Shore D también puede utilizarse para la medición de

dureza de cauchos más duros El durómetro Shore D dispone de una punta cónica y de un resorte rígido. El método más popular de medida de dureza de los cauchos es el Shore A, se basa en la penetración de una punta troncocónica en contra de la reacción de un resorte metálico calibrado. Cuando con el durómetro Shore A se obtiene lecturas superiores a 90, se recomienda emplear el durómetro Shore D. Este método está descrito en la norma estadounidense ASTM D2240, la norma española UNE 53130 y la norma alemana DIN 53505 [28]. En la figura 2 se ilustran los rangos de durezas Shore 00, A y D con algunos ejemplos.

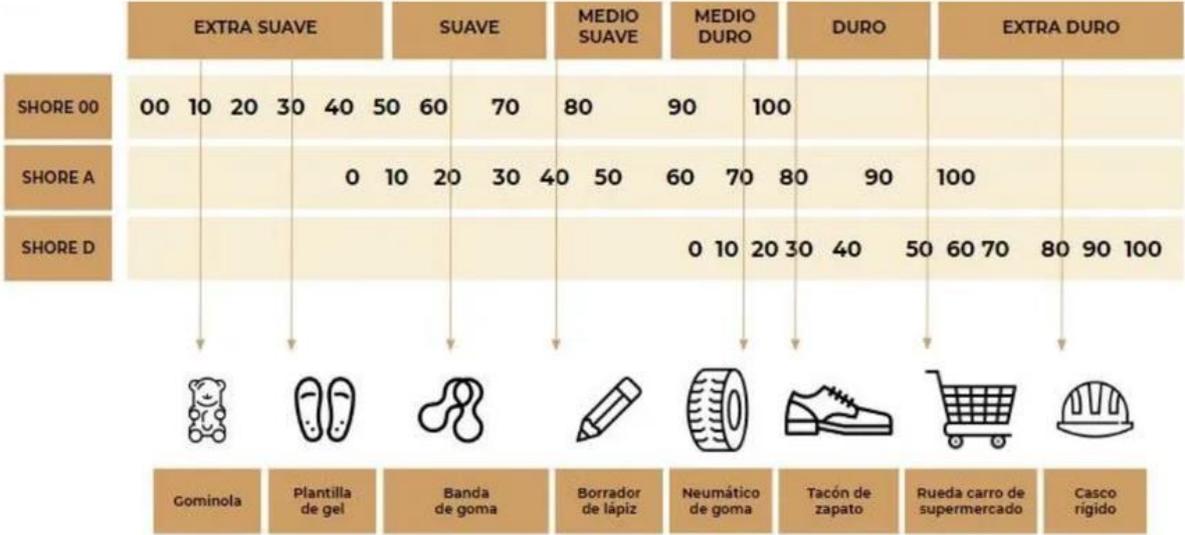


Figura 2. Escala de dureza Shore [28].

**4.1.6.5 Densidad**

Para este trabajo también se tomaron medidas de densidad ya que esta medición comprueba la pureza y la concentración de una muestra y ofrece información de su composición. La medición de la densidad es muy importante para asegurar la calidad tanto de materiales primas como de productos acabados. La densidad absoluta de un material es la razón entre su masa y su volumen. Es una magnitud que mide la cantidad de materia contenida en la unidad de volumen de un sistema. Es una propiedad intensiva, es decir es independiente de la cantidad de materia observada [29].

## **4.2 El rol de la investigación, el desarrollo y la innovación en el Metro de Medellín**

### **4.2.1 Plan director**

El plan director es un documento formal en el que se intenta plasmar, por parte de los responsables de una compañía (directivos, gerentes, empresarios, entre otros) cuál será la situación de la misma dentro un período de tiempo, generalmente de 5 a 10 años.

El plan director es cualitativo: define las futuras cualidades de la compañía, finalista: indica lo que se quiere conseguir, pero no cómo conseguirlo, y atemporal: no establece plazos para alcanzar lo propuesto, a excepción de la propia vigencia del plan [30].

La mayoría de las grandes compañías del mundo tienen un plan de empresa, que consiste en un mapa de lo que se percibe que será el camino seguro desde un punto de partida hasta una meta fija. Con la preparación de un plan de empresas (plan director) no solo se aprenden a fijar objetivos y la manera de alcanzarlos, sino también cómo desarrollar un proceso capaz de generar riquezas y servicios. Es un instrumento de autoevaluación indispensable para medir las expectativas y sustentar las metas posibles de alcanzar. Es dinámico, por lo tanto, puede cambiar y debe esperarse que cambie, incorporando lo aprendido a lo largo de la continua exploración del mercado y la práctica del negocio [31].

El Plan Rector de Tecnología Operativa (PRTTO) es el nombre que recibe el plan de empresa del Metro de Medellín. El PRTTO tiene la responsabilidad de planear y ejecutar las acciones de repotenciación, reposición y actualización tecnológica de los sistemas de seguridad física, patrimonial y operativa; de los sistemas de trenes, cabinas de cables, tranvías y buses; y de los sistemas de señalización y gestión de tráfico, entre otros asuntos vitales [1].

### **4.2.2 Tipos de búsquedas para la actualización del plan de empresa**

Las búsquedas surgen por la necesidad de información o carencia de conocimiento sobre un fenómeno en específico. Existen muchos tipos de búsqueda, en este trabajo se mencionarán 2 de las más utilizadas e importantes para la actualización y vigilancia de la tecnología usada en el mundo para los sistemas de transporte masivos.

#### 4.2.2.1 Búsquedas de información académica y científica

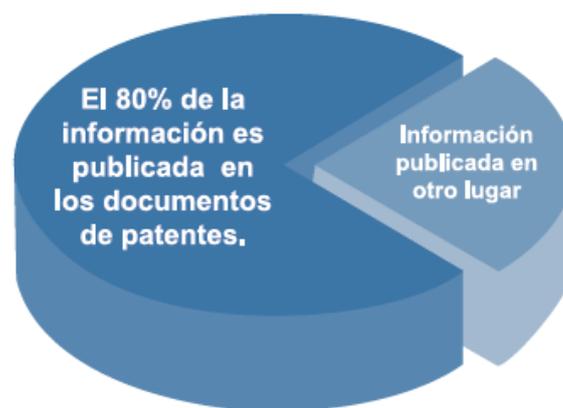
La búsqueda bibliográfica es el procedimiento que permite localizar, en una serie de fuentes de información distintas, un conjunto de documentos y de información necesarios para resolver cualquier problema de investigación o información que se nos plantee [32].

La búsqueda académica y científica es el primer paso del proceso de investigación científica. Con esta se busca contribuir a mejorar la interpretación de resultados, enriquecer el discurso de las personas, generar ideas, comprobar el estado actual de los conocimientos sobre el tema a tratar, contextualizar el problema de investigación y comparar diferentes abordajes metodológicos para la resolución del problema [33].

#### 4.2.2.2 Búsquedas de patentes y vigilancia tecnológica

Las patentes son una de las principales fuentes de información en la práctica de la vigilancia tecnológica y la inteligencia competitiva.

La información contenida en los documentos de patentes no solo ofrece datos tecnológicos relacionada con un sector específico sino también sobre las empresas que se destacan en ese sector, así como los potenciales mercados en los que la tecnología podría ser explotada. De igual manera permite anticiparse a potenciales desarrollos de los líderes de una tecnología determinada, así como sus competidores [34]. En la Figura 3 se ilustra en un gráfico de torta la importancia de la información que se encuentra en las patentes cuando se realiza vigilancia tecnológica e inteligencia competitiva.



**Figura 3.** Importancia de la información publicada en los documentos de patentes cuando se realiza vigilancia tecnológica e inteligencia competitiva [34].

Para iniciar la búsqueda de patentes y vigilancia tecnológica es indispensable tener un conocimiento básico de las características de estos documentos. A continuación, se da una breve explicación de los dos términos:

- **Patente:** Una patente es un derecho exclusivo concedido a una investigación, es decir, un producto o procedimiento que aporta, en general, una nueva manera de hacer algo o una nueva solución técnica a un problema.

Para que una patente sea otorgada debe cumplir 3 requisitos: novedad, nivel inventivo y aplicación industrial. Cuando una patente es otorgada impide que terceros la usen, vendan o fabriquen sin autorización del titular de la patente [34].

- **Vigilancia tecnológica:** se han convertido en prácticas empresariales cruciales para competir en un entorno cada vez más digital, global y dinámico como el actual. Especialmente importante para empresas tecnológicas, organizaciones intensivas en conocimiento y liderazgo de proyectos de I+D+i [35].

La Vigilancia Tecnológica es un "Proceso organizado, selectivo y sistemático, para captar información del exterior y de la propia organización sobre ciencia y tecnología, seleccionarla, analizarla, difundirla y comunicarla para convertirla en conocimiento con el fin de tomar decisiones con menor riesgo y poder anticiparse a los cambios" [36].

Para el Metro de Medellín es indispensable realizar vigilancias tecnológicas, así como búsquedas académicas para mantener y actualizar tanto los procesos como los elementos usados para el transporte masivo de personas. Además, el Metro de Medellín busca incursionar en otros mercados de transporte en el mundo con desarrollos tecnológicos de la mano de instituciones de educación superior.

#### 4.2.3 Innovación

La innovación implica introducir cambios para mejorar artefactos, procesos y sistemas existentes e incide de manera significativa en el desarrollo de productos y servicios. Implica tomar una idea y llevarla a la práctica para su utilización efectiva por parte de la sociedad, incluyendo usualmente su comercialización [37].

A través del diseño y la tecnología, se busca solucionar problemas y satisfacer necesidades presentes o futuras. Con tal fin se utilizan recursos limitados, en el marco de condiciones y restricciones, para dar respuesta a

las especificaciones deseadas. El diseño involucra procesos de pensamiento relacionados con la anticipación, la generación de preguntas, la detección de necesidades, las restricciones y especificaciones, el reconocimiento de oportunidades, la búsqueda y el planteamiento creativo de múltiples soluciones, la evaluación y su desarrollo, así como con la identificación de nuevos problemas derivados de la solución propuesta [37].

Tanto las empresas que manejan los sistemas del transporte masivo en el mundo como las que desarrollan y distribuyen la tecnología le apuestan a la innovación. La innovación tiene efectos económicos, sociales y ambientales positivos para las empresas. Durante la revisión bibliográfica se evidenció que para muchas empresas el problema principal para fomentar la innovación son los costos que se perciben como altos [37]. Los costos son importantes ya que no siempre se pueden recuperar cobrando precios más altos por el servicio.

Para darle un nuevo impulso a la innovación en la empresa Metro de Medellín, ellos crearon un programa liderado por el área de I+D+i llamado patrocinio, que tiene como objetivo generar capacidades a través de actividades lúdicas, recreativas y formativas con los funcionarios Metro. Además, poner a disposición del personal herramientas como la página web llamada IdeCo para generar ideas colaborativas, para potenciar la co-creación y la gestión de ideas, realizando prototipados y pruebas de las ideas propuestas por los empleados.

## **5 Metodología**

### **5.1 Revisión bibliográfica**

Se realizó una revisión bibliográfica constante para efectuar análisis de los espectros del FTIR y los termogramas de DSC y TGA obtenidos durante la caracterización y realizar un mapeo de la materia prima, se tomaron referencias tanto de bases de datos académicas como archivos de empresas dedicadas a los materiales poliméricos y compuestos.

### **5.2 Reconocimiento del sistema Tranvía**

A lo largo del proyecto y como lo indica el proceso de homologación constituido por el Metro de Medellín se realizaron visitas a las instalaciones del patio taller del tranvía de Ayacucho de la ciudad de Medellín, con el objetivo de efectuar un reconocimiento del sistema anti-hundimiento y su función en los vehículos tranviarios.

### **5.3 Análisis de caracterización de la materia prima**

Con el fin de identificar la composición química y diferentes temperaturas importantes en los polímeros, la dureza y la densidad del material compuesto, se realizaron análisis de espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), calorimetría diferencial de barrido (DSC), termogravimetría (TGA), ensayos de dureza Shore A y D y densidad.

La caracterización se ejecutó mediante un contrato del Metro de Medellín con la Universidad de Antioquia, el análisis de la caracterización se realizó en conjunto entre el grupo de investigación de Materiales Poliméricos y la practicante (estudiante) del Metro. El grupo de Materiales Poliméricos de la Universidad de Antioquia reporta los siguiente parámetros y equipos utilizados para los ensayos de la caracterización de la materia prima:

#### **5.3.1 Espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)**

El análisis se realizó en un Espectrómetro Infrarrojo de Transformada de Fourier, Marca Perkín Elmer, modelo Spectrumone, detector DTGS. La temperatura de ensayo reportada fue de 22 ° C, se realizaron 16 barridos entre 4000  $\text{cm}^{-1}$  y 450  $\text{cm}^{-1}$  con una resolución de 4  $\text{cm}^{-1}$ .

#### **5.3.2 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)**

El análisis mediante DSC se llevó a cabo en el equipo; Differential Scanning Calorimeter (DSC), marca TA Instruments, modelo Q100. El ensayo fue realizado en atmósfera de nitrógeno, se realizaron 4 ciclos, los dos primeros correspondientes al borrado térmico donde se utilizó una rampa de calentamiento desde temperatura ambiente hasta 250 °C a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min, luego se enfrió la muestra a la misma velocidad hasta 25 °C. Finalmente, para los ciclos de medición, se realizó un calentamiento desde 25 °C hasta 300 °C a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min y luego un enfriamiento a la misma velocidad hasta alcanzar la temperatura ambiente.

#### **5.3.3 Termogravimetría (TGA)**

El análisis termogravimétrico se llevó a cabo en un equipo TGA Q500 V20.13 Build 39, bajo las siguientes condiciones de ensayo: la muestra fue calentada en atmósfera de nitrógeno a razón de 20 °C/min hasta 550 °C, allí se sostuvo la temperatura durante 5 minutos aplicando oxígeno y luego de esos 5 minutos de sostenimiento se aplicó de nuevo calentamiento a 20 °C/min hasta los 900 °C nuevamente en atmosfera de nitrógeno.

#### **5.3.4 Dureza Shore D:**

Para la medición de dureza Shore D y Shore A se utilizó un durómetro analógico de la marca CEAST bajo norma ASTM D 2240 con el que se tomaron 10 medidas en zonas aleatorias de las piezas.

#### **5.3.5 Densidad:**

Las mediciones de densidad se realizaron siguiendo la metodología de la norma ASTM D792 a partir del peso de la muestra seca y el peso de la muestra sumergida en un fluido de densidad conocida. Para registrar los pesos se utilizó un kit de densidad normalizado y una balanza analítica marca Sartorius referencia CP324S.

#### **5.4 Mapeo de la materia prima y elaboración de ficha técnica**

En conjunto con el grupo de investigación de Materiales Poliméricos y la estudiante se sugirieron materias primas comerciales en Colombia y que podrían ayudar a aumentar tanto la resistencia mecánica de la pieza final como a mejorar la vida útil de esta. También, se dieron recomendaciones del proceso de fabricación óptimo para un prototipo tan complejo como lo es el limitador de hundimiento.

#### **5.5 Vigilancia tecnológica**

A la estudiante se le fueron asignadas una serie de búsquedas que incluían búsquedas académicas de desarrollos tecnológicos en el mundo de los sistemas férreos, actualización tecnológica de la comunicación de los sistemas férreos en el mundo y de elementos indispensables para prestar un servicio adecuado, búsquedas de vigencia de patentes y búsquedas de patentes usadas por los fabricantes originales del sistema férreo del Metro de Medellín. Adicionalmente, se realizó un monitoreo diario de convocatorias de I+D+i en las que la empresa podría participar y buscar ayudas y beneficios tanto en especie como en efectivo.

#### **5.6 Padrinazgo**

En compañía con el área de I+D+i la estudiante realizó visitas al sistema aéreo y el sistema férreo del Metro de Medellín, con el fin de dar inicio al programa denominado "padrinazgo". Las visitas realizadas durante el tiempo de la práctica tuvieron como objetivo dar a conocer el programa, entregar herramientas claves de innovación como las definiciones de algunas palabras importantes e incentivar al personal a navegar y empezar a utilizar la página web de IdeCo.

## **5.7 Revisión de informes**

De la mano del contrato que tiene el grupo de Materiales Poliméricos de la Universidad de Antioquia con el Metro de Medellín, el área de I+D+i recibe permanentemente informe de análisis de fallas o identificación química y física que son necesarios para el buen funcionamiento de los sistemas que conforma la red Metro de Medellín. La estudiante durante la práctica académica fue la encargada de revisar estos informes, realizar comentarios o sugerencias para próximos informes y asistir a las sustentaciones de estos de ser necesario.

## **5.8 Recorrido en paneles solares**

Se realizó un recorrido por las estaciones Miraflores, Oriente, Villa Sierra, la Estrella, Itagüí, Bello y Arví para verificar el estado de los paneles solares y los cargadores, ya que la empresa presupuestó arreglarlos.

# **6 Resultados y análisis**

## **6.1 Reconocimiento del sistema tranvía**

Se realizaron visitas constantes a las instalaciones del patio taller del tranvía de Ayacucho de la ciudad de Medellín, donde se logró identificar que el sistema antihundimiento, es un montaje que se realiza en la parte interior de la llanta y va pegado al rin del vehículo. Este sistema fue pensado para los casos en que las ruedas se pinchan permita continuar el recorrido, llegar hasta talleres y cambiar la llanta.

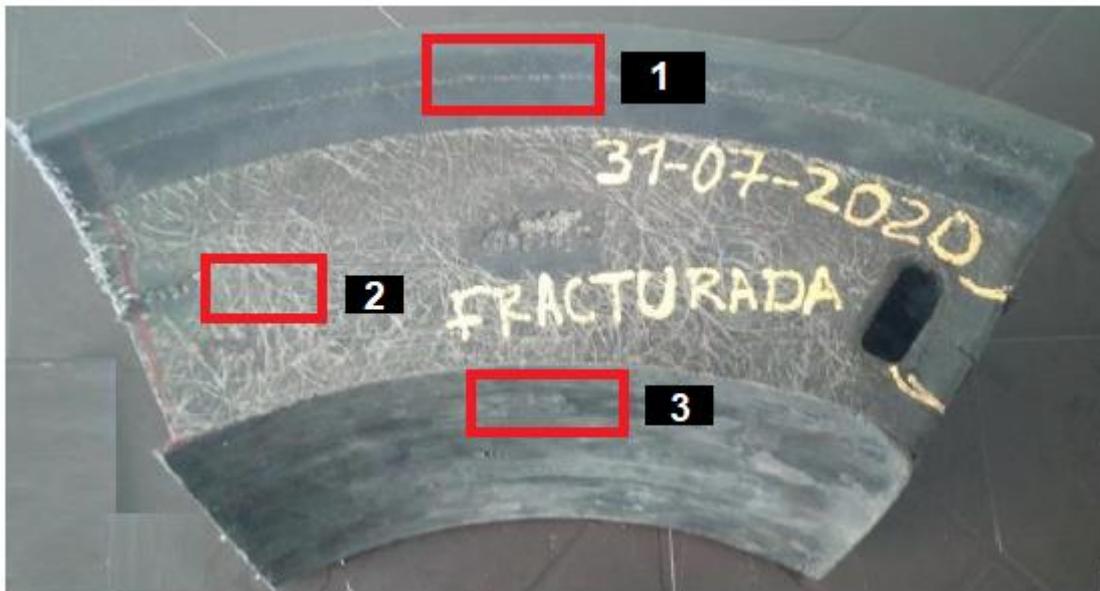
Se logró reconocer cuáles son las condiciones en las que trabaja tanto la llanta como el limitador de hundimiento. Entre los factores para tener en cuenta a la hora de la homologación se encuentran: esfuerzos de tracción de los tornillos M16 que son los encargados de sostener las tres piezas que componen el limitador de hundimiento, impacto y compresión, flexión en condiciones estáticas y cargas alternadas que generan fatiga en las piezas. Durante el mantenimiento y el montaje de los tornillos se pueden generar cortes provocados por herramientas. Además, el limitador de hundimiento está sometido a esfuerzos mecánicos, vibraciones mecánicas, contacto con lubricantes, humedad, temperaturas propias del aire comprimido de la rueda, de la llanta en servicio y del ambiente.



**Figura 4.** Montaje del sistema antihundimiento en condiciones normales.

## 6.2 Análisis de caracterización de la materia prima

El limitador de hundimiento se dividió en tres partes como se ilustra en la figura 5, para facilitar la identificación de los materiales utilizados.



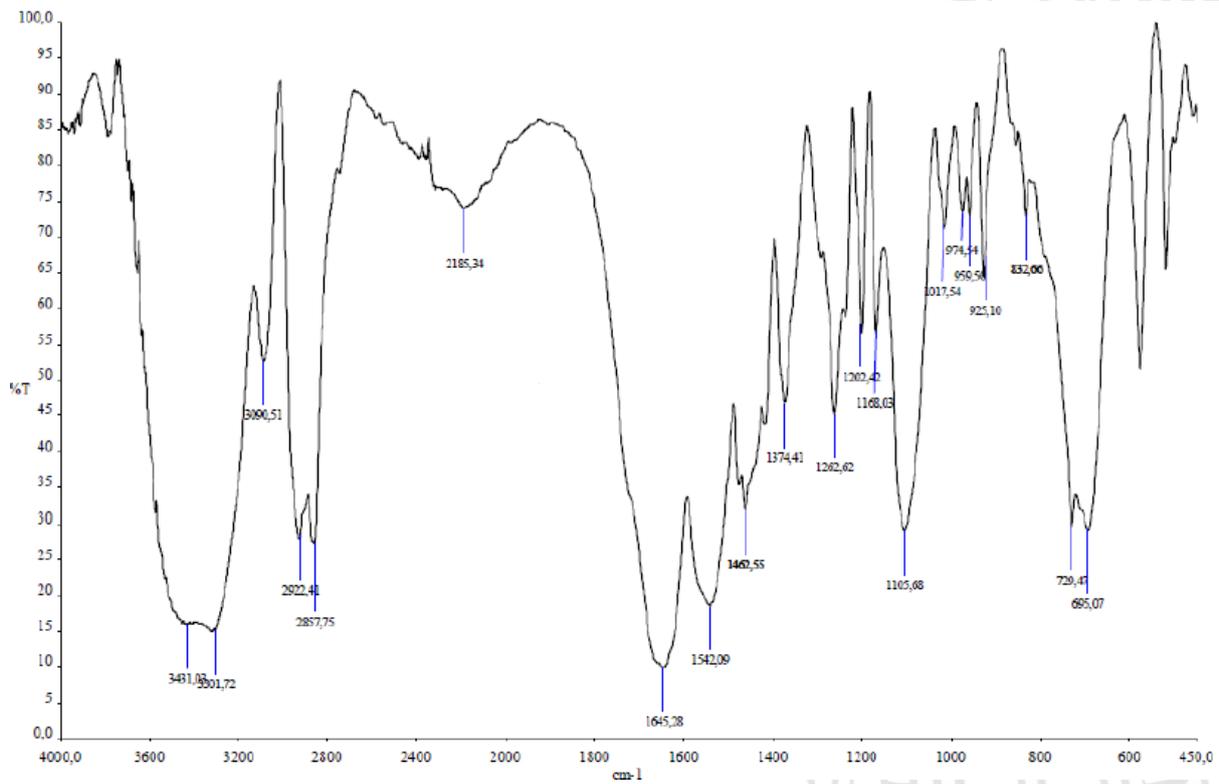
**Figura 5.** Se ilustran las tres zonas de las cuales se tomaron las muestras para realizar la caracterización. La zona 1 corresponde a la parte que se denomina “externa”, la zona 2 a la parte denominada “intermedia” y la zona 3 corresponde a la parte que se denomina “interna” [38].

Los ensayos mencionados anteriormente se les realizaron a las tres partes. A continuación, se ilustran algunos de los ensayos de la parte externa e interna, estos ensayos fueron analizados por la estudiante de manera conjunta con el grupo de investigación de Materiales Poliméricos.

## 6.3 Parte externa de la pieza

### 6.3.1 Análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

En la Figura 6 se presenta el espectro infrarrojo obtenido para la parte externa del limitador de hundimiento del Tranvía.



**Figura 6.** Espectro infrarrojo obtenido para la parte externa de la pieza.

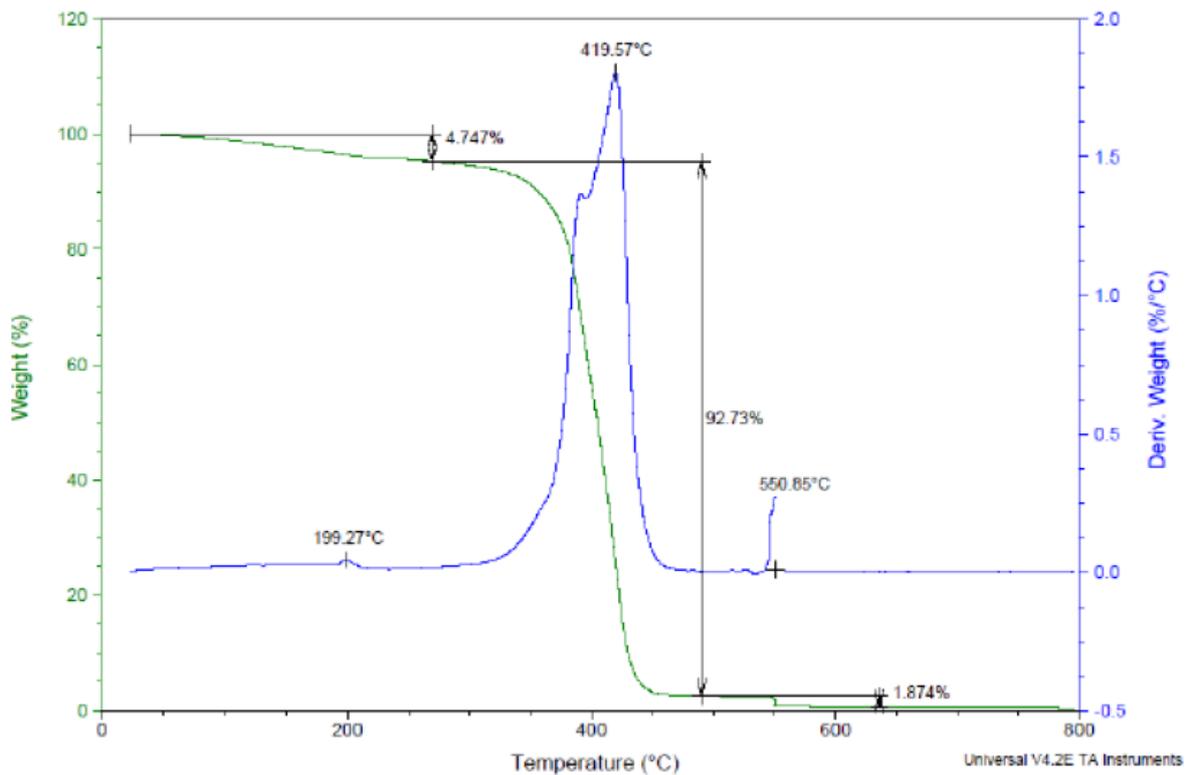
**Tabla 1.** Comparación espectros con la literatura. Elaboración propia a partir de [39]

<b>Banda de poliamida 6 (cm<sup>-1</sup>) (literatura)</b>	<b>Rango en número de onda (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Origen</b>
3450	3431.03	Grupo NH libre
3300	3301.72	Grupo NH
1650	1645.28	Grupo CO-amida I
1550	1542.09	Grupo NH + CN -amida II
1135	1168.03	Grupo amida y cadena de metileno
934	925.10	NH
690	69.07	Grupo amida de poliamidas
630-650,625,580	577	Grupo C=O

Mediante la búsqueda bibliográfica se pudo identificar el espectro infrarrojo obtenido, se concluye que el espectro corresponde a una poliamida 6.

### **6.3.2 Análisis termogravimétrico (TGA)**

En la Figura 7 se observa el termograma obtenido para la parte externa de la pieza.

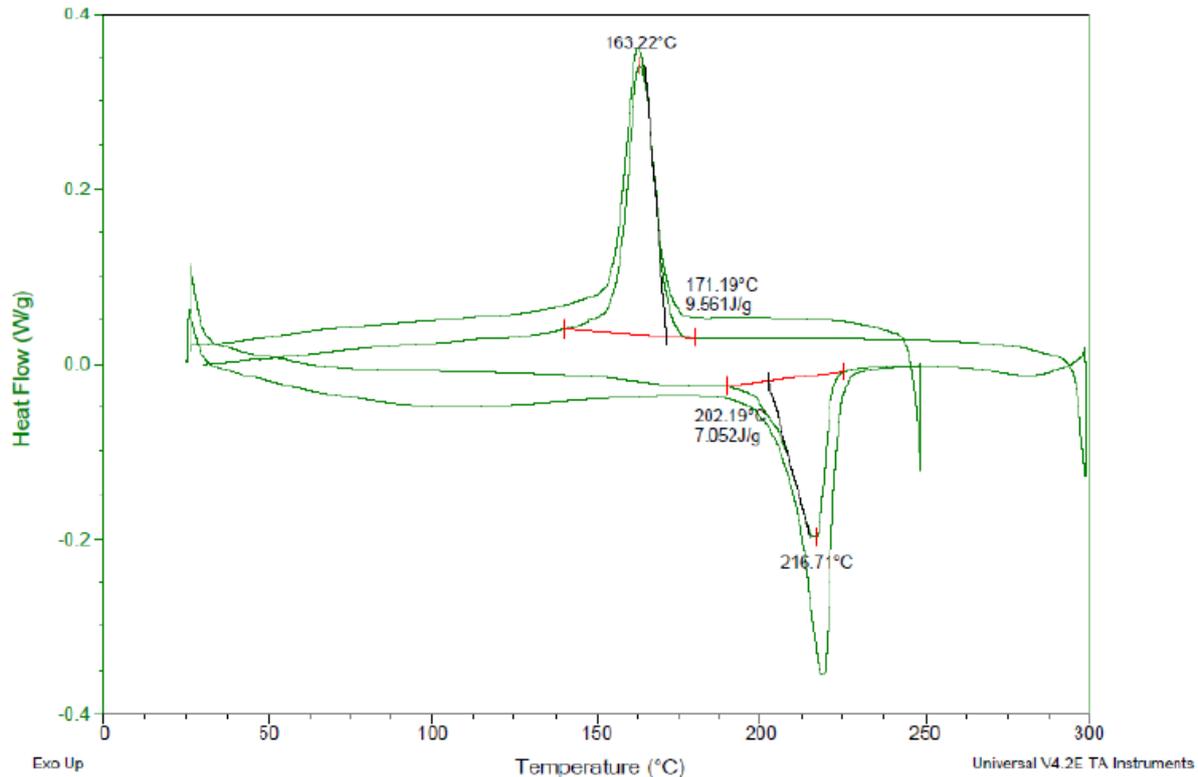


**Figura 7.** Termograma de TGA obtenido para la parte externa de la pieza.

En un primer calentamiento de temperatura ambiente a 260 °C la pérdida de masa fue de 4.747% en peso, se trata en este caso de la pérdida de humedad típica de las poliamidas debido a su carácter hidrofílico. Luego, se registra una pérdida de masa del 92.73% en peso en el intervalo de temperatura de 260 °C y 480 °C aproximadamente, esta descomposición casi total de la muestra se le atribuye a la temperatura de degradación térmica de la poliamida 6 [40]. A 550 °C se realizó un sostenimiento térmico en presencia de oxígeno, se registró una pérdida de masa de 1.874% en peso y se puede atribuir a la presencia de negro de humo usado como pigmento.

### 6.3.3 Análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC)

En la Figura 8 se presenta el termograma obtenido como resultado del análisis DSC de la parte externa de la pieza.



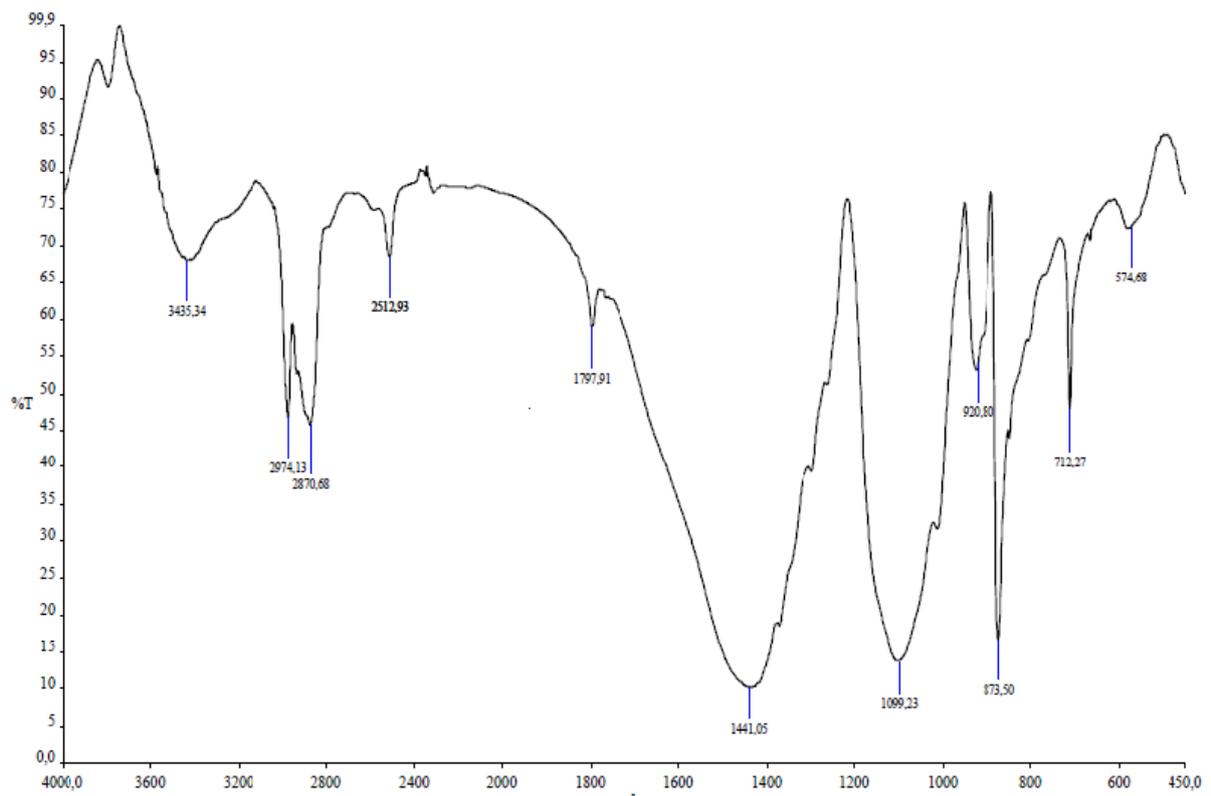
**Figura 8.** Curva calorimétrica DSC obtenida para la parte externa de la pieza.

En la parte inferior de la curva de calorimetría se puede observar un pico de fusión con un valor máximo de 216.71 °C, correspondiente al punto de fusión de la poliamida 6 ya que coincide con el rango que se encuentra registrado en la literatura 213 °C a 220 °C [41]. En la parte superior de la curva, se observa un pico que corresponde a la temperatura de cristalización del material con un máximo de la poliamida 6, corroborando el resultado obtenido por FTIR y por TGA.

## 6.4 Parte interna de la pieza

### 6.4.1 Análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

En la Figura 9 se presenta el espectro infrarrojo obtenido para la parte interna de la pieza.



**Figura 9.** Espectro infrarrojo obtenido para la parte interna de la pieza.

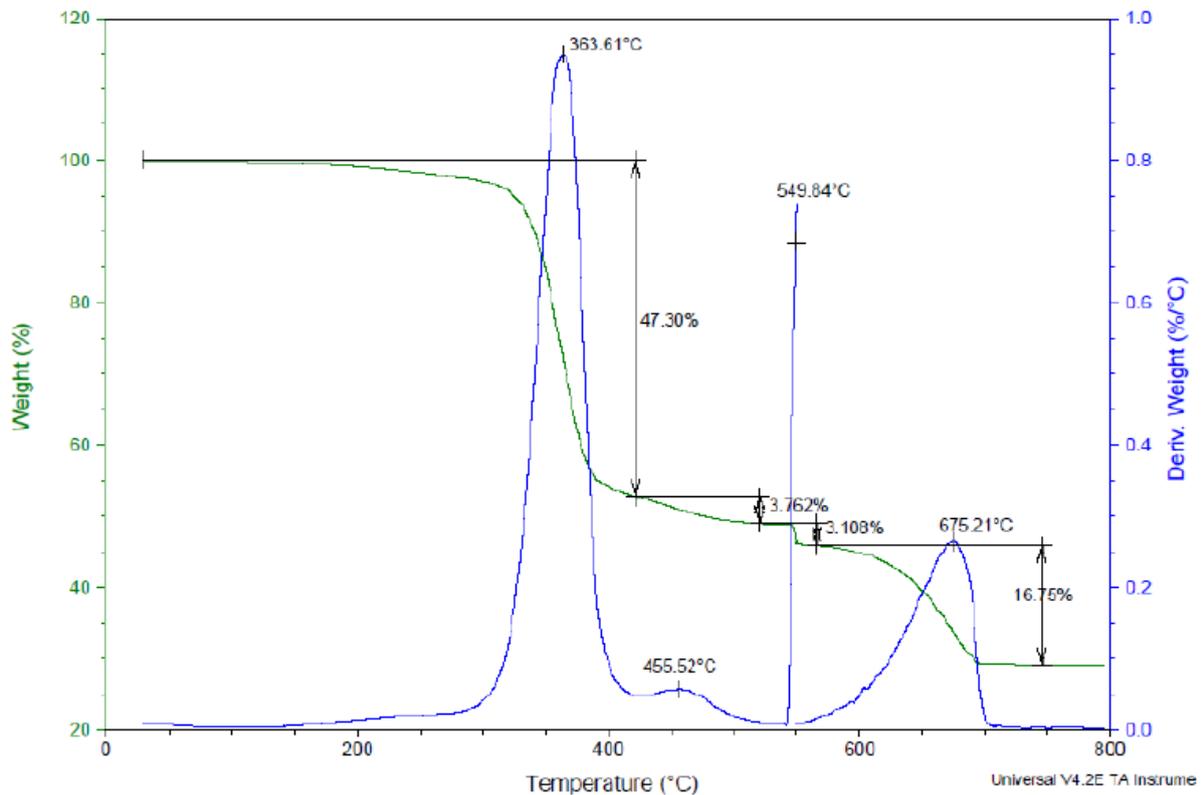
**Tabla 2.** Comparación espectros con la literatura. Elaboración propia a partir de [42] y [43]

Banda de caucho natural (NR) (cm <sup>-1</sup> ) (literatura)	Banda de SBR (cm <sup>-1</sup> ) (literatura)	Rango en número de onda (cm <sup>-1</sup> )	Origen
3470	3450	3435.34	Vibración grupo metilo y metileno y estiramiento OH
2962	No aplica	2974.13	Estiramiento grupo metilo NR
2852	No aplica	2870.68	Estiramiento grupo metilo NR
1728	No aplica	1797.91	Vibración de estiramiento C=C
1444	No aplica	1441.05	Vibración del grupo metilo C-H del grupo metilo
1069	No aplica	1099,23	Deformación axial C-CH <sub>2</sub> del NR
926	960	920.80	Flexión fuera del plano de =C-H Y -CH=CH trans del butadieno
846	No aplica	873.50	Flexión C-H
756	756 y 704	712.27	Vibración C-C y grupos aromáticos =C-H Y C=C de poliestireno en SBR

Mediante la búsqueda bibliográfica se pudo identificar del espectro infrarrojo obtenido que la pieza fue fabricada con una mezcla de caucho natural con el caucho sintético SBR (sigla usada para identificar el caucho estireno butadieno).

#### 6.4.2 Análisis termogravimétrico (TGA)

En la Figura 10 se presenta el termograma obtenido para la parte interna de la pieza.

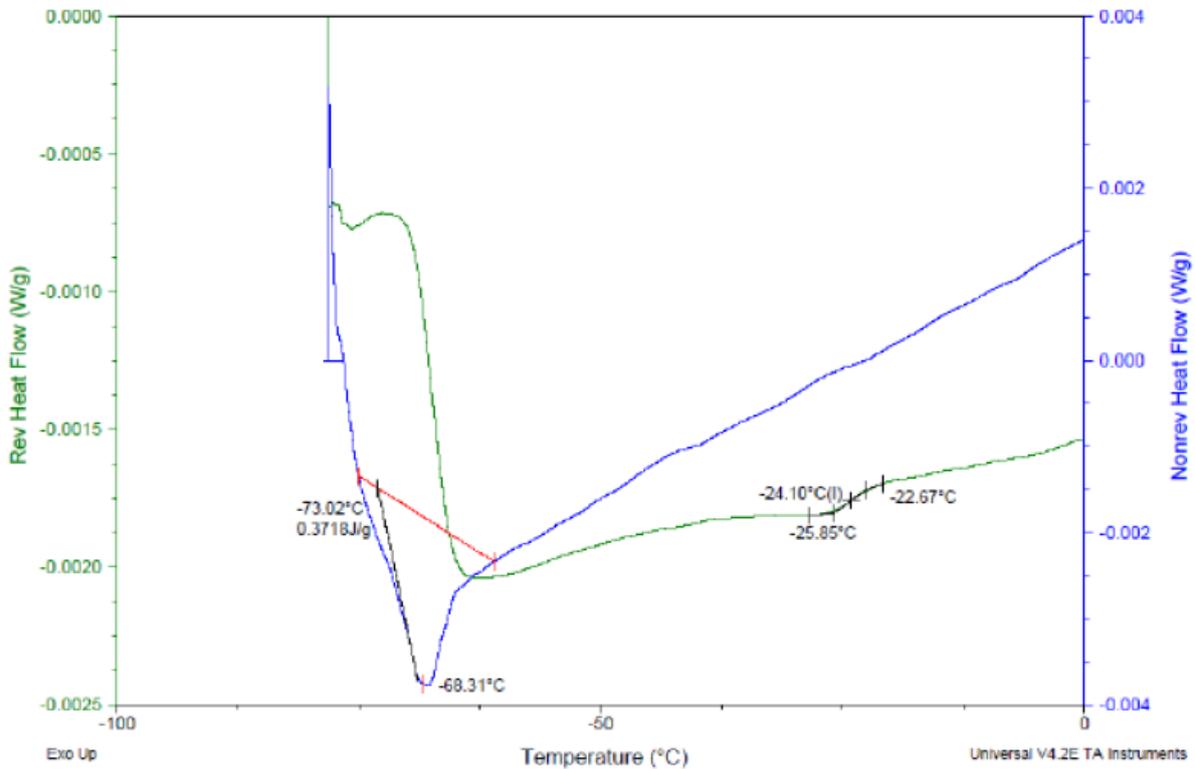


**Figura 10.** Termograma de TGA obtenido para la parte interna de la pieza.

El primer calentamiento de temperatura ambiente hasta 420 °C se notó la descomposición del caucho y la pérdida de masa fue 47.30% en peso, correspondiente a los valores de la literatura donde la descomposición del caucho natural empieza desde los 300 °C aproximadamente y termina a 600 °C [42],[44]. Luego, se registra una pérdida de masa de 3.762% en peso a una temperatura de 455.52 °C atribuida a la degradación térmica del caucho SBR. Posteriormente, a 550 °C en presencia de oxígeno, se registró una pérdida correspondiente a 3.108% en peso se puede atribuir a la presencia de negro de humo usado como carga reforzante en el material, lo que explica además la coloración negra oscura de la pieza. Finalmente, a 550 °C y 750 °C se registra una pérdida de peso de 16.75% la cual se le puede atribuir a materiales de cargas blancas como el carbonato de calcio el cual se descompone térmicamente alrededor de 700 °C [45].

#### 6.4.3 análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC)

En la Figura 11 se presenta el termograma obtenido mediante DSC para la parte interna de la pieza.



**Figura 11.** Curva calorimétrica DSC obtenida para la parte interna de la pieza.

En la curva de calorimetría se puede observar la una Temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) que inicia a  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$  y termina a  $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, y otra transición vítrea que se presenta entre  $-62\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, correspondientes a las del caucho natural y el SBR vulcanizado [43].

### 6.5 Resumen de la caracterización

A continuación, se presenta un resumen de la caracterización de las tres partes por las que están compuesto el limitador de hundimiento del tranvía de Medellín.

**Tabla 3.** Resumen de caracterización.

<b>Parte</b>	<b>Composición</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Dureza</b>
Externa	Está fabricada con poliamida 6, con 2% en peso de negro de humo	No se midió	Shore D = 65 ± 1
Intermedia	Está fabricada con nylon 6, con 2.5% en peso de negro de humo y 9% en peso de fibra de vidrio aleatoriamente distribuida.	1.14	Shore D = 65 ± 1
Interna	Corresponde a una mezcla de caucho natural con SBR (caucho estireno-butadieno), negro de humo y carbonato de calcio.	1.41	Shore A = 56 ± 1

### **6.6 Mapeo de materia prima y elaboración de ficha técnica**

Con el mapeo de la materia prima se logró concluir que:

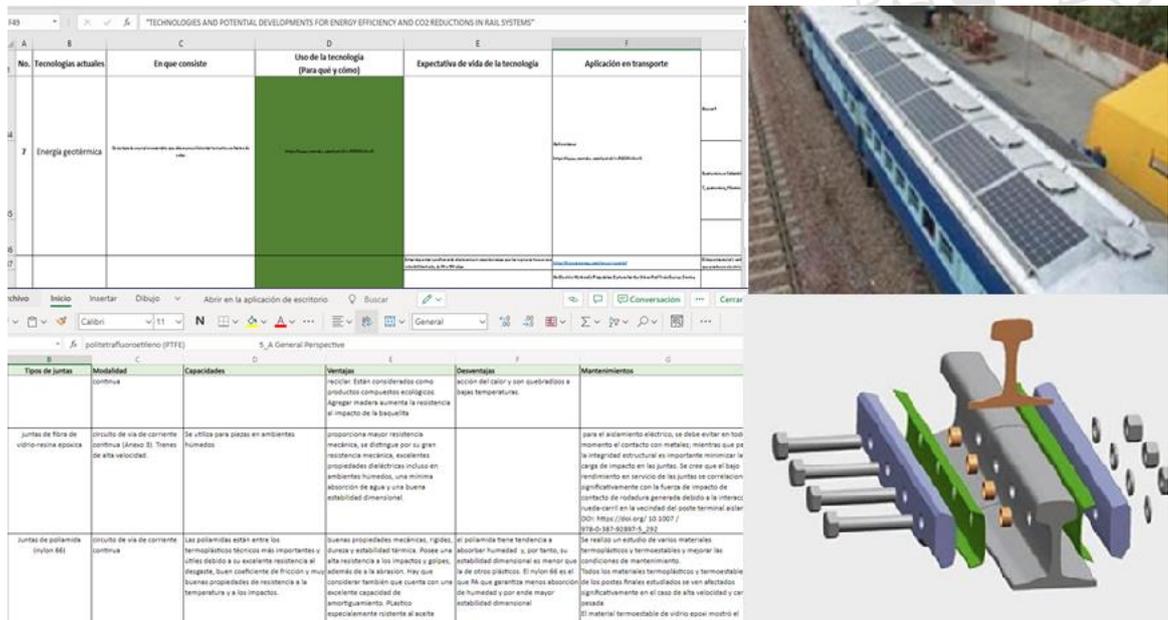
- La poliamida 6 que se debe utilizar para la elaboración del limitador de hundimiento es de grado cast ya que este tipo de poliamida es ideal para piezas sometidas a cargas mecánicas y de fácil mecanizado [38].
- La fibra de vidrio tiene una distribución aleatoria (no tejida) y se recomienda usar fibra de vidrio tipo S ya que esta tiene mayor resistencia mecánica, buena resistencia a la fatiga, mejor respuesta a la humedad y la temperatura [46].
- Se sugiere que para la parte interna emplear cargas síliceas ya que exhiben mejores propiedades reforzantes que el carbonato de calcio [38].

Finalmente, se adjuntó a este trabajo en el anexo 9.1 la ficha técnica realizada para el Metro de Medellín.

### **6.7 Vigilancia tecnológica**

Durante la práctica se realizaron varias búsquedas de actualización tecnológica, estas con el fin de tener una base sólida de nuevas tecnologías usadas en el mundo y en otros sistemas férreos que se puedan incorporar en el Metro de Medellín. A continuación, se mencionan algunas de las búsquedas realizadas y en la figura 12 se muestra cómo se presentaron las búsquedas cada búsqueda se presentaba inicialmente en un documento de Excel para ser aprobada o realizar cambio, el documento contenía la información solicitada e imágenes ilustrativas y finalmente, se entregaban con una presentación en PowerPoint.

- Energías renovables
- Cambio y mantenimiento de durmientes y rieles UIC- 54
- Nuevas tecnologías en gatos coordinados
- Nuevos materiales para juntas aislantes
- Alternativas para máquina lavadoras de trenes
- Tecnología en relés de protección diferencial
- Nuevas alternativas para la red operativa Radwim



**Figura 12.** Formato de entrega de búsquedas de información para el Metro de Medellín.

Adicionalmente, la búsqueda de monitoreo de convocatorias se realizó todos los días para tener más presente las convocatorias en las que la empresa Metro de Medellín y sobre todo el área de I+D+i pudieran participar. En los últimos años, según el informe de la organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), Colombia ha aumentado los beneficios tributarios para la inversión en ciencia, tecnología e innovación. Esta labor permitió que la practicante aprendiera sobre la temática, identificando que su opinión coincide con la de otros, percibiendo estos beneficios como importantes porque son un instrumento eficaz para fomentar la inversión y la competitividad en las empresas y con ayuda de universidades e instituciones dedicadas a la investigación promover no solo la educación sino también la economía a nivel nacional.

## 6.8 Padrinazgo

El programa de Padrinazgo se empezó a implementar en las diferentes dependencias del Metro de Medellín, la practicante junto con el área de I+D+i realizó las primeras visitas al personal de la línea L, línea K, línea J, línea

B, estación Tricentenario, estación Caribe, estación Acevedo y el personal de mantenimiento del tranvía T-A. Durante la primera visita se les dieron conceptos básicos de innovación a los colaboradores, se les enseñó a acceder a la página web creada por el Metro para depositar las ideas y se les incentivó a ser creativos.

## 6.9 Revisión de Informes

Se revisaron los informes entregados por el grupo de Materiales Poliméricos al Metro de Medellín, se realizaron los respectivos comentarios y sugerencias y se apoyó en el proceso de sustentación. Los informes revisados se titulaban: Caja de grasa, Caracterización de rodillo auto lubricante, patín largo de catenaria, patín electromagnético tren MAN, aislador módulo resistencia frenado CAF, limitador antihundimiento, patín intermedio y soporte sensor motor rueda.

## 6.10 Recorrido paneles solares

Como resultado del proceso asignado por el área de I+D+i se obtuvo un informe del estado de las estaciones solares de la red Metro que se le presentó a los ingenieros encargados. En la figura 13 se puede observar que el informe contiene las estaciones donde están ubicados los paneles solares, el estado de las cajas de carga de los celulares con su respectiva tapa, el estado de los suiches y evidencia fotográfica.

A	B	C	D	E	F	G	H
Estación	No. Cajas	No. De salidas por caja	Caja	salidas	Fotos	Condiciones de suiche	Estado de las conexiones de salida
Miraflores	4	7	1	1	Foto 2, anexo 1	Suelto (malo)	No carga
Foto 1, anexo 1	Solo 2 cajas tiene tapa			2		Bueno	No carga
				3			
				4		Bueno	No carga
				5		Bueno	No carga
				6		Bueno	No carga
				7		Suelto (malo)	No carga
			2	1	Foto 3, anexo 1	Bueno	No carga
				2		Bueno	No carga
				3		Bueno	No carga
				4		Bueno	No carga
				5		Bueno	No carga
				6		Bueno	No carga
				7		Bueno	No carga
			3	1	Foto 4, anexo 1	Bueno	No carga
				2		Bueno	No carga
				3		Bueno	No carga
				4		Bueno	No carga
				5		Bueno	No carga
				6		Bueno	No carga
				7		Bueno	No carga
			4	1	Foto 5, anexo 1	Bueno	Si carga
				2		Suelto (malo)	No carga



**Figura 13.** Imágenes del informe entregado a la ingeniera responsable por el proyecto de paneles solares.

## 7 Conclusiones

- Se puede concluir que agregar a la ruta de prototipado ya existente en la empresa Metro de Medellín la elaboración de una ficha técnica en la que se trabaje en conjunto con las entidades involucradas puede evitar a futuro inconvenientes con los materiales y las recomendaciones para los fabricantes. Además, se concluye que el objetivo de este trabajo se logró satisfactoriamente con la elaboración

de la ficha del limitador de hundimiento y con la escogencia de los materiales más adecuados para la fabricación del prototipo.

- Se logró verificar que los materiales sugeridos en la ficha técnica del limitador de hundimiento son comerciales en Colombia y de fácil acceso a importación de ser necesario.
- La ingeniería de materiales ayuda a dar a la vigilancia tecnológica realizada en el Metro de Medellín una perspectiva más amplia en investigación, desarrollo tecnológico y utilización de materiales en los diferentes sistemas que tiene a cargo la empresa.
- La innovación es la base de la competitividad de las empresas actuales, esta innovación va de la mano con el manejo y las propiedades de los materiales. La ingeniería de materiales es una herramienta útil para obtener nuevos usos de estos sin poner en riesgo sus propiedades.

## 8 Referencias

- [1] Área Metropolitana del Valle de Aburrá, «SITVA.» [En línea], 2021. Available: <https://www.metropol.gov.co/movilidad/Paginas/transporte-publico/sitva.aspx> .
- [2] J. Freeman, «La historia viaja en tranvía. El transporte público y la cultura política de la Ciudad de México by Georg Leidenberger (review),» *The American*, vol. 72, n° 3, pp. 521-522, 2015.
- [3] J. M. Estrada, «El Tranvía eléctrico de Medellín (Colombia) y su aporte al proceso de modernización urbana: 1920-1951,» *Historelo. Revista de Historia Regional y Local*, vol. 4, n° 7, pp. 129-56, 2012.
- [4] Metro de Medellín, «Historia.» [En línea], 2021. Available: <https://www.metrodemedellin.gov.co/qui%C3%A9nessomos/historia> .
- [5] A. Lurquin, «El Tranvía – transporte urbano moderno de Medellín,» VICO. [En línea], 2021. Available: <https://www.getvico.com/blog/es/tranvia-transportes-medellin-guia-completa/>.
- [6] Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles (CAF), «Tranvías y metros ligeros.» [En línea], 2021. Available: <https://www.caf.net/es/productos-servicios/proyectos/proyecto-tranvia.php> .
- [7] Translohr, «Tranvía sobre neumáticos.» [En línea], 2021. Available: [http://newtl.com/wp-content/uploads/2017/01/NTL\\_2017\\_8pages\\_ES.pdf](http://newtl.com/wp-content/uploads/2017/01/NTL_2017_8pages_ES.pdf).
- [8] Translohr, «Ayacucho, primera línea de tranvía con neumáticos de América Latina.» [En línea], junio 2016. Available: <https://docplayer.es/82641911-Dossier-de-prensa-linea-translohr-ste5-medellin-colombia-junio-de-ayacucho-primera-linea-de-tranvia-con-neumaticos-de-america-latina.html>.
- [9] OHL Construcción, «Tranvía de Medellín.» [En línea], 2021. Available: [www.ohlconstruccion.com/proyectos/tranvia-de-medellin-colombia/](http://www.ohlconstruccion.com/proyectos/tranvia-de-medellin-colombia/)

- [10] Real Academia Española, «Homologación.» [En línea], 2021. Available: <https://dle.rae.es/homologar>.
- [11] M. E. García, «Desarrollo de una metodología para la mejora de la trazabilidad del proceso de homologación de vehículos ferroviarios,» Universitat Politècnica de València, 2020.
- [12] Real Academia Española, «Prototipo. » [En línea], 2021. Available: <https://dle.rae.es/prototipo?m=form>.
- [13] N. Agudelo y S. Lleras, «Para el salón: herramientas para el diseño centrado en el usuario,» Bogotá D.C: Universidad de los Andes, pp. 112-114, 2015
- [14] F. G. Ariza, Fundéu RAE, «Prototipar y Pototipado, formas adecuadas.» [En línea], 2020. Available: <https://www.fundeu.es>.
- [15] Grupo Molsavo, «Cómo Crear un prototipo de producto.» [En línea], 2020. Available: <https://impresioni3d.com/como-crear-un-prototipo-de-producto/>.
- [16] D. R. Askeland y W. J. Wright, «Ciencia e ingeniería de materiales,» México: CENGAGE Learning, 2012.
- [17] F. Mata Cabrera, «Utilización de composites de matriz polimérica en la fabricación de automóviles,» Técnica industrial, vol. 254, pp. 43-46, 2004.
- [18] Tecnología del plástico, «Termoplásticos reforzados con fibra larga, procesados con sistemas tradicionales.» [En línea], 2008. Available: <https://www.plastico.com/temas/Termoplasticos-reforzados-con-fibra-larga,-procesados-con-sistemas-tradicionales+3062208?pagina=1>.
- [19] BIRTLH, «Moldeo por colada.» [En línea], 31 Marzo 2020. Available: [https://ikastarook.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/DFM/DMPP/DMPP01/es\\_DFM\\_DMPP01\\_Contenidos/website\\_27\\_moldeo\\_por\\_colada.html](https://ikastarook.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/DFM/DMPP/DMPP01/es_DFM_DMPP01_Contenidos/website_27_moldeo_por_colada.html).
- [20] J. Sansz, Infinitia Research, «Caractrización de materiales. Principales técnicas empleadas.» [En línea], 17 Septiembre 2020. Available: <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/caracterizacion-de-materiales-tecnicas/>.
- [21] J. M. Gil, Laboratorio de Técnicas Instrumentales UVA, «Espectrometría FTIR.» [En línea], 2020. Available: <https://laboratoriotecnicasinstrumentales.es/analisis-quimicos/espectrometra-ftir>.
- [22] Thermo Fisher Scientific, «FTIR Sample Techniques: Attenuated Total Reflection (ATR) | Thermo Fisher Scientific – UK.» [En línea], 2015. Available: <https://www.thermofisher.com/co/en/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/molecular-spectroscopy-information/ftir-information/ftir-sample-handling-techniques/ftir-sample-handling-tec>.
- [23] S. Suriñach, M. Baró, S. Bordas, N. Clavaguera y M. Clavaguera-Mora, «La calorimetría diferencial de barrido y su aplicación a la Ciencia de Materiales,» *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 31, nº 1, pp. 11-19,

1992.

- [24] R. González Paz , «Empleo de análisis térmicos (DSC, TGA, ITC) para estudio de nanomateriales.» [En línea], 2021. Available: <https://www.slideserve.com/griselda-robert/empleo-de-an-lisis-t-rmicos-dsc-tga-itc-para-el-estudio-de-nanomateriales>.
- [25] B. Vargas Suaza , «Universidad de Antioquia,» Servicios de Extensión. [En línea], 2017. Available: [https://www.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/generales/interna!/ut/p/z0/fZBBawlxEIX\\_SjzssSSuxepxWaQgniaql5IKm2UFHY7JmZhf992YtFATpbT7emzeP0VZvtQ3Q0x6EYgCfeWen37N5XY6rd7P6\\_FrWpprW1eJjvVmVs1lvtf3fkBPoelnYsIsXg-BV9LaNScB3DUJhgJ\\_pEM\\_4O1PokSV3cTRyk9HPJBRmn7o2smpQ](https://www.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/generales/interna!/ut/p/z0/fZBBawlxEIX_SjzssSSuxepxWaQgniaql5IKm2UFHY7JmZhf992YtFATpbT7emzeP0VZvtQ3Q0x6EYgCfeWen37N5XY6rd7P6_FrWpprW1eJjvVmVs1lvtf3fkBPoelnYsIsXg-BV9LaNScB3DUJhgJ_pEM_4O1PokSV3cTRyk9HPJBRmn7o2smpQ).
- [26] L. González Alonso, «Estudio experimental de la transición vítrea y de la dinámica macromolecular en dispersiones sólidas amorfas del antibiótico cloranfenicol en ácido poliláctico,» Universidad Politécnica de Catalunya , Barcelona , 2018.
- [27] Y. Granados Cristancho , «Importancia De Los Ensayos TGA y DSC en el Estudio de las Propiedades Térmicas de Mezclas Asfálticas,» Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2015.
- [28] Erica Aislamiento-Estanqueidad, «DUREZA CAUCHOS.» [En línea], 2020. Available: <http://www.erica.es/dureza/>. [Último acceso: 2021].
- [29] D. Alsina , E. Cagnola , R. Güemes, J. C. Nosedá y H. Odetti , «Química. Conceptos fundamentales,» Universidad Nacional del Litoral, 2015.
- [30] Sinergia, «Plan director.» [En línea], 2021. Available: [https://www.sinnexus.com/business\\_intelligence/plan\\_director.aspx](https://www.sinnexus.com/business_intelligence/plan_director.aspx).
- [31] A. Castillo, «Estado del Arte en la enseñanza del emprendimiento,» CORFO y SERCOTEC, Chile, 1999.
- [32] Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante, «La búsqueda de información científica.» [En línea], 2021. Available: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/33983/1/BUSQUEDA\\_informacion\\_DOCTORADO.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/33983/1/BUSQUEDA_informacion_DOCTORADO.pdf).
- [33] L. B. López, «La búsqueda bibliográfica: Componente clave del proceso de investigación,» *DIAETA*, vol. 115, nº 24, pp. 31-37, 2006.
- [34] Superintendencia de Industria y Comercio, «Guía de búsquedas de patentes.» [En línea], Septiembre 2017. Available: <https://www.sic.gov.co/sites/default/files/documentos/092017/cartilla-guia-busqueda-patentes-version-final.pdf>.
- [35] Observatorio tecnológico UA, «Guía de vigilancia e inteligencia tecnológica.» [En línea], 2021. Available: [https://www.ovtt.org/guias/guia-de-inteligencia-tecnologica/?cli\\_action=1629761157.878](https://www.ovtt.org/guias/guia-de-inteligencia-tecnologica/?cli_action=1629761157.878).
- [36] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, «¿Qué es la Vigilancia Tecnológica?» [En línea], 2021. Available:

<https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/centro-nacional-tecnologia-regadios/vigilancia-tecnologica/>.

- [37] Ministerio de Educación Nacional de Colombia, «Ser competente en tecnología.» [En línea], 2008. Available: [https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-340033\\_archivo\\_pdf\\_Orientaciones\\_grales\\_educacion\\_tecnologia.pdf](https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-340033_archivo_pdf_Orientaciones_grales_educacion_tecnologia.pdf).
- [38] F. A. Giraldo Agudelo, L. L. Gómez Restrepo, G. Rivera Botia y V. Arenas Arévalo, «Informe de análisis de materiales poliméricos empleado en el limitador del sistema antihundimiento de vehículos tranviarios,» Medellín, 2021.
- [39] M. C. Evora, O. L. Gonçalves, R. C. Dutra, M. F. Diniz, H. Wiebeck y L. G. de Andrade e Silva, «Comparação de Técnicas FTIR de Transmissão, Reflexão e Fotoacústica na Análise de Poliamida-6, Reciclada e Irradiada,» *Polimeros*, vol. 12, nº 1, pp. 60-68, 2002.
- [40] G. Widmann, «Información TA: Interpretación de curvas TGA,» UserCom, 2001.
- [41] R. YÁÑEZ MACÍAS, «Modificación de la superficie de MWCNTs a partir de la síntesis de nylon-6 asistida por microondas,» Centro de investigación en química aplicada, Saltillo, Coahuila, 2011.
- [42] S. M. Velásquez y D. H. Giraldo, «Caracterización y evaluación del tiempo de vulcanización de caucho natural colombiano obtenido de tres variedades clonales de hevea brasiliensis,» *Ingeniería y Competitividad*, vol. 16, nº 2, pp. 225-233, 2014.
- [43] M. J. Fernández-Berridi, N. González, A. Mugica y C. Bernicot, «Pyrolysis-FTIR and TGA techniques as tools in the characterization of blends of natural rubber and SBR,» *Thermochimica Acta*, vol. 444, nº 1, pp. 65-70, 2006.
- [44] C. García Jiménez, A. Fernández-Torres, A. Gonzalez-Jimenez, A. Rodríguez y J. L. Valentin, «Método de diagnóstico del estado de piezas de caucho - metal,» *Revista de Plásticos Modernos*, vol. 109, pp. 7-13, 2015.
- [45] J. P. Gaviría, D. Quattrini, A. Bohé y D. Pasquevich, «Estudio Cinético de la Descomposición del Carbonato de Calcio por Cromatografía Gaseosa,» *Revista Matéria*, vol. 10, nº 1, pp. 170-177, 2005.
- [46] J. M. Arroyo Martínez, «Estudio de la morfología interfacial en materiales compuestos de matriz epoxi modificada y fibras de vidrio,» Madrid, 2010.

## **9 Anexos**

### **9.1 Ficha técnica**

Con ayuda de la revisión bibliográfica se logró finalizar satisfactoriamente la ficha técnica necesaria para realizar el proceso de prototipado propuesto en este trabajo.

 <b>METRO DE MEDELLÍN</b> CALIDAD DE VIDA	<b>GERENCIA DE PLANEACIÓN          PROCESO (I+D+i)</b>		ID		VERSIÓN	
			Nº Ficha	001	V1	
<b>Ficha de Especificaciones Técnicas          para la Fabricación de Prototipos</b>			Plano Metro		I. Caracterizac	
<b>IDENTIFICACIÓN Y UBICACIÓN</b>						
Sistema	Vehículo TRANSLOHR STE 5		Nombre	Limitador Antihundimiento		
Subsistema	Órganos de Rodamiento					
Equipo	Ruedas y Neumáticos					
Descrip. General y Funcionamiento	En caso de pinchazo de una rueda, un dispositivo antihundimiento interno de la rueda permite continuar rodando en modo degradado para volver al depósito, sin cambiar la rueda en línea. Entonces, se puede seguir rodando a una velocidad máxima de 35 km/h. Este dispositivo presenta diferencias en función del tipo de bogie sobre el que se encuentre.					
Condiciones de Trabajo	En condiciones normales de operación el limitador esta sometido a esfuerzos de tracción por medio de los tornillos M16 que lo sostienen. Cuando cumple su función el limitador está sometido a esfuerzos de impacto y compresión, flexión en condiciones estáticas y cargas alternadas que generan fatiga. Durante el mantenimiento y el montaje de los tornillos se puede generar cortes provocados por herramientas.					
Ambiente de Trabajo	Este sistema está sometido a esfuerzos mecánicos, vibraciones mecánicas, contacto con lubricantes, humedad, temperaturas propias del aire comprimido de la rueda, de la llanta en servicio y del ambiente.					
<b>CARACTERIZACIÓN DEL ELEMENTO ORIGINAL</b>						
Fabricante Original	HUTCHINSON					
<b>Análisis Químico y Metalúrgico - Propiedades Físicas.</b>					Normas	
Análisis de Composición Química	<b>Composición química:</b> El limitador esta compuesto por tres zonas que se denominan como zona exterior, Intermedia e interior. <b>Exterior:</b> Fabricada con poliamida 6, 2% en peso de negro de humo. <b>Intermedia:</b> Fabricada con poliamida 6, 2,5% en peso de negro de humo y 9% en peso de fibra de vidrio. <b>Interior:</b> Fabricado en una mezcla de caucho natural con caucho SBR, negro de humo y carga síliceas.				NA	
	Color	Negro por el negro de humo			NA	
<b>Resultados Sobre Ensayos</b>						
FTIR	DSC	Dureza	R. Impacto	R. Eléctrica	Corriente	Normas
Compre/ Set	TGA	R. Tracción	R. a la Flexión	Aislamiento	Densidad	
Resultados	<b>Parte externa:</b> Dureza shore D= 65 ± 1 <b>Parte intermedia:</b> Dureza shore D= 65 ± 1, densidad= 1,14 g/cm3 <b>Parte interior:</b> Dureza shore A= 56 ± 1, densidad= 1,41 g/cm3				Dureza: ASTM D2240 Densidad: ASTM	
<b>Observaciones</b>						
Material	Se debe usar poliamida 6 grado Cast para la pieza debido a las altas cargas mecánicas a las que esta sometida y fácil mecanizado. La fibra de vidrio tiene una distribución aleatoria (no tejida) y se recomienda usar fibra de vidrio S ya que aporta mayor resistencia mecánica y rigidez, con módulos de elasticidad y resistencia a tracción superiores a otros tipos de vidrio, buena respuesta a fatiga, humedad y temperatura. No se puede usar poliamida 6 reciclada. Se recomienda buscar proveedores que puedan vaciar la partes externa e intermedia en una misma colada reforzando en el mismo proceso la parte intermedia con la fibra de vidrio. Se debe emplear cargas síliceas en la parte interior ya que exhiben mejores propiedades reforzantes que el carbonato de calcio. Se recomienda de ser posible reforzar los extremos del limitador de hundimiento, con el fin de que no se vea afectada la pieza por herramientas corte.					
Proceso de Fabricación	Poliamida vaciada					
<b>Observación:</b> El cambio del material debe estar autorizado por el Área de I+D+i mediante documento escrito o correo de Internet, previa solicitud del fabricante. Este debe cumplir con especificaciones y obtener propiedades iguales o mejores a las del elemento original						